RESEARCH in BUILDING ENGINEERING

EXCO'25

INVESTIGANDO en INGENIERÍA de EDIFICACIÓN EXCO'25

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ETS de INGENIERÍA de EDIFICACIÓN



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

RESEARCH in BUILDING ENGINEERING EXCO'25

INVESTIGANDO

en INGENIERÍA de EDIFICACIÓN EXCO'25

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ETS de INGENIERÍA de EDIFICACIÓN

© 2025, ETS de Ingeniería de Edificación. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA - 1

EDITORS Editores

ALBIOL IBÁÑEZ, José Ramón	Universitat Politècnica de València
ARRUÉ BURILLO, Paloma	Universitat Politècnica de València
COLLADO LÓPEZ, Mª Luisa	Universitat Politècnica de València
GIL PIQUERAS, Teresa	Universitat Politècnica de València
IBORRA LUCAS, Milagro	Universitat Politècnica de València
GANDÍA ROMERO, José Manuel	Universitat Politècnica de València
RODRIGUEZ NAVARRO, Pablo	Universitat Politècnica de València
SALINAS MARTÍNEZ, Pedro Gerardo	Universitat Politècnica de València
FERNANDEZ PLAZAOLA, Igor	Universitat Politècnica de València
COS-GAYÓN LÓPEZ, Fernando José	Universitat Politècnica de València
MARTINEZ CORRAL, Aurora	Universitat Politècnica de València

PUBLISHING office Editoral:

REPROEXPRES Ediciones

REPROEXPRES, S.L.
C/ Ramón Llull, 17 - bajo - 46021 - Valencia
Tel.: 96 361 29 39
www.reproexpres.com
atencionalcliente@reproexpres.com

MAKING Maquetación :

ALBIOL IBÁÑEZ, José Ramón (Making & Cover photo)	Universitat Politècnica de València
GREGORI SAN ANDRÉS, Miguel	REPROEXPRES, S.L.

INTERNATIONAL CURATOR Comisario Internacional

ALBIOL IBÁÑEZ, José Ramón	Universitat Politècnica de València

ACKNOWLEDGMENTS Agradecimientos:

















ISBN: 978-84-129620-8-6

©2025, ETS de Ingeniería de Edificación, UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE EXCO

SPAIN

ALBIOL IBÁÑEZ, José Ramón	Universitat Politècnica de València
ALMENAR MUÑOZ, Mercedes	Universitat Politècnica de València
ANGULO IBÁÑEZ, Quiteria	Universitat Politècnica de València
APARICIO FERNÁNDEZ, Carolina Sabina	Universitat Politècnica de València
BONET SENACH, José Luís	Universitat Politècnica de València
BOSCH GONZÁLEZ, Montserrat	Universitat de Catalunya
CAAMAÑO MARTÍN, Estefanía	Universidad Politécnica de Madrid
CARCEL CARRASCO, Javier	Universitat Politècnica de València
CASAR FURIÓ, Maria Emilia	Universitat Politècnica de València
CHÍAS NAVARRO, Pilar	Universidad Alcalá de Henares, Madrid
COLMENERO FONSECA, Fabiola	Universidad La Salle
FERNANDEZ PLAZAOLA, Igor	Universitat Politècnica de València
GANDIA ROMERO, José Manuel	Universitat Politècnica de València
GARCÍA BALLESTER, Luis V.	Universitat Politècnica de València
GARABITO LÓPEZ, Javier	Universidad de Burgos
GIL PIQUERAS, M. Teresa	Universitat Politècnica de València
GIRBÉS PÉREZ, Jorge	Universitat Politècnica de València
IBORRA LUCAS, Milagro	Universitat Politècnica de València
LLINARES MILLÁN, Jaime	Universitat Politècnica de València
LLINARES MILLÁN, María del Carmen	Universitat Politècnica de València
LÓPEZ PATIÑO, Gracia	Universitat Politècnica de València
LÓPEZ GONZÁLEZ, María Concepción	Universitat Politècnica de València
MARTÍNEZ CORRAL, Aurora	Universitat Politècnica de València
MAS BARBERÁ, Xavier	Universitat Politècnica de València
MEDINA RAMÓN, Francisco Javier	Universitat Politècnica de València
NAVARRO GARCÍA, María Luisa	Universitat Politècnica de València
NAVARRO ASTOR, Elena	Universitat Politècnica de València
PALMERO IGLESIAS, Luis	Universitat Politècnica de València
PEÑALVO LÓPEZ, Elisa	Universitat Politècnica de València
PEREIRO BARCELÓ, Javier	Universidad de Alicante
RODRÍGUEZ NAVARRO, Pablo	Universitat Politècnica de València
SALINAS MARTÍNEZ, Pedro	Universitat Politècnica de València

ITALY

BERNARDO, Graziella	Università degli Studi della Basilicata, Matera
ANDRISANI, Giuseppe	Università degli Studi della Basilicata, Matera
GUIDA, Antonella	Università degli Studi della Basilicata, Matera
GRECCHI, Manuela	Politecnico di Milano
MAININI, Andrea Giovanni	Politecnico di Milano
MALIGHETTI, Laura	Politecnico di Milano
PISANI, Marco Andrea	Politecnico di Milano
POLI, Tiziana	Politecnico di Milano
RE CECCONI, Fulvio	Politecnico di Milano
DI RUOCCO, Giacomo	Università degli Studi di Salerno

SICIGNANO, Enrico	Università degli Studi di Salerno
BESANA, Daniela	Università di Pavia
GRECO, Alessandro	Università di Pavia

TURKEY

HATTAP, Sibel Onat	Mimar Sinan Fine Arts University, Istanbul
AYDEMIR, Olcay	Zeytinburnu Municipality, Istanbul

LITHUANIA

VILUTIENĖ, Tatjana	Vilnius Gediminas Technical University
ŠAPARAUSKAS, Jonas	Vilnius Gediminas Technical University

UKRAINE

YEKSAROVA, Nadia	Odessa State Academy of Civil Engineering & Architecture
YEKSAROV, Vladimir	Odessa State Academy of Civil Engineering & Architecture
SURIANINOV, Mykola	Odessa State Academy of Civil Engineering & Architecture
POPOV, Oleg	Odessa State Academy of Civil Engineering & Architecture
SYURKO, Sergey	Odessa Home Exhibition Center

POLAND

DAWCZYŃSKI, Szymon	Silesian University of Technology, Gliwice
GORSKI, Marcin	Silesian University of Technology, Gliwice
KRZYWON, Rafal	Silesian University of Technology, Gliwice
ZIÓŁKOWSKI, Patryk	Gdańsk University of Technology
ABRAMOWICZ, Malgorzata	West Pomeranian University of Technology Szczecin

CUBA

ÁLVAREZ RODRÍGUEZ, Odalys	Universidad Tecnológica de La Habana
LÓPEZ LLANUSA, Alejandro	Universidad Tecnológica de La Habana
WAINSHTOK RIVAS, Hugo	Universidad Tecnológica de La Habana

USA

BUNZA, Matt	Massachusetts Institute of Technology (MIT)
JIN, Weihua	New York University, NYC
SUN, Xiaonuan	Portland State University

GERMANY

KLEINKE, Anja	University Jade Hochschule - Oldenburg

CHINA

CHENG, Shidan	Wuhan University
HUANG, Li	China Academy of Art, Hangzhou
CAO, Vivian	China Construction Materials & Technology Consulting Company
WANG, Hailong	Zhejiang University
SUN, Xiaoyan	Zhejiang University
XIAN, Xiangping	CityU Hong Kong
LAU, Sunnie	CUHK Hong Kong
LAU, Stephen	Shenzhen University
BASHA, Humayun	Huaqiao University (Xiamen)
YIQI, Tao	Shenzhen University
LIU, Quiong	University of Shanghai for Science and Technology
HIDALGO, Teo	Xi'an Jiaotong–Liverpool University
KOMYSHEV, Dmitry	North Minzu University
LI, Kun	Wuhan University
WANG, Youqun	Xi'an University of Architecture and Technology
QI, Liangjie	Xi'an University of Architecture and Technology

The NETHERLANDS

VISSCHER, Henk	TU Delft

SWITZERLAND

MALTESE, Sebastiano	University of Applied Sciences and Arts of Southern Switzerland

EMIRATES

PERVAIZ, Salman	Rochester Institute of Technology. RIT -Dubai
SAMAD, Wael	Rochester Institute of Technology. RIT -Dubai

RUSSIA

MAKSIMOVA, Svetlana	Perm National Research Polytechnic University

JAPAN

NIGLIO, Olimpia

Hokkaido University, Faculty of Humanities and Human Sciences

INDEX

EDITORS p.2

CURATOR p.2

INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE p.4

CHAPTER INDEX p.8

FOREWORD p.12

CHAPTER 1: *ECONOMY p.17*

1.1-STATISTICAL ANALYSIS OF SOLAR TECHNOLOGY IN SUSTAINABLE ENERGY JUSTICE IN SOUTHERN MEXICO. p.18
Fabiola Colmenero Fonseca / Bruno Guadarrama Rincón / Amparo Borrell / Javier Cárcel Carrasco / Ramiro Rodríguez Pérez

1.2-BUILDING MANAGEMENT SYSTEMS (BMS), A FURTHER ADVANCE IN BUILDINGS EFFICIENCY . p.28
J. Fuentes-del-Burgo / E. Navarro-Astor

1.3-TECHNOLOGIES APPLIED TO SUSTAINABLE BUILDINGS: A REDUCTION IN ENERGY CONSUMPTION FOR HOUSING. p.38
Juan Francisco Palomino Bernal / Javier Cárcel Carrasco / Fabiola Colmenero Fonseca / Alejandro Guzmán Ramírez / Kevin Alexander Echeverry Bucurú

1.4-CUSTOMER PROFILE OF THE REAL ESTATE AGENT AS THE INDUSTRY GOES DIGITAL. p.50
Juan Carlos Asensio-Soto /Elena Navarro-Astor

1.5-RESOURCE MAPPING AND SMART GEOLOCATION: HARVEST MAP TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABILITY, ESG GOVERNANCE AND CIRCULAR ECONOMY p. 60
Ramiro Rodríguez Pérez / Javier Cárcel Carrasco / Fabiola Colmenero Fonseca / Juana Mercedes Perlaza Rodríguez / Kevin Alexander Echeverry Bucurú

1.6-ANALYSIS OF MINING HOUSING IN SPAIN. STUDY FOR CONVERSION INTO AN ENERGY-EFFICIENT HOUSING PARK p.70
Aurora Martínez-Corral / Domingo Cuéllar

CHAPTER 2:

SUSTAINABILITY -p.80

2.1-IMPACT OF URBAN INTERDUNE LAGOONS ON THE SOCIAL WELFARE AND SUSTAINABILITY OF COASTAL METROPOLITAN AREAS. p.81
Maria del Carmen Ixtepan Turrent / Fabiola Colmenero Fonseca / Javier Cárcel Carrasco / Andrés Salas Montoya / Alejandro Guzmán Ramírez

2.2-EVALUATION OF THE INTERACTION BETWEEN DAYLIGHT AND OUTDOOR VIEW IN UNIVERSITY BUILDINGS: A CASE STUDY. p.92
Giacomo Caccia / Matteo Cavaglià / Alberto Speroni / Luis Palmero Iglesias / Tiziana Poli / Andrea Giovanni Mainini

2.3-THE ACOUSTICS OF THE SYDNEY OPERA HOUSE. p.102
Quiteria Angulo-Ibáñez / Aitana Puig-Rocher

2.4-PERCEPTION OF PUBLIC SPACE THROUGH OUTDOOR ADVERTISING. THE CASE OF MADRID. p.112
Quiteria Angulo-Ibáñez / Miriam Hernández-García

2.5-THERMAL MONITORING AND HEATWAVE INCIDENCE OF TEMPORAL DECARBONIZATION MEASURES AND NATURE BASED SOLUTIONS IN EL GRAO NEIGHBORHOOD, CASTELLON. DIVAIRCITY PROJECT. p.122
Amparo León Vinet / Elisa Peñalvo López / Vicente León Martínez / Iván Valencia Salazar

2.6-GREEN ROOF ENERGY IMPACT ANALYSIS ON A CLASSROOM BUILDING AT THE TECHNOLOGICAL INSTITUTE OF BOCA DEL RIO. p.131
José-Juan Huesca-Lopez / Iván Valencia-Salazar / Elisa Peñalvo-López / Juan-David Garay-Marin / Fabiola Lango-Reynoso

2.7-EVALUATION OF ENERGY EFFICIENCY PROPOSALS IN BUILDING M OF THE TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO BOCA DEL RÍO CAMPUS, IN BOCA DEL RÍO, VERACRUZ. p.141
Ignacio Z. Carmona-Uscanga / Iván Valencia-Salazar / E. Peñalvo-López / J. David Garay-Marín / Fabiola Lango-Reynoso

2.8-CORRELATION BETWEEN LEED CERTIFICATION AND LOW-CO2E BUILDINGS: TOWARDS A NEAR ZERO CARBON (NZC) DESIGN. p.150
Ida Severino / Giacomo Di Ruocco

2.9-CARBON NEUTRAL ARCHITECTURE: LCA METHOD"FROM THE CRADLE TO THE CRADLE" FOR THE "ZERO EMISSIONS" DESIGN OF TIMBER BUILDINGS. p.160
Ludovica Amorelli / Giacomo Di Ruocco

CHAPTER 3: *NEURAL ENGINEERING* *p.170*

3.1-AGING IN PLACE AND PLACE ATTACHMENT IN MACAU: THE ROLE OF EMOTIONAL EXPERIENCES AND PHYSICAL CHARACTERISTICS OF PUBLIC SPACES. p.172
Stephen Siu Yu LAU / Hongzhan LAI

3.2-MACHINES THAT DREAM: EXPLORING IMAGINATION IN THE AGE OF ARTIFICIAL CREATIVITY. p.181
Francisco Javier Alvarez Torres / Fabiola Colmenero Fonseca / Bruno Guadarrama Rincón / Alejandro Guzmán Ramírez

CHAPTER 4: *HERITAGE* *p. 191*

4.1-PRESERVATION STRATEGIES OF THE BRITISH CEMETERY IN MADRID A TOURIST TOUR THROUGH THE CEMETER. p.192
Ana Girbés Baroja / Marta Girbés Baroja / Jorge Girbés Pérez

4.2-DESIGN AND ANNI ALBERS: GEOMETRY AND COLOUR IN HER WORKS. p.202
Jorge García Valldecabres / Luis Cortés Meseguer / Liqun Li

4.3-ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR ARCHAEOLOGICAL GARDEN RECONSTRUCTION. p.211
Quiteria Angulo-Ibáñez / José David Gordo-Martínez

4.4-THE ENHANCEMENT OF THE SITE AND THE HERMITAGE OF PINTARRAFES CARLET. p.221
Pablo Ariel Escudero / Luis Cortés Meseguer / Jorge García Valldecabres / Concepción López González

4.5-REINTERPRETING THE HERITAGE OF THE VALENCIAN MODERN MOVEMENT: CREATION OF A BIM DATABASE FOR THE BUILDING AT GRAN VÍA MARQUÉS DEL TURIA 29. p.229
Pablo A. Escudero / Jorge L. García Valldecabres / M. C. López González / Luis Cortés Meseguer

4.6-MATERIAL APPROXIMATION OF THE EAST SIDE OF THE MAIN CLOISTER, FORMER CONVENT OF SANTO DOMINGO (VALENCIA, SPAIN). p.239
S. Kröner / E. Arias-Valera / L. Osete Cortina / X. Mas-Barberà

4.7-FORMAL AND COMPOSITIONAL ASPECTS OF THE GOTHIC TRACERY OF THE MAIN CLOISTER IN THE FORMER CONVENT OF SANTO DOMINGO OF VALENCIA. p.249
E. Arias-Valera1 S. Kröner / L. Osete Cortina / X. Mas-Barberà

4.8-PROJECTED WORKS IN THE CHURCH OF SAINT JOHN THE APOSTLE AND EVANGELIST OF MASSAMAGRELL IN THE 20TH CENTURY. p.259
Valentina Ciaffoni / Jorge García Valldecabres / Luis Cortés Meseguer / María Concepción López González

4.9-REHABILITATION OF THE DOME OF THE CHURCH OF SAN JUAN APÓSTOL AND EVANGELISTA IN MASSAMAGRELL. p.268
Valentina Ciaffoni / Jorge García Valldecabres / Luis Cortés Meseguer / María Concepción López González

4.10-FEASIBILITY OF INDUSTRIALIZED FACADES IN BUILDING REHABILITATION. p.278
M. Iborra-Lucas / John J. Zambrano-Alcivar

4.11-DIGITAL RECONSTRUCTION OF THE NABATAEAN ARCH IN PETRA WORLD HERITAGE SITE, JORDAN. p-288
Wang Yang / María José Viñals Blasco / Jorge García Valldecabres

CHAPTER 5: *TECHNOLOGY*

p-298

5.1-DURABILITY PERFORMANCE OF CONCRETE MADE WITH DEMOLITION WASTE. p.299
J.R. Lliso-Ferrando / L. Mata-Rodríguez / A. Martínez-Ibernón / I. Gasch Molina / J.M. Gandía-Romero / M. Valcuende Payá

5.2-CURING CONDITIONS INFLUENCE ON THE DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE. PART 1. CONCRETE CHARACTERISATION. p.309
J.R. Lliso-Ferrando / A. Martínez-Ibernón / P. Monzón-Bello / I. Gasch Molina / J.M. Gandía-Romero / M. Valcuende Payá

5.3-CURING CONDITIONS INFLUENCE ON THE DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE. PART 2. CORROSION MONITORING. p.319
J.R. Lliso-Ferrando / T. Yáñez Albán /J.E. Ramón-Zamora / A. Martínez-Ibernón / I. Gasch Molina / J.M. Gandía-Romero / M. Valcuende Payá

5.4-SURFACE-APPLIED CORROSION INHIBITOR EVALUTAION ON REINFORCED CONCRETESTRUCTURES. PART 1. APPLICATION AT THE BEGINNING OF THE SERVICE LIFE. p. 329
J.R.Lliso-Ferrando / V. Nzang Ondo / A. Martínez-Ibernón / I. Gasch Molina / J.M. Gandía-Romero / M. Valcuende Payá

5.5-SURFACE-APPLIED CORROSION INHIBITOR EVALUATION ON REINFORCED CONCRETE STRUCTURES. PART 2. APPLICATION DURING THE SERVICE LIFE p.339

J.R.Lliso-Ferrando / V. Nzang Ondo / A. Martínez-Ibernón / I. Gasch Molina / J.M. Gandía-Romero / M. Valcuende Payá

5.6-CORROSION IN REINFORCED CONCRETE CONSTRUCTIONS LOCATED IN VALENCIA. CASE STUDY. p.349

Josep Ramon Lliso-Ferrando / Ana Martínez-Ibernón / I. Gasch-Molina / J. M. Gandía-Romero / Manuel Valcuende Payá / J. Soto Camino

5.7-CORROSION RISK IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES LOCATED IN THE MARINE ENVIRONMENT USING ELECTRICAL RESISTANCE MEASUREMENT. p.359

J.R. Lliso-Ferrando / A. Martínez-Ibernón / R. Vengut-Tro / I. Gasch Molina / J.M. Gandía-Romero / M. Valcuende Payá

5.8-GRADING STUDY OF QUARRY AGGREGATES AND RECYCLED AGGREGATES FROM DEMOLITION WASTE. p.369

J.R. Lliso-Ferrando / A. Arenós-Barrachina /A. Martínez-Ibernón / I. Gasch Molina /J.M. Gandía-Romero / M. Valcuende Payá

5.9-METHODOLOGY FOR REPAIR OF CORROSION AFFECTED REINFORCED CONCRETE STRUCTURES. p.379

J.R. Lliso-Ferrando / I. Gasch Molina / A. Martínez-Ibernón / J.M. Gandía-Romero / M. Valcuende Payá

5.10-CORROSION PERFORMANCE OF CONCRETES MANUFACTURED WITH DIFFERENT CEMENTS. p.389

J.R. Lliso-Ferrando / I. Gasch Molina / A. Martínez-Ibernón / J.M. Gandía-Romero / M. Valcuende Payá / J. Soto Camino

5.11-PROBLEMS IN REPAIRS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES AFFECTED BY CORROSION. p.399

J.R. Lliso-Ferrando / I. Gasch Molina / A. Martínez-Ibernón / J.M. Gandía-Romero / M. Valcuende Payá / J. Soto Camino

5.12-CONCRETE RESISTIVITY ANALYSIS UNDER LABORATORY CONDITIONS ON SPECIMENS OF DIFFERENT SIZES. p.409

J.R. Lliso-Ferrando / I. Gasch Molina / A. Martínez-Ibernón / J.M. Gandía-Romero / M. Valcuende Payá

5.13-QUICK ESTIMATION OF CHLORIDE DIFFUSION COEFFICIENT FROM NON-STEADY-STATE EXPERIMENTS IN CONCRETE. p.419

J.R. Lliso-Ferrando / I. Gasch Molina / A. Martínez-Ibernón / J.M. Gandía-Romero / M. Valcuende Payá / J. Soto Camino

5.14-SIGNIFICANCE OF MACROCELL CURRENTS IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES LOCATED IN THE MARINE ENVIRONMENT. p.429

J.R. Lliso-Ferrando / I. Gasch Molina / A. Martínez-Ibernón / J.M. Gandía-Romero / M. Valcuende Payá

5.15-ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF PATCH REPAIRS IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES. PART 1: MORTAR USED. p.439

J.R. Lliso-Ferrando / I. Gasch Molina / A. Martínez-Ibernón / J.M. Gandía-Romero / M. Valcuende Payá

5.16-ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF PATCH REPAIRS IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES. PART 2: PASSIVATING MORTAR. p.449

J.R. Lliso-Ferrando / I. Gasch Molina / A. Martínez-Ibernón / J.M. Gandía-Romero / M. Valcuende Payá

5.17-VARIATION IN CORROSION RATE AFTER THE APPLICATION OF CYCLIC LOADS IN REINFORCED CONCRETE. p.459

P. Monzón-Bello / A. Martínez-Ibernón / J.R. Lliso-Ferrando / R. Vengut-Tro

5.18-MODELING AND THERMAL STUDY IN TRNSYS OF A GREEN WALL IN A GOVERNMENTAL BUILDING IN THE MUNICIPALITY OF VERACRUZ. p.468

V. Ortiz-Garcia / C.A. Sosa-Villalobos /G. Domínguez-Sánchez / A. Rodriguez-Andrade / E. Peñalvo-López / I. Valencia-Salazar

5.19-ANALYSIS OF PATHOLOGIES IN BUILDINGS AND RISING WATER TABLE IN BÉTERA (VALENCIA). PROPOSAL FOR A PIEZOMETRIC PROTOCOL FOR PUBLIC WARNING. p.477

Javier Rodrigo Ilarri / Aurora Martínez-Corral / Claudia-Patricia Romero-Hernández / Lucía Belenguer-Espinosa / María-Elena Rodrigo-Clavero

5.20-BIOCONSTRUCTION AND BIOMATERIALS. MYCELIUM FUNGUS, THE BIOARCHITURE SUSTAINABLE BIOMATERIAL OF THE FUTUR. p.487

K. Essamhi-Saidi / C. José. Parra-Costa / I. De La Paz. Miñano-Belmonte / J. M. Mateo / F.J. Benito

5.21-COCONUT FIBRE IN MORTAR MATRIX. p.497

Gina San Andrés Zevallos / Javier Chonillo Portés / Joseph Cedeño Palacios / Melina Villacreses López

CHAPTER 6: *TOWN PLANNING* *p.507*

6.1-GET OUT OF HERE: URBAN DESIGN AGAINST PEOPLE. p.508
Arianna Guardiola Víllora / Elena Navarro Astor

6.2-STANDARDS IN THE DESIGN OF RAILWAY STATION SPACES. p.518
Juan B. Font Torres / Jorge L. García Valldecabres, / Luis Cortés Meseguer

6.3-URBAN EVOLUTION OF THE OLD JEWISH QUARTER OF VALENCIA. p.529
Concepción López González / Pablo Ariel Escudero / Luis Cortés Meseguer / Jorge García Valldecabres

CHAPTER 7: *HUMAN RESOURCES* *p.538*

7.1-AUTHOR'S SOCIAL HOUSING FROM THE STUDY OF THE ORIGINAL DESIGN TO THE ENERGY REQUALIFICATION. p.539
Giuseppe Angileri / Graziella Bernardo / Giuseppina Currò / Giovanni Francesco Russo / Luis Palmero Iglesias

PRÓLOGO

Director de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación

El año 2025 ha tenido un significado especial para la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de la Universitat Politècnica de València. Hemos celebrado 53 años de trayectoria académica, una etapa suficientemente larga como para mirar atrás con respeto, pero, sobre todo, para reafirmar con convicción el camino que queremos seguir construyendo hacia el futuro.

En ese recorrido, EXCO, el Salón Tecnológico de la Construcción, ha sido y sigue siendo un hilo conductor esencial. Durante décadas ha unido universidad, empresa e innovación, actuando como un espacio de encuentro que nos ha permitido compartir conocimiento, anticipar retos y ensanchar horizontes. EXCO no es solo un evento; es una expresión coherente de nuestra manera de entender la edificación como disciplina técnica, científica y social.

Han sido muchos años de trabajo sostenido, de esfuerzo colectivo y de compromiso compartido. Personas y equipos que, edición tras edición, han sabido liderar este proyecto con rigor, entusiasmo y una clara orientación al servicio del sector. En las últimas convocatorias, gracias a la visión estratégica y a la dedicación constante del director de EXCO, el profesor José Ramón Albiol, este encuentro ha alcanzado una proyección internacional incuestionable, con resultados tan sólidos como estimulantes. EXCO 2025 ha vuelto a demostrarlo, superando nuevamente los objetivos marcados, incluso en un contexto complejo e incierto.

La Exposición de Investigación en Edificación constituye, en este sentido, uno de los pilares fundamentales del certamen. La selección, por parte de su comité científico internacional, de 138 pósteres de investigación y 53 comunicaciones científicas confirma la calidad, diversidad y rigor del trabajo presentado, y consolida a EXCO como un referente para la comunidad investigadora en edificación, tanto a nivel nacional como internacional. A ello se suma el alto nivel de las conferencias impartidas, la excelencia de los ponentes invitados y el notable interés de las actividades desarrolladas a lo largo del evento.

Uno de nuestros principales objetivos ha sido reforzar su dimensión internacional. La participación de 63 universidades, que han podido mostrar sus líneas de investigación a través de los pósteres y comunicaciones seleccionados, es una muestra clara de ello. A lo largo del presente año, esta exposición tendrá además carácter itinerante, visitando algunas de estas instituciones internacionales y ampliando así su impacto académico y científico.

Quiero finalizar trasladando, en nombre de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de la Universitat Politècnica de València, nuestro sincero agradecimiento a CEVISAMA por su apoyo continuado a este evento, así como el reconocimiento al profesor José Ramón Albiol Ibáñez y a todo su equipo, cuyo trabajo riguroso y comprometido ha hecho posible una nueva edición de éxito.

Miramos ya hacia EXCO 2026 con la misma convicción que nos ha traído hasta aquí: la de seguir mejorando, creciendo y compartiendo conocimiento. Estoy convencido de que

volverá a superar las expectativas y de que, una vez más, será un punto de encuentro imprescindible para todos los que creemos en la edificación como motor de innovación, progreso y servicio a la sociedad.

FOREWORD

Director of the School of Building Engineering

The year 2025 has held particular significance for the School of Building Engineering of the Universitat Politècnica de València. We have celebrated 53 years of academic trajectory, a period long enough to look back with respect, but above all to reaffirm with conviction the path we intend to continue building towards the future.

Along this journey, EXCO, the Technological Trade Fair for the Construction Sector, has been and continues to be an essential guiding thread. For decades, it has brought together academia, industry and innovation, serving as a meeting point that has enabled us to share knowledge, anticipate challenges and broaden horizons. EXCO is not merely an event; it is a coherent expression of our understanding of building engineering as a technical, scientific and social discipline.

These have been many years of sustained effort, collective dedication and shared commitment. Individuals and teams who, edition after edition, have led this project with rigour, enthusiasm and a clear service-oriented vision for the sector. In recent editions, thanks to the strategic vision and constant dedication of the EXCO Director, Professor José Ramón Albiol, this event has achieved an unquestionable international projection, with results that are both solid and highly encouraging. EXCO 2025 has once again demonstrated this, exceeding the objectives set, even within a complex and uncertain context.

The Building Research Exhibition represents, in this regard, one of the core pillars of the event. The selection by its international scientific committee of 138 research posters and 53 scientific communications confirms the quality, diversity and rigour of the work presented, and consolidates EXCO as a benchmark for the building engineering research community, both nationally and internationally. This is further reinforced by the high standard of the keynote lectures delivered, the excellence of the invited speakers, and the strong level of interest generated by the activities developed throughout the event.

One of our main objectives has been to strengthen its international dimension. The participation of 63 universities, which have been able to showcase their research lines through the selected posters and communications, clearly reflects this commitment. Throughout the present year, this exhibition will also take on an itinerant character, visiting several of these international institutions and thereby expanding its academic and scientific impact.

I would like to conclude by expressing, on behalf of the School of Building Engineering of the Universitat Politècnica de València, our sincere gratitude to CEVISAMA for its continued support of this event, as well as our recognition of Professor José Ramón Albiol

Ibáñez and his entire team, whose rigorous and committed work has made this successful edition possible.

We now look ahead to EXCO 2026 with the same conviction that has brought us this far: the commitment to continuous improvement, growth and the sharing of knowledge. I am confident that it will once again exceed expectations and, once more, serve as an essential meeting point for all those who believe in building engineering as a driver of innovation, progress and service to society.

FOREWORD DIRECTOR EXCO'25

The Faculty of Building Engineering of the UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA - SPAIN, organized on February 24th to 28th, 2025, "The XXXIX Construction Technology Exhibition" EXCO'25 and the International Itinerant Exhibition "Research in Building Engineering" along year, at CEVISAMA - International Fair of Valencia - SPAIN.

Conferences are scheduled in UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA - SPAIN, the speakers are national and international of recognized prestige from Europe, Asia and America. These conferences are aimed at professionals and students of the UPV to broaden their knowledge and experiences.

EXCO'25 promotes the entrepreneurship of the young UPV generations, participation in conferences.

The International Itinerant Research Exhibition EXCO'25 has the collaboration of 63 Universities from America, Europe, Africa, Asia and Oceania. Promoting collaboration between institutions and professors at the international level.

It fosters interdisciplinary collaboration of the professor staff within the UPV with 63 International Universities; It has the participation of 9 departments and 8 research institutes of the UPV in EXCO'25.

The participating entities are:

1. *Universitat Politècnica de València, España.*
2. *Politecnico di Milano, Italia.*
3. *Mimar Sinan Fines Arts University, Istanbul, Turkey.*
4. *Nottingham Business School, England.*
5. *Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania.*
6. *Universidad de Costa Rica*
7. *Università degli Studi di Basilicata, Matera, Italia.*
8. *Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba.*
9. *Università degli Studi Firenze, Italia*
10. *Università di Pavia, Italia.*
11. *Odessa State Academy of Civil Engineering & Architecture, Odessa, Ukraine*
12. *Università di Salerno, Italia.*
13. *Silesian University of Technology, Politechnika Śląska, Gliwice, Poland.*
14. *University of British Columbia, Vancouver, Canada.*
15. *Universidad de Alcalá de Henares, Madrid, España.*
16. *Florida A&M University, Florida, USA.*
17. *Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.*
18. *Universidad de la República (UdelaR) de Uruguay.*
19. *Universidad John F. Kennedy, Argentina.*
20. *Universidad de Castilla-La Macha, España.*
21. *Universidad de Granada, España.*
22. *Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli", Napoli.*
23. *Politecnico di Bari, Italia.*
24. *Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", Italia.*
25. *Hanze University of Applied Sciences, Groningen. Nederland.*
26. *Jade Hochschule Wilhelmshaven/Oldenburg, Germany.*
27. *New York University, Tandon School of Engineering. USA.*
28. *McGill University, Canada*
29. *Nanyang Technological University, Singapore.*
30. *University of New South Wales, Sydney, Australia.*

31. *Università di Pisa, Italia.*
32. *Universidad de Ibagué, Colombia.*
33. *Beijing Yong Shan Media Co., Ltd. Pekin*
34. *Università degli Studi dell'Aquila, Italia.*
35. *Universitat Jaume I, Castellón, España.*
36. *University of Applied Sciences and Arts of Southern Switzerland*
37. *Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement /ETH Zürich*
38. *University North, Varaždin, Croacia*
39. *South Ukrainian National Pedagogical University, Odessa, Ukraine.*
40. *Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Ukraine.*
41. *Universitat de València, Spain.*
42. *Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia*
43. *University of Cape Town, South Africa.*
44. *National University of Singapore.*
45. *TU Delft, The Netherlands.*
46. *Politecnico di Torino, Italy.*
47. *Wuhan University, Wuhan, China.*
48. *University of Oregon, USA.*
49. *City-University of Hong Kong.*
50. *Shenzhen University School of Architecture, Shenzhen, China.*
51. *Hokkaido University, Sapporo, Japan*
52. *Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia.*
53. *Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.*
54. *Universidad Católica de Valencia. España.*
55. *Universidad UTE. Quito. Ecuador.*
56. *Universidad de Napoles Federico II, Napoles, Italy.*
57. *Telematic University Pegaso, Italy.*
58. *University of Guanajuato, México.*
59. *University of La Salle Bajío, México*
60. *Universidad Jesuita de Guadalajara, ITESO, México*
61. *Tecnológico de Monterrey. México.*
62. *MIT Massachusetts Institute of Technology. USA.*
63. *Gdańsk University of Technology, Poland.*

Thank you all for making EXCO possible.

All the best for EXCO'26!

Best Regards

Dr. José R. Albiol-Ibáñez

Vice Dean Digital Transformation, Business Cathedra & Entrepreneurship

Director EXCO'25

ETS Building Engineers - Building 1B

Camino de Vera S/N 46022 Valencia SPAIN

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

CHAPTER 1

ECONOMY

CAPÍTULO 1 ***ECONOMÍA***

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA TECNOLOGÍA SOLAR EN LA JUSTICIA ENERGÉTICA SOSTENIBLE EN EL SUR DE MÉXICO

STATISTICAL ANALYSIS OF SOLAR TECHNOLOGY IN SUSTAINABLE ENERGY JUSTICE IN SOUTHERN MEXICO

Fabiola Colmenero Fonseca
Universidad de La Salle México. Departamento de Arquitectura, Diseño y Comunicación. México Av. Benjamín Franklin 45, Colonia Condesa, Cuauhtémoc, 06140 Ciudad de México, CDMX, México. e-mail: fabiola.colmenero@lasalle.mx /Instituto Universitario de Tecnología de Materiales. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n 46022 (Valencia, España) E-mail: fcolfon@upvnet.upv.es
Universidad de La Salle México. Department of Architecture, Design and Communication Mexico Av. Benjamín Franklin 45, Colonia Condesa, Cuauhtémoc, 06140 Mexico City, CDMX, Mexico. e-mail: fabiola.colmenero@lasalle.mx /University Institute of Materials Technology. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n 46022 (Valencia, Spain) E-mail: fcolfon@upvnet.upv.es

Bruno Guadarrama Rincón
Ingeniero Mecatrónico Universidad La Salle. Av. Benjamín Franklin 45, Colonia Condesa, Cuauhtémoc, 06140 Mexico City, CDMX, Mexico. e-mail: gr@lasallistas.org.mx
Mechatronics Engineering, Universidad La Salle. Av. Benjamín Franklin 45, Colonia Condesa, Cuauhtémoc, 06140 Mexico City, CDMX, Mexico. e-mail: gr@lasallistas.org.mx

Amparo Borrell
Instituto Universitario de Tecnología de Materiales. Universitat Politècnica de València I España I Camino de Vera s/n 46022 (Valencia, Spain) E-mail: aborrell@upv.es
University Institute of Materials Technology. Universitat Politècnica de València I España I Camino de Vera s/n 46022 (Valencia, Spain) E-mail: aborrell@upv.es

Javier Cárcel Carrasco
Instituto Universitario de Tecnología de Materiales. Universitat Politècnica de València I España I Camino de Vera s/n 46022 (Valencia, Spain) E-mail: fracarc1@csa.upv.es
University Institute of Materials Technology. Universitat Politècnica de València I España I Camino de Vera s/n 46022 (Valencia, Spain) E-mail: fracarc1@csa.upv.es

Ramiro Rodríguez Pérez
Investigador Prof. Tecnológico Nacional de México Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán. Departamento de Ciencias de la Tierra Arquitectura. Av. Tecnológico 100, Mpio. de Zapotlán el Grande, Jalisco, México C.P. 49000 México. e-mail / Instituto Universitario de Tecnología de Materiales. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n 46022 (Valencia, España) E-mail: rrodper@doctor.upv.es
Research Prof. Tecnologico Nacional de México ITechnological Institute of Ciudad Guzmán. Department of Earth Sciences Architecture. Av. Tecnológico 100, Mpio. de Zapotlan el Grande, Jalisco, Mexico C.P. 49000 Mexico. E-mail / University Institute of Materials Technology. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n 46022 (Valencia, Spain) E-mail: rrodper@doctor.upv.es

Abstract

Energy poverty affects a high percentage of rural communities in southern Mexico, where despite having high solar radiation, access to clean technologies is still limited. This study focuses on evaluating the statistical impact of solar cells as a solution to mitigate energy poverty, promoting responsible and sustainable consumption. In an analysis of 10 communities, a 25% reduction in energy poverty and a 30% increase in access to basic services were recorded, with a significant correlation ($p<0.01$) between the adoption of solar cells and the increase in the Sustainable Development Index (SDI). The most outstanding results show that communities with solid governance structures achieved 40% more households benefited, in addition to improving development indicators by 15%. This study highlights the importance of integrating solar technologies into a responsible consumption approach, since, by reducing dependence on polluting energy sources, progress is made not only in energy equity but also in the improvement of quality of life, driving positive change in sustainability and social well-being.

Keywords: Energy poverty, Solar cells, Responsible consumption, Statistical analysis, Significant correlation

Introduction

Energy poverty continues to be a significant obstacle to human development in many rural communities, especially in developing countries. In Mexico, and particularly in the south of the country, these regions face a shortage of access to modern energy sources, despite having an abundant resource: solar radiation. (Montero Torres, 2022). This phenomenon generates a series of negative social and economic consequences, such as the perpetuation of inequalities in terms of access to basic services and development opportunities. In contrast, these same regions have abundant solar radiation, a resource that, if used correctly, could become a key solution to alleviate energy poverty. The installation of solar cells adapted to local conditions could not only sustainably provide energy, but also generate significant impacts on socioeconomic indicators, such as access to education, health, and productivity.

This study focuses on the implementation of innovative solar cells as a viable solution to mitigate energy poverty, using a statistical approach to measure their impact on the quality of life and social development of these vulnerable communities. The implementation of adaptive solar technologies is proposed, specially designed to maximize efficiency in areas with high solar radiation and specific energy needs. (Aguay-Saquicaray, 2024). Solar cells, due to their low cost and ease of maintenance, represent a viable, scalable, and suitable solution for these vulnerable communities. This approach not only contributes to reducing energy poverty but also helps to advance the Sustainable Development Goals (SDGs), especially SDG 7, which seeks to ensure access to affordable and clean energy; SDG 10, focused on reducing inequalities; and SDG 13, which promotes climate action. (ONU, 2023b).

Solar technology, adapted to local conditions and coupled with efficient governance, has the potential to transform the living conditions of these marginalized areas. (Gifreu, 2018). Through the application of statistical methods such as linear regression, we seek to identify the causal relationships between the implementation of solar cells and socioeconomic indicators. Linear regression allows us to model the dependence between energy consumption variables and changes in energy poverty, providing us with a quantitative framework to validate these interventions. Likewise, a significant correlation analysis is used to assess how the adoption of solar technology relates to increased access to basic services, such as education and health, which are key factors in sustainable development. (Bhattacharyya, 2012).

The Sustainable Development Index (SDI) is used as a measure to assess the effects of solar technology implementation on different key development indicators, such as school attendance, productivity, and safety. (Anaya-González & Rodríguez-Romero, 2024). This quantitative approach seeks not only to validate the efficacy of solar cells but also to demonstrate that energy justice, combined with technological innovation, can be a powerful tool to achieve sustainable development in rural communities in Mexico.

The objective of this study is to reduce energy poverty in rural communities with high solar radiation through the implementation of innovative solar cells, with an integrative approach that combines local governance, technological adaptation, and ecological principles (see image 1). This project seeks not only to improve access to energy but also to generate a significant impact on the sustainable socio-economic development of these communities, driving positive changes in key indicators such as access to education, increased productivity, and improved quality of life in general.

To quantify the effects of solar cell implementation, advanced statistical methods, particularly linear regression, were used to assess the relationship between solar technology implementation and changes in socioeconomic indicators. The multiple linear regression formula was used, which is suitable for modeling the relationship between a dependent variable (in this case, the energy poverty index) and several independent variables (such as access to basic services, school attendance rates, among others):

$$Y = \beta 0 + \beta 1\, X1 + \beta 2\, X2 + \epsilon$$

Where:

1. Y is the dependent variable (energy poverty).
2. $X1$, $X2$,$\cdots$, Xn, $X1$, $X2$, $\cdots$, Xn are the independent variables (access to energy, school attendance, etc.).
3. $\frac{\beta 0}{beta}$, $0\beta 0$ es la intersección, $\beta 1$, $\beta 2$,$\cdots$, βn are the regression coefficients that measure the impact of each independent variable, and ε is the residual error.

In addition, to confirm the robustness of the results, a correlation analysis was used to determine the existence of significant relationships between local governance variables and the success of the adoption of solar technologies. The significant correlation, with a confidence level of 95% ($p<0.05p < 0.05p<0.05$), allowed us to verify that the implementation of solar technology is more effective in communities with a solid governance structure. (Arboleda Guzmán et al., 2022). The analysis of these data made it possible to calculate the Sustainable Development Index (SDI) before and after implementation, measuring the impacts in the social, economic, and environmental areas.

Cold sintering is an emerging technique in the manufacture of sustainable materials that can significantly complement energy justice analysis using solar technologies. Through this process, the materials used in the construction of solar cells can be optimized to improve their efficiency and reduce production costs. Statistically, the implementation of cold sintering in solar cell manufacturing has shown remarkable results in improving the electrical conductivity and durability of solar panels, allowing for greater efficiency in solar energy conversion. In recent studies, cold sintering has enabled up to a 15% improvement in the efficiency of solar materials, which is crucial for vulnerable communities that need to maximize energy yield with limited resources. (Zhang et al., 2020).

From a statistical perspective, the combination of cold sintering with solar technologies can be modeled using multiple regressions to analyze how material improvements directly affect the performance of solar installations in terms of reducing energy poverty and improving socioeconomic indicators. The data obtained from these analyses reveal that solar panels made from cold-sintered materials have a longer lifespan, which increases the long-term cost-benefit ratio for rural communities. In terms of significant correlation, recent studies have shown a positive relationship ($r=0.88r= 0.88r=0.88$, $p<0.01p < 0.01p<0.01$) between the implementation of cold-sintered solar panels and the improvement in quality of life in areas of high solar radiation. (Besisa & Ewais, 2021).

In conclusion, cold sintering not only improves the technical efficiency of solar cells but also contributes to the economic and environmental viability of solar solutions for energy justice, helping to reduce inequalities and promoting sustainable development.

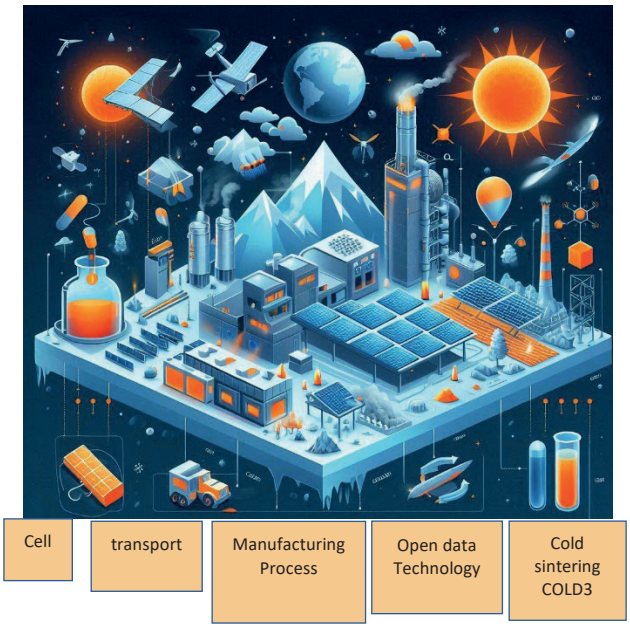


Imagen 1. Información estadística sobre la sinterización en frío para la justicia de la energía solar/ Figure 1: Statistical Insights on Cold Sintering for Solar Energy Justice

Materials

Cold sintering has the potential to transform solar cell manufacturing by reducing the amount of energy needed to process materials, which is particularly beneficial for areas with limited access to modern energy sources. In addition, improving the energy efficiency of solar cells not only increases the amount of electricity generated but can also have a significant impact on the well-being of rural communities, by contributing to the reduction of energy poverty (Zhang et al., 2020).

Deploying solar cells with this technology can offer additional benefits by generating electricity more efficiently and affordably, which is essential for rural areas of southern Mexico, which often lack basic energy infrastructure. Reducing energy poverty could translate into significant improvements in other socioeconomic indicators, such as access to education and health, and an increase in the quality of life of the inhabitants of these communities. (ONU, 2023a).

To evaluate the impact of the implementation of solar cells with cold sintering, a multiple linear regression model will be used. This statistical approach is particularly suitable for assessing how different variables—such as access to energy, schooling, and employment—interact to affect energy poverty. Multiple linear regression will allow for a precise examination of the impact of solar cell deployment, considering multiple factors that could influence access to electricity and other socioeconomic aspects. (Kanagawa & Nakata, 2008).

Through correlation analysis, it will seek to understand the relationships between the adoption of solar technology and sustainable development indicators, such as education, health, and improvement in quality of life. The correlation analysis will provide valuable insights into the effectiveness of solar technology adoption in improving well-being in these rural communities. The results of this study are expected to contribute not only to the reduction of energy poverty but also to the fulfillment of Sustainable Development Goals (SDGs) 7, 10, and 13, which promote access to affordable energy, the reduction of inequalities, and climate action. (ONU, 2023b).

This study seeks to address this problem through the implementation of solar technology, specifically solar cells, to reduce energy poverty and improve key indicators such as schooling, access to basic services, and employment.

The sample selected for this study includes ten rural communities in southern Mexico, characterized by their high solar radiation and poor access to modern energy sources. These characteristics were decisive in the selection since high solar radiation offers a natural resource that can be used for the implementation of solar energy, while the lack of access to modern energy highlights the need for intervention. In addition, priority was given to choosing communities with high illiteracy rates and low schooling, as these conditions are closely related to energy poverty and lack of socioeconomic development.

Table 1 presents some of the socio-educational and electricity access indicators of three of the selected communities.

Localidad/ Locality	Habitantes/ Inhabitants	Analfabetismo (%)/Illiteracy (%)	Escolaridad promedio/ Average schooling	Viviendas con electricidad (%)/Homes with electricity (%)
Amatán Cerro Brujo	110	15.45	2.71	14.29
Fortunata	4	25.00	2.75	0.00
Ranchería Sahueachi	99	47.47	1.79	0.00

3.1 Sample Selection

The study will be carried out in ten rural communities in southern Mexico, selected for their high solar radiation and poor access to modern energy sources. The communities are:

Table 2. Socio-Educational and Energy Access Indicators in Rural Communities in Southern Mexico.

Localidad	Amatán Cerro Brujo	Fortunata	Ranchería Sahueachi	Loma Toro	La Sanguinaria	Arroyo Carrizo	San Miguel Chongos	Loma Cerezal	Loma de Conejo	Santa Cruz Yagavila
Habitantes	110	4	99	51	26	81	521	64	60	608
Población analfabeta	15.45%	25%	47.47%	15.69%	11.54%	37.04%	9.21%	9.38%	1.67%	0.99%
Grado de escolaridad	2.71	2.75	1.79	5.03	4.53	3.2	6.43	6.47	6.11	7.18
Población ocupada laboralmente	26.36%	75%	0.0%	29.41%	26.92%	0.0%	22.26%	18.75%	38.33%	56.91%
Número de viviendas particulares habitadas	21	3	21	14	5	15	119	15	15	179
Viviendas con electricidad	14.29%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	85.71%	86.67%	100.0%	99.44%
Viviendas con radio	14.29%	0.0%	0.0%	28.57%	20.0%	20.0%	52.94%	60.0%	46.67%	53.07%
Viviendas con televisión	0.0%	0.0%	0.0%	14.29%	20.0%	0.0%	19.33%	60.0%	40%	44.69%
Viviendas con refrigerador	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	28.57%	20.0%	40.0%	36.31%
Viviendas con lavadora	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.92%	26.67%	6.67%	10.61%
Viviendas con computadora personal	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.84%	6.67%	0.0%	4.47%
Viviendas con teléfono celular	4.76%	66.67%	0.0%	14.29%	60.0%	0.0%	28.57%	73.33%	53.33%	34.08%
Viviendas con internet	4.76%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	25.21%	6.67%	6.67%	11.17%

3.2 Implementation of Solar Cells

Solar cells will be installed in the selected homes of each community, considering the geographical and climatic particularities of the region. The installation of the solar cells will be carried out by trained technicians, and innovative technology adapted for areas with high radiation will be used.

3.3 Data Collection

Initial data will be collected before the installation of the solar cells, including:

1. Socioeconomic indicators: illiteracy levels, schooling, employment, and access to electricity.
2. Energy data: energy consumption, access to electricity, and efficiency in energy distribution.

4. Métodos Estadísticos

4.1 Regresión Lineal Múltiple

Para evaluar el impacto de las celdas solares en la pobreza energética y los indicadores socioeconómicos, se utilizará una regresión lineal múltiple con la siguiente fórmula:

$$Y = \beta 0 + \beta 1\, X1 + \beta 2\, X2 + \epsilon$$

$X1, X2, \cdots, Xn, X1, X2, \cdots, Xn$

$\frac{\beta 0}{beta}$, $0\beta 0$ es la intersección, $\beta 1, \beta 2, \cdots, \beta n$

$Y = \beta 0 + \beta 1 X1 + \beta 2 X2 + \cdots + \beta n Xn + \epsilon\, Y = /beta\ 0 + /\ beta\ 1\ X1 + /\ beta\ 2X2\ /dots + /beta_n\ X_n + /epsilonY = \beta 0 + \beta 1 X1 + \beta 2 X2 + \cdots + \beta n Xn + \epsilon$

Donde:

- Y es la variable dependiente (pobreza energética).
- $X1, X2, \ldots, XnX_1, X_2, X_nX1, X2, \ldots, Xn$ son las variables independientes (acceso a energía, asistencia escolar, etc.).
- $\beta 0 \backslash beta_0 \beta 0$ es la intersección, y $\beta 1, \ldots \beta n \backslash beta_1, \beta 1, \ldots \beta n$ son los coeficientes de regresión que miden el impacto de cada variable independiente.

4.2 Análisis de Correlación

Se realizará un análisis de correlación para determinar la relación entre la adopción de la tecnología solar y los indicadores de desarrollo sostenible, como el acceso a educación, salud y la mejora en la calidad de vida. Se evaluará la existencia de correlaciones significativas con un nivel de confianza del 95% ($p < 0.05$).

5. Sinterización en Frío en la Fabricación de Celdas Solares

Se incorporará el proceso de sinterización en frío para optimizar la eficiencia de las celdas solares, mejorando su conductividad eléctrica y durabilidad (Zhang et al., 2020). Este proceso es relevante, ya que los materiales optimizados permiten una mayor eficiencia energética y un mejor rendimiento a largo plazo, lo que resulta crucial para las comunidades rurales con recursos limitados.

6. Monitoreo y Evaluación

El monitoreo se realizará durante un período de seis meses, evaluando:

- Desempeño técnico: eficiencia y fiabilidad de las celdas solares.
- Aceptación comunitaria: nivel de satisfacción con el uso de la tecnología solar.
- Reducción de pobreza energética: incremento en el acceso a electricidad y mejoras en la calidad de vida.

7. Resultados Esperados

Se espera que la implementación de celdas solares:

- Reduzca la pobreza energética en las comunidades rurales.
- Mejore indicadores clave como la escolaridad, la ocupación laboral y el acceso a servicios básicos.
- Contribuya al desarrollo sostenible y al cumplimiento de los ODS, especialmente los ODS 7, 10 y 13 (ONU, 2023b).

4. Statistical Methods

4.1 Multiple Linear Regression

To assess the impact of solar cells on energy poverty and socioeconomic indicators, a multiple linear regression will be used with the following formula:

$Y=\beta0+\beta1X1+\beta2X2+\cdots+\beta nXn+\epsilon Y = /beta\ 0 + /\ beta\ 1\ X1 + /\ beta\ 2X2\ /dots + /beta_n\ X_n + /epsilonY=\beta0+\beta1X1+\beta2X2+\cdots+\beta nXn+\epsilon$

Where:

1. Y is the dependent variable (energy poverty).
2. $X1, X2,..., XnX_1, X_2, X_nX1, X2,..., Xn$ are the independent variables (access to energy, school attendance, etc.).
3. $\beta0\backslash beta_0\ \beta0$ is the intersection, and $\beta1,...,\beta n\backslash beta_1, \beta1,...,\beta n$ are the regression coefficients that measure the impact of each independent variable.

4.2 Correlation Analysis

A correlation analysis will be conducted to determine the relationship between the adoption of solar technology and sustainable development indicators, such as access to education, health, and improved quality of life. The existence of significant correlations with a confidence level of 95% ($p < 0.05$) will be evaluated.

5. Cold Sintering in Solar Cell Manufacturing

The cold sintering process will be incorporated to optimize the efficiency of solar cells, improving their electrical conductivity and durability. (Zhang et al., 2020). This process is relevant, as optimized materials allow for greater energy efficiency and better long-term performance, which is crucial for rural communities with limited resources.

6. Monitoring and Evaluation

The monitoring will be carried out over six months, evaluating:

Technical performance: efficiency and reliability of solar cells.

Community acceptance: level of satisfaction with the use of solar technology.

Reduction of energy poverty: increase in access to electricity and improvements in quality of life.

7. Expected Results

The implementation of solar cells is expected to:

Reduce energy poverty in rural communities.

Improve key indicators such as schooling, employment, and access to basic services.

Contribute to sustainable development and the fulfillment of the SDGs, especially SDGs 7, 10 and 13 (ONU, 2023b).

Results:

A continuación, se presentan una serie de gráficos que ilustran el análisis estadístico realizado sobre el impacto de las celdas solares en la pobreza energética, utilizando una regresión lineal múltiple (ver gráfico 1). Estos gráficos permiten visualizar la relación entre diversas variables socioeconómicas y la pobreza energética en comunidades rurales. En primer lugar, se analiza el impacto del acceso a la energía, destacando su papel en la reducción de la pobreza energética, especialmente en zonas con acceso limitado a servicios básicos. Además, se evalúa cómo la educación influye en la adopción y mantenimiento de tecnologías solares, y cómo los indicadores de salud, al mejorar las condiciones sanitarias, favorecen un entorno propicio para el uso de energías renovables. Finalmente, se presentan los coeficientes de la regresión para cada una de las variables independientes, lo que permite determinar el peso específico de factores como el acceso a la energía, la educación y la salud en la disminución de la pobreza energética. Este análisis, respaldado por la regresión lineal y el análisis de correlación, proporciona información valiosa sobre cómo la integración de tecnologías solares puede contribuir al desarrollo sostenible y a la mejora de las condiciones de vida en comunidades vulnerables.

Below is a series of graphs illustrating the statistical analysis carried out on the impact of solar cells on energy poverty, using a multiple linear regression (see graph 1). These graphs allow us to visualize the relationship between various socioeconomic variables and energy poverty in rural communities. First, the impact of access to energy is analyzed, highlighting its role in reducing energy poverty, especially in areas with limited access to basic services. In addition, it evaluates how education influences the adoption and maintenance of solar technologies, and how health indicators, by improving sanitary conditions, favor an environment conducive to the use of renewable energies. Finally, the regression coefficients for each of the independent variables are presented, which allows for determining the specific weight of factors such as access to energy, education, and health in the reduction of energy poverty. This analysis, supported by linear regression and correlation analysis, provides valuable insights into how the integration of solar technologies can contribute to sustainable development and improved living conditions in vulnerable communities.

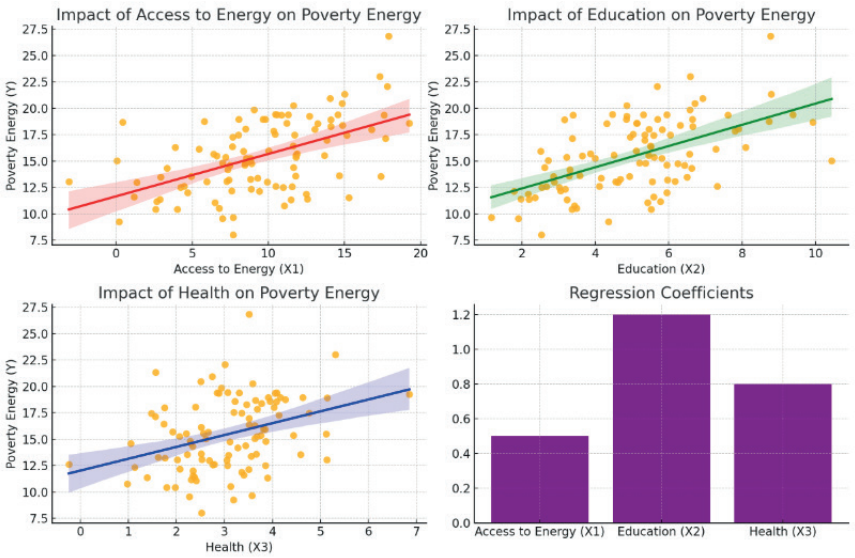


Gráfico 1. Análisis del Impacto de Factores Socioeconómicos en la Reducción de la Pobreza Energética a través de la Adopción de Celdas Solares/Figure 1. Analysis of the Impact of Socioeconomic Factors on Energy Poverty Reduction through Solar Cell Adoption

Aquí se presentan varios gráficos para ilustrar el análisis de los datos sobre el impacto de las celdas solares en la pobreza energética, basados en una regresión lineal múltiple:

1. **Impacto del Acceso a la Energía sobre la Pobreza Energética**: Se observa cómo el acceso a la energía influye directamente en la reducción de la pobreza energética, lo que puede ser clave en comunidades rurales donde el acceso a servicios energéticos es limitado.
2. **Impacto de la Educación sobre la Pobreza Energética**: La educación también juega un papel importante, mejorando la capacidad de las comunidades para adoptar y mantener tecnologías como las celdas solares.
3. **Impacto de la Salud sobre la Pobreza Energética**: Los indicadores de salud reflejan una relación con la pobreza energética, pues la mejora en las condiciones sanitarias puede facilitar un entorno más adecuado para el uso de tecnologías sostenibles.
4. **Coeficientes de la Regresión**: Los coeficientes mostrados para las variables independientes (Acceso a la Energía, Educación y Salud) revelan el peso de cada factor en la reducción de la pobreza energética.

Este análisis estadístico, complementado con la técnica de regresión y la correlación, ayudará a identificar cómo la adopción de tecnologías solares puede mejorar diversos indicadores socioeconómicos y contribuir al desarrollo sostenible.

Here are several graphs to illustrate the analysis of data on the impact of solar cells on energy poverty, based on a multiple linear regression:

1. **Impact of Energy Access on Energy Poverty**: It is observed how access to energy directly influences the reduction of energy poverty, which can be key in rural communities where access to energy services is limited.
2. **Impact of Education on Energy Poverty**: Education also plays an important role, in improving the ability of communities to adopt and maintain technologies such as solar cells.
3. **Impact of Health on Energy Poverty**: Health indicators reflect a relationship with energy poverty, as improved health conditions can facilitate a more suitable environment for the use of sustainable technologies.
4. **Regression Coefficients**: The coefficients shown for the independent variables (Energy Access, Education, and Health) reveal the weight of each factor in reducing energy poverty.

This statistical analysis, complemented by the regression technique and correlation, will help identify how the adoption of solar technologies can improve various socio-economic indicators and contribute to sustainable development.

Conclusiones:

La implementación de celdas solares con la tecnología de sinterización en frío tiene el potencial de transformar la fabricación y uso de energías renovables, especialmente en áreas rurales con acceso limitado a fuentes de energía modernas. Al reducir la cantidad de energía necesaria para el procesamiento de los materiales, esta tecnología contribuye a hacer la energía solar más accesible y eficiente, lo que resulta particularmente beneficioso para las comunidades rurales del sur de México. Además, la mejora en la eficiencia energética de las celdas solares no solo aumenta la cantidad de electricidad generada, sino que también tiene un impacto directo en la reducción de la pobreza energética, lo cual es crucial para mejorar la calidad de vida en estas áreas.

Los resultados de la regresión lineal múltiple y el análisis de correlación muestran que factores como el acceso a la energía, la educación y la salud tienen un impacto significativo en la pobreza energética. La adopción de tecnologías solares no solo mejora el acceso a electricidad, sino que también favorece el bienestar general de las comunidades al facilitar el acceso a servicios básicos, incrementar las oportunidades educativas y generar empleo, contribuyendo al desarrollo sostenible. Este enfoque integrado puede ser un paso clave hacia el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente el ODS 7, que promueve el acceso a energía asequible y limpia, el ODS 10, que aborda la reducción de desigualdades, y el ODS 13, que fomenta la acción por el clima.

El estudio y su implementación en las comunidades seleccionadas no solo proporcionan una solución viable para combatir la pobreza energética, sino que también destacan el papel crucial de las energías renovables en la mejora de los indicadores socioeconómicos y en la promoción de un futuro más equitativo y sostenible para las zonas rurales de México.

The implementation of solar cells with cold sintering technology has the potential to transform the manufacture and use of renewable energy, especially in rural areas with limited access to modern energy sources. By reducing the amount of energy needed to process materials, this technology contributes to making solar energy more accessible and efficient, which is particularly beneficial for rural communities in southern Mexico. In addition, improving the energy efficiency of solar cells not only increases the amount of electricity generated but also has a direct impact on reducing energy poverty, which is crucial for improving the quality of life in these areas.

The results of the multiple linear regression and correlation analysis show that factors such as access to energy, education, and health have a significant impact on energy poverty. The adoption of solar technologies not only improves access to electricity but also favors the general well-being of communities by facilitating access to basic services, increasing educational opportunities, and generating employment, contributing to sustainable development. This integrated approach can be a key step towards meeting the Sustainable Development Goals (SDGs), specifically SDG 7, which promotes access to affordable and clean energy, SDG 10, which addresses the reduction of inequalities, and SDG 13, which encourages climate action.

The study and its implementation in the selected communities not only provide a viable solution to combat energy poverty but also highlight the crucial role of renewable energy in improving socio-economic indicators and promoting a more equitable and sustainable future for rural Mexico.

Agradecimientos: Los autores agradecen a la Universidad de la La Salle México por la realización de este trabajo experimental, los fondos de los materiales para la realización provienen del Proyecto Cold3E (CNS2023-144190), financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea "NextGenerationEU"/PRTR)

Contribuciones de los autores: Fabiola Colmenero y Amparo Borrell desarrollaron la metodología junto con la preparación de la conceptualización y curación de datos; Ramiro Rodríguez, Fabiola Colmenero y Bruno Guadarrama recopilaron y analizaron los datos. Fabiola Colmenero y Amparo Borrell realizaron la parte de revisión y edición; Amparo Borrell se encargó de la adquisición de fondos; Fabiola Colmenero, Amparo Borrell, Javier Cárcel y Ramiro Rodríguez, escribieron el artículo. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

Aguay-Saquicaray, D. C. (2024). Evaluación de la eficiencia energética de sistemas de energía solar fotovoltaica en diferentes condiciones climáticas. *MQRInvestigar*, *8*(3), 4993–5016. https://doi.org/10.56048/MQR20225.8.3.2024.4993-5016

Anaya-González, G. S., & Rodríguez-Romero, J. (2024). Tres generaciones de celdas solares: Alternativas para un mundo más sustentable. *Tendencias En Energías Renovables y Sustentabilidad*, *3*(1), 65–69. https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.195

Arboleda Guzmán, E., España Guzmán, L., & Gómez Londoño, L. (2022). *Energía social y transición energética en Colombia. De las prácticas sociales a la gobernanza energética.* (J. Posada F., H. Leal Rodríguez, & M. C. Londoño Marín, Eds.). Universidad Nacional de Colombia.

Besisa, D. H. A., & Ewais, E. M. M. (2021). Black zirconia composites with enhanced thermal, optical, and mechanical performance for solar energy applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *225*, 111063. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111063

Bhattacharyya, S. C. (2012). Energy access programs and sustainable development: A critical review and analysis. *Energy for Sustainable Development*, *16*(3), 260–271. https://doi.org/10.1016/j.esd.2012.05.002

Gifreu, J. (2018). Ciudades Adaptativas y Resilientes ante el Cambio Climático: Estrategias Locales para Contrinuir a la Sostenibilidad Urbana. In *Zaragoza* (Vol. 52). https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/

Kanagawa, M., & Nakata, T. (2008). Assessment of access to electricity and the socio-economic impacts in rural areas of developing countries. *Energy Policy*, *36*(6), 2016–2029. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.01.041

Montero Torres, J. (2022). Relación de la radiación solar con la producción de plantas: agroproductivas. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, *9*(1), 52–66. https://doi.org/10.53287/oqym7033yy88k

ONU. (2023a). *PNUD*.

ONU. (2023b, May 31). *Objetivos para el Desarrollo Sostenible*. La Agenda Para El Desarrollo Sostenible. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/#:~:text=La%20pr%C3%B3xima%20Cumbre%20sobre%20los,el%20progreso%20hacia%20los%20ODS.

Zhang, X., Zabihi, F., Xiong, H., Eslamian, M., Hou, C., Zhu, M., Wang, H., & Zhang, Q. (2020). Highly efficient flexible perovskite solar cells made via ultrasonic vibration assisted room temperature cold sintering. *Chemical Engineering Journal*, *394*, 124887. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124887

SISTEMAS DE GESTIÓN DE EDIFICIOS, UN AVANCE MÁS EN LA EFICIENCIA DE LOS EDIFICIOS

BUILDING MANAGEMENT SYSTEMS (BMS), A FURTHER ADVANCE IN BUILDINGS' EFFICIENCY

Joaquín Fuentes-del-Burgo
Departamento de Ingeniería Civil y de la Edificación. Escuela Politécnica de Cuenca. Universidad de Castilla-La Mancha. Campus Universitario S/N, 16071 Cuenca, España. Profesor Titular de Universidad, Doctor por la UPV. E-mail: joaquin.fuentes@uclm.es
Department of Civil and Building Engineering. Polytechnic School of Cuenca. Universidad de Castilla-La Mancha. Campus Universitario S/N, 16071 Cuenca, Spain. Senior Lecturer. Phd in Business Organization at UPV. E-mail: joaquin.fuentes@uclm.es

Elena Navarro-Astor
Departamento de Organización de Empresas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. Universitat Politècnica de València (UPV). Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Profesora Titular de Universidad. Doctora en Organización de Empresas por la UPV. E-mail: enavarro@omp.upv.es
Department of Business Organization. School of Building Engineering. Universitat Politècnica de València. Senior Lecturer. Phd in Business Organization at UPV.

Abstract

The new European directives require, among their measures, the application of management systems that improve the energy efficiency of buildings, reducing their environmental impact throughout their life cycle. These directives and their transposition into national regulations and standards include the use of automation and control systems for installations. Building Management Systems (BMS) are a possible solution to these new conditions.

After conducting a literature review on these systems, this paper presents different definitions, describes their main characteristics, identifies the fields of application, as well as their benefits and the existing barriers to their implementation. It is highlighted that its application implies an increase in energy efficiency, a reduction in operation and maintenance costs, as well as an improvement in aspects such as safety, comfort and management of the operation of buildings.

Keywords

Building Automation and Control System (BACS), Building Efficiency, Building Management System (BMS), Energy Efficiency.

Introducción

Los edificios utilizan diariamente varios servicios energéticos para garantizar la comodidad y la seguridad de sus residentes. Se estima que los edificios suponen las tres cuartas partes de todas las emisiones de gases de efecto invernadero de las ciudades (Tatari 2022). Además, en la literatura se recoge que alrededor del 40% del coste mundial de energía se asocia al funcionamiento de los edificios (Yin 2010). Analizando el propio edificio, las instalaciones constituyen los mayores consumidores de energía, incluyendo los sistemas de climatización (HVAC – *Heating, Ventilation and Air Conditioning*) que suponen más del 40% del consumo (Yin 2010; Teraoka 2014).

Los edificios modernos son entidades complejas formadas por numerosos subsistemas que incluyen, entre otros, la iluminación, las cargas eléctricas, la protección contra incendios, la seguridad y las instalaciones de ventilación y climatización, etc. Con una gestión efectiva se puede controlar el impacto en el consumo energético de la edificación (Teraoka 2014). Tratando de mejorar la competitividad, los propietarios, diseñadores y desarrolladores de edificios se centran en entregarlos funcionalmente eficientes, para que satisfagan los requisitos de los usuarios incorporando innovaciones tecnológicas que aumenten su eficiencia operativa, mejorando su rendimiento y reduciendo sus costos operativos (Ogolla 2022).

Por otro lado, con objeto de mejorar la sostenibilidad del planeta, las naciones están intentando ahorrar energía, proponiendo medidas que reduzcan el impacto de un consumo excesivo. En ese sentido, la Unión Europea ha venido publicado directivas de eficiencia energética en edificios (Aguilar 2019) y, entre las estrategias que se proponen, se encuentra la implantación los sistemas de automatización y control de edificios (Unión Europea 2023).

Por su parte, en España el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) recoge en sus instrucciones técnicas la implantación de sistemas de automatización y control de instalaciones, cuando sea técnica y económicamente viable, en edificios no residenciales con una potencia nominal útil para instalaciones de HVAC de más de 290 kW. Además, incluye la posibilidad de aplicarlos en edificios residenciales (Ministerio de la Presidencia 2022).

Por tanto, considerando las razones medioambientales, económicas y legislativas señaladas, existe la necesidad de reducir la energía consumida en los edificios (Tatari 2022). Entre los avances tecnológicos disponibles que facilitan la gestión de propiedades y que pueden ayudar a reducir dicho consumo energético se encuentra los Sistemas de Gestión de Edificios (*Building Management Systems* - BMS) o los Sistemas de Automatización y Control de Edificios (*Building Automation and Control Systems* - BACS) (Ogolla 2022).

Tras la realización de una revisión bibliográfica, en este trabajo se presentan algunas definiciones de BMS y se describen varias de sus características.

Sistema de gestión de edificios (BMS)

En la literatura se encuentran diferentes definiciones del término BMS con pequeñas diferencias. Para Ogolla (2022) un BMS es una combinación de sistemas instalados en un edificio para garantizar la facilidad de gestión y supervisión de sus componentes e instalaciones. Para Tatari (2022) se trata de un sistema de control que supervisa y controla los servicios mecánicos y eléctricos del edificio. En otras definiciones se amplía el concepto especificando que se trata de un sistema de control basado en ordenador para regular y supervisar los equipos mecánicos (como HVAC), los sistemas eléctricos del edificio (como la iluminación), incluyendo también los sistemas de seguridad y de protección contra incendios (Al-Mahdawi 2022; Meng 2023; Fahmy 2024).

El sistema consta de software y hardware que se ejecutan en estaciones de trabajo informáticas y se comunican con dispositivos mediante protocolos específicos (Fahmy DAE 2024). Finalmente, según la Directiva UE 2024/1275 (Unión Europea 2023, p. 15), los sistemas de automatización y control de edificios incluyen "todos los productos, programas informáticos y servicios de ingeniería que puedan apoyar el funcionamiento eficiente energéticamente, económico y seguro de las instalaciones técnicas del edificio mediante controles automatizados y facilitando la gestión manual de dichas instalaciones técnicas del edificio".

Introduction

Buildings use various energy services on a daily basis to ensure the comfort and safety of their residents. Estimates suggest that buildings account for three quarters of all greenhouse gas emissions in cities (Tatari 2022). In addition, the literature reports that around 40% of global energy costs are associated with the operation of buildings (Yin 2010). In the analysis of the building itself, the largest energy consumers are the facilities that constitute the largest energy consumers, including HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) systems, which account for more than 40% of the consumption (Yin 2010; Teraoka 2014).

Modern buildings are complex entities consisting of numerous subsystems including, among others, lighting, electrical loads, fire protection, security, ventilation and air-conditioning systems, etc. By effectively managing them, the impact on the building's energy consumption can be controlled (Teraoka 2014). Aiming to improve competitiveness, building owners, designers and developers focus on delivering functionally efficient buildings to meet user requirements by incorporating technological innovations that increase their operational efficiency, improve their performance and reduce their operating costs (Ogolla 2022).

On the other hand, in order to improve the sustainability of the planet, nations are trying to save energy by proposing measures to reduce the impact of excessive consumption. In this sense, the European Union has been publishing directives on energy efficiency in buildings (Aguilar 2019) and, among the strategies proposed, is the implementation of building automation and control systems (European Union 2023).

In Spain, the Spanish Regulation on Thermal Installations in Buildings (RITE) includes in its technical instructions the implementation of automation and control systems for installations, when technically and economically feasible, in non-residential buildings with a nominal effective output of HVAC facilities of more than 290 kW. Furthermore, it also includes the possibility of applying them in residential buildings (Ministry of the Presidency 2022).

Therefore, considering the environmental, economic and legislative reasons outlined above, there is a need to reduce the energy consumed by buildings (Tatari 2022). Among the available technological developments that facilitate property management and can help reduce such energy consumption are Building Management Systems (BMS) or Building Automation and Control Systems (BACS) (Ogolla 2022).

Following a literature review, this paper presents some BMS definitions and describes some of their characteristics.

Building Management Systems (BMS)

Different definitions of the term BMS are found in the literature with slight differences. For Ogolla (2022) it is a combination of systems installed in a building to ensure ease of management and monitoring of its components and installations. For Tatari (2022) it is a control system that monitors and controls the mechanical and electrical services of the building. Other definitions expand the concept by specifying that it is a computer-based control system to regulate and monitor mechanical equipment (such as HVAC), building electrical systems (such as lighting), including also security and fire protection systems (Al-Mahdawi 2022; Meng 2023; Fahmy 2024).

The system consists of software and hardware running on computer workstations and communicating with devices via specific protocols (Fahmy 2024). Finally, according to EU Directive 2024/1275 (European Union 2023, p. 15), building automation and control systems include 'all products, software and engineering services that can support the energy-efficient, economical and safe operation of technical building installations by automated controls and by facilitating the manual management of these technical building installations'. In turn, the UNE-EN ISO 52120-1 standard (AENOR 2022) establishes a similar definition to that of the EU Directive 2024/1275, although it emphasises human management and intervention and establishes that a BMS is the same as a BACS.

The use of a BMS not only provides automatic control and monitoring of mechanical and electrical services, but it contributes to improving the comfort and energy efficiency of the whole building (Yin 2010; Balaji 2016).

A su vez, la norma UNE-EN ISO 52120-1 (AENOR 2022) establece una definición similar a la de la Directiva UE 2024/1275, aunque remarca la gestión e intervención humana y establece que un BMS es igual que un BACS.

El uso de un sistema de gestión de edificios no solo proporciona un control y una supervisión automáticos de los servicios mecánicos y eléctricos, sino que también contribuye a mejorar la comodidad y la eficiencia energética de todo el edificio (Yin 2010; Balaji 2016). Empleando un BMS se minimiza el consumo de energía y maximiza el confort interior, pudiendo ahorrar, según la literatura, entre un 10% y un 27% de los costes de energía en comparación con un edificio sin BMS (Yin 2010; Aguilar 2019). Además, este tipo de sistemas permiten recopilar datos en tiempo real (como temperatura, CO_2, humedad, etc.), mediante sensores cableados e inalámbricos, que facilitan la gestión del rendimiento del edificio, y también proporcionan los datos para la evaluación y ratificación de un modelo tridimensional en BIM (Yin 2010; Meng 2023). Esto facilita la creación y el mantenimiento del gemelo digital del edificio que recoge la Directiva UE 2024/1275 (Unión Europea 2023), lo que permitiría conocer en tiempo real del estado y del comportamiento de la edificación.

Además, el BMS, como herramienta de gestión de inmuebles, tiene como objetivo garantizar la eficiencia puesto que permiten la transmisión rápida de información sobre el funcionamiento de los componentes de los edificios, asegurando así una pronta reparación y acción por parte del administrador de la propiedad (Ogolla 2022).

Estos sistemas también pueden utilizarse para conseguir otros objetivos como mejorar el confort a los usuarios del edificio, garantizar la seguridad de los ocupantes, facilitar y reducir los costos de mantenimiento y reparación, mejorar la administración y distribución de los servicios, proveer de información para la gestión y la toma de decisiones y garantizar un desempeño adecuado de la gestión de los edificios (Aguilar 2019; Al-Mahdawi 2022; Ogolla 2022; Tatari 2022).

Características básicas

Un sistema BMS puede comenzar con una sola estación remota, unos sensores y unos actuadores, aunque se puede ampliar en cualquier momento añadiendo más estaciones remotas y conectándolas mediante una red de comunicación sencilla (Ogolla 2022).

El proceso de control consta de tres pasos: primero, medir los datos, luego procesarlos con otra información y, finalmente, activar la acción de control. Esto implica un circuito de control formado por tres componentes principales: un sensor, un controlador y un dispositivo controlado (Imagen 1). Estos tres componentes trabajan juntos para regular y controlar el entorno (Fahmy 2024).

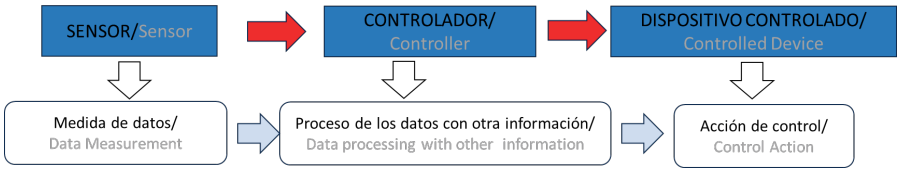


Imagen 1. Funcionamiento del sistema de gestión de edificios (Fuente: Elaboración propia a partir de Fahmy 2024).
Image 1. BMS operation (Source: Own elaboration based on Fahmy 2024).

En general, el término BMS cubre todos los elementos de control, incluidos el hardware, los controladores, cualquier red de enlace y los controladores centrales. Además, un BMS consta de tres niveles (Imagen 2).

El Nivel 3 de la capa de campo, donde los controladores reciben un estímulo único y responden a partir de sensores, interruptores, etc. El Nivel 2 de capa de automatización donde se ejecuta la automatización y la comunicación. Cuando esta capa obtiene datos de la capa de campo, los transmite a una interfaz (navegador web) que forma el Nivel 1 de gestión, que puede mostrar toda la información (Yin 2010).

Las tecnologías de adquisición, almacenamiento, análisis y visualización de datos se combinan para ofrecer servicios de alta calidad, seguros y rentables a los responsables del edificio (Fahmy 2024).

La tecnología permite a los administradores de las propiedades monitorear el entorno externo e interno de la edificación a través de un sistema de sensores y actuadores coordinados ubicados en lugares estratégicos. La información se transmite a través de un monitor de ordenador en la oficina del

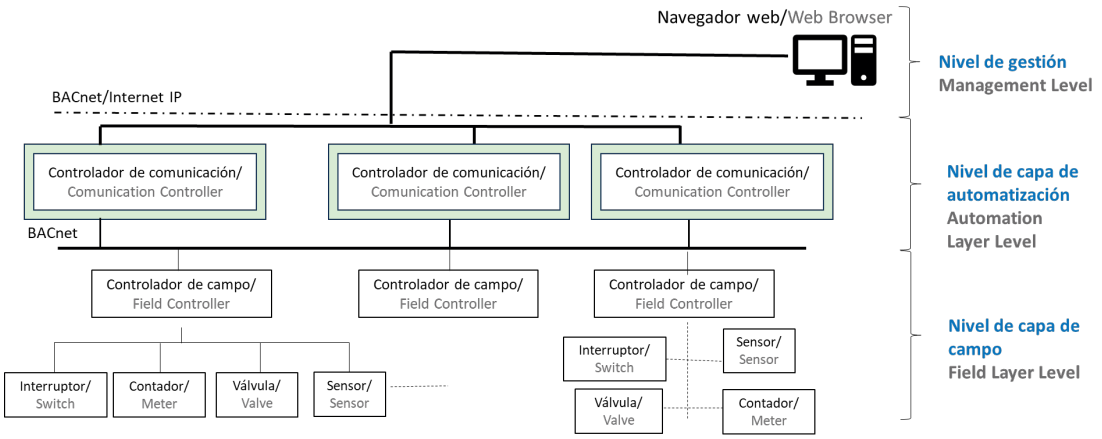


Imagen 2. Estructura básica de un BMS (Fuente: Elaboración propia a partir de Yin 2010).
Image 2. BMS basic structure (Source: Own elaboration based on Yin 2010).

According to the literature, BMS uses minimises energy consumption and maximises indoor comfort and can save, between 10% and 27% of energy costs compared to a building without a BMS (Yin 2010; Aguilar 2019). In addition, such systems allow real-time data collection (such as temperature, CO_2, humidity, etc.) through wired and wireless sensors, which facilitates building performance management, and provides data for the evaluation and ratification of a three-dimensional model in BIM (Yin 2010; Meng 2023). This facilitates the creation and maintenance of the building digital twin as required by EU Directive 2024/1275 (European Union 2023), allowing real-time knowledge of the building's condition and performance.

In addition, the BMS, as a property management tool, aims to ensure efficiency by enabling the rapid transmission of information on the performance of building components, thus ensuring prompt repair and action by the property manager (Ogolla 2022).

These systems can also be used to achieve other objectives such as improving comfort for building users, ensuring occupant safety, facilitating and reducing maintenance and repair costs, improving the administration and distribution of services, providing information for management and decision-making, and ensuring adequate building management performance (Aguilar 2019; Al-Mahdawi 2022; Ogolla 2022; Tatari 2022).

Basic characteristics

A BMS system may start with a single remote station, sensors and actuators, but it can be expanded at any time by adding more remote stations and connecting them via a simple communication network (Ogolla 2022).

The control process consists of three steps: first, measuring the data, then processing it with other information, and finally triggering the control action. This involves a control circuit consisting of three main components: a sensor, a controller and a controlled device (Image 1). These three components work together to regulate and control the environment (Fahmy 2024).

In general, the term BMS covers all control elements, including hardware, controllers, any network links and central controllers. In addition, a BMS consists of three levels (Image 2). Field layer Level 3, where controllers receive a single stimulus and respond from sensors, switches, etc. Level 2 automation layer where automation and communication is executed. When this layer obtains data from the field layer, it transmits them to an interface (web browser) that forms Management Level 1, which can display all information (Yin 2010).

Data acquisition, storage, analysis and visualisation technologies combine to deliver high quality, secure and cost-effective services to building managers (Fahmy 2024). The technology allows property managers to monitor the external and internal environment of the building through a system of coordinated sensors and actuators placed in strategic locations. The information is transmitted through a computer monitor in the manager's office, reducing the need for interaction between humans and the building to monitor its operation (Ogolla 2022). Thus, BMSs enable the maintenance department to automatically monitor and control a wide range of services (Hassanain 2017).

administrador, lo que reduce la necesidad de interacción entre humanos y el edificio para monitorear su funcionamiento (Ogolla 2022). Así, los BMS permiten que el departamento de mantenimiento pueda monitorear y controlar automáticamente un amplio espectro de servicios (Hassanain 2017).

Componentes de un BMS

Un BMS está constituido por un conjunto de componentes de software y hardware. Los componentes se distribuyen en cada uno de los niveles indicados en la Imagen 2. El hardware está formado por sensores, controladores y actuadores. En el Nivel 1 de gestión se encuentra la estación central, conectada con los controladores, también llamados estaciones remotas. La estación central tiene una interfaz con las estaciones remotas que permite realizar algunas funciones de control sobre ellas, dependiendo de los requisitos del cliente (por ejemplo, ahorro de energía, seguridad, etc.) (Aguilar 2019; Ogolla 2022).

Existen varias plataformas de software disponibles para el control y la supervisión energética en edificios comerciales y residenciales. Estas plataformas permiten a los administradores o propietarios del edificio acceder, comprender y utilizar todos los datos que se pueden recopilar a partir del BMS (Jamil 2017).

En el Nivel 2 de proceso, el controlador procesa los datos del sensor, aplica la lógica de control implementada y genera una acción de salida. Los controladores forman el elemento principal del BMS (Ogolla 2022; Fahmy 2024), estando dotados de cierta inteligencia y autonomía.

En el Nivel 3 (Imagen 3), los sensores son los elementos periféricos que recogen datos sobre las condiciones existentes en el edificio de una forma precisa y repetible. Se puede acceder a ellos a través de entradas digitales (informan si un dispositivo está encendido o apagado), entradas analógicas (proporcionan datos sobre variables como la temperatura, la humedad, etc.), o entradas de pulsos (proporcionan datos sobre nivel de consumo) (Ogolla 2022; Fahmy 2024).

En este nivel también se encuentran los actuadores que ejecutan diversas acciones en el sistema y realizan funciones de control a través de salidas digitales y analógicas. Las salidas digitales controlan dispositivos que tienen dos estados, por ejemplo, encender o apagar equipos. Las salidas analógicas pueden ajustar con precisión los dispositivos a determinadas posiciones, como atenuar la luz. La monitorización y el ajuste de estas acciones son posibles gracias a la conexión de la interfaz de usuario y los controladores (Ogolla 2022). La integración de todos los componentes se consigue con una red troncal que enlaza los elementos de los diferentes niveles (Imagen 4) (Wang 2010).

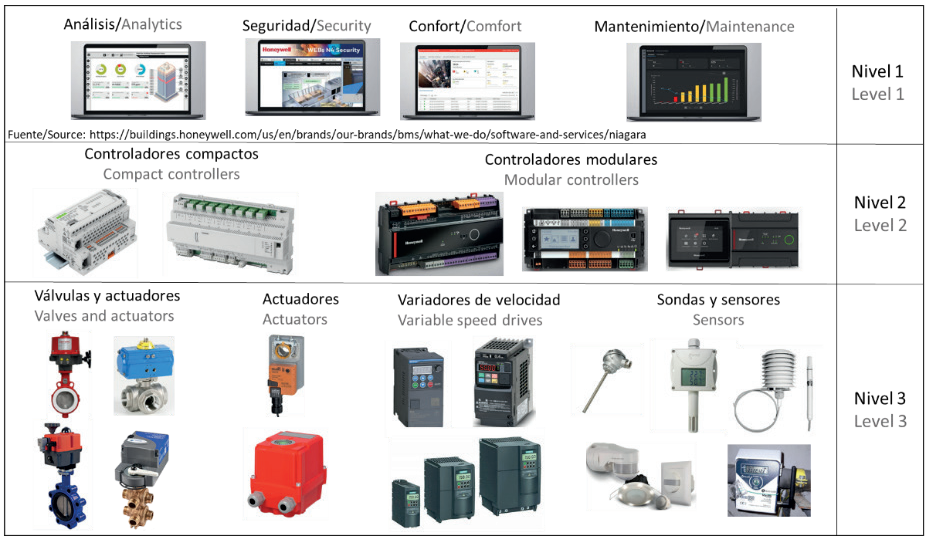


Imagen 3. Componentes de los diferentes niveles de un BMS (Fuente: Elaboración propia).
Image 3. Components of the different levels of a BMS (Source: Own elaboration).

En los últimos años se ha producido un aumento del número de sensores basados en el Internet de las Cosas (*Internet of Things* – IoT) y en el empleo de las comunicaciones inalámbricas, lo que facilita la utilización de equipos sin necesidad del cableado, situación que también permite desarrollar estrategias de actuación en la rehabilitación de edificios y sus instalaciones (Minoli 2017; Aguilar 2019; Zhan 2021; Ramalingam 2022).

BMS components

A BMS consists of a set of software and hardware components. The components are distributed in each of the levels shown in Image 2. The hardware consists of sensors, controllers and actuators. Management Level 1 is the central station, which is connected to the controllers, also called remote stations. The central station has an interface with the remote stations that allows some control functions to be performed on them, depending on the customer's requirements (e.g. energy saving, security, etc.) (Aguilar 2019; Ogolla 2022).

There are several software platforms available for building energy monitoring and control that These platforms allow building managers or owners to access, understand and use all the data that can be collected from the BMS (Jamil 2017).

In Level 2 processing, the controller processes the sensor data, applies the implemented control logic and generates an output action. Controllers form the core element of the BMS and are endowed with some intelligence and autonomy (Ogolla 2022; Fahmy 2024).

At Level 3 (Image 3), sensors are the peripheral elements that collect data on building conditions in an accurate and repeatable way. They can be accessed through digital inputs (reporting whether a device is on or off), analogue inputs (providing data on variables such as temperature, humidity, etc.), or pulse inputs (providing consumption level data) (Ogolla 2022; Fahmy 2024). This level also includes actuators that perform various actions in the system and carry out control functions via digital and analogue outputs. Digital outputs control devices that have two states, e.g. switching equipment on or off. Analogue outputs can fine-tune devices to certain positions, such as dimming the light. Monitoring and adjustment of these actions is possible through the connection of the user interface and controllers (Ogolla 2022). The integration of all components is achieved with a central network linking the elements of the different levels (Image 4) (Wang 2010).

In recent years there has been an increase in the number of sensors based on the Internet of Things (IoT) and in the use of wireless communications, which facilitates the use of equipment without wiring, a situation that also enables the development of strategies for action in the rehabilitation of buildings and their installations (Minoli 2017; Aguilar 2019; Zhan 2021; Ramalingam 2022).

Communication standards

The different technologies employed in the BMS have operated independently, generating different communication standards or 'protocols' in each field (Al-Mahdawi 2022). The interconnection of the network is heterogeneous and the different elements must communicate through gateways (Ramalingam 2022). Thus, different communication protocols may be found in a BMS, even between products from the same company. A popular way of integrating products from various protocols has been to use a gateway to convert one protocol into another, mapping data points from one protocol to another (Wang 2010) (Image 4).

There are many different protocols, standards and programmes available in the market covering different installations or applications (HVAC, lighting, security, etc.), such as Profibus, XML, DALI, ModBus, BACnet and KNX (Fahmy 2024). In the case of wireless data transmission, protocols such as NarrowBand, Zwave, EnOcean, Wi-Fi, Bluetooth, Zig-Bee, LoRa and Sigfox appear (Jamil 2017; Al-Mahdawi 2022; Ramalingam 2022; Tatari 2022). Compatibility remains a drawback as each vendor uses its own common protocol extensions (Wang 2010; Balaji 2016), although interoperability through application programming interfaces has advanced considerably (Wang 2010).

BMS benefits and barriers

Among their benefits are that they enable uniform and effective control, monitoring and management of all equipment functions, facilitating maintenance and management operations, and improving building performance (Hassanain 2017; Fahmy 2024). They also increase reliability rates of facilities and services, reduce operation and maintenance costs, increase staff productivity as well as the protection of people and equipment (Wang 2010; Hassanain 2017; Ogolla 2022; Fahmy 2024). The literature also highlights minimising energy waste by increasing energy efficiency, providing demand response solutions for renewable energy installations and improving occupant comfort,

Estándares de comunicación

Las diferentes tecnologías que se emplean en el BMS han operado de forma independiente, generando diversos estándares de comunicación, o "protocolos", en cada campo (Al-Mahdawi 2022). La interconexión de la red es heterogénea y los diferentes elementos deben comunicarse a través de las puertas de enlace (Ramalingam 2022). Así, normalmente pueden encontrarse diferentes protocolos de comunicación incluso entre los productos de una misma empresa. Una forma popular de integrar los productos de varios protocolos ha sido utilizar una pasarela (*gateway*), que tiene la función de convertir un protocolo en otro, asignando puntos de datos de uno a otro (Wang 2010) (Imagen 4).

En el mercado existen muchos protocolos, estándares y programas diferentes que cubren diferentes instalaciones o aplicaciones (HVAC, iluminación, seguridad, etc.), como Profibus, XML, DALI, ModBus, BACnet y KNX (Fahmy 2024). En el caso de la transmisión inalámbrica de datos aparecen protocolos como NarrowBand, Zwave, EnOcean, Wi-Fi, Bluetooth, Zig-Bee, LoRa y Sigfox (Jamil 2017; Al-Mahdawi 2022; Ramalingam 2022; Tatari 2022). La compatibilidad sigue siendo un inconveniente ya que cada proveedor utiliza sus propias extensiones de protocolos comunes (Wang 2010; Balaji 2016), aunque la interoperabilidad a través de interfaces de programación de aplicaciones ha avanzado considerablemente (Wang 2010).

Beneficios y barreras del BMS

Entre sus beneficios se encuentran que permiten un control, monitoreo y manejo uniforme y efectivo de todas las funciones de los equipos, facilitando las operaciones de mantenimiento, gestión y mejorando el rendimiento de los edificios (Hassanain 2017; Fahmy 2024). También aumentan la tasa de fiabilidad de las instalaciones y de los servicios, se reducen los costos de operación y mantenimiento, se aumenta la productividad del personal así como la protección de personas y equipos (Wang 2010; Hassanain 2017; Ogolla 2022; Fahmy 2024). La literatura también destaca que se minimiza el desperdicio de energía aumentando la eficiencia energética, se ofrecen soluciones de respuesta a la demanda para instalaciones de energía renovable y se mejora el confort de los ocupantes, garantizando su seguridad, reduciendo el consumo de agua y facilitando la supervisión remota y centralizada de edificios, entre otros (Hassanain 2017; Jamil 2017; Ogolla 2022; Meng 2023).

Sin embargo, existen desventajas como la falta de recursos financieros para su aplicación, la desconfianza en la implementación de tecnologías nuevas y no probadas, la falta capacidad profesional para integrar y gestionar tecnologías inteligentes y el desconocimiento de los desarrolladores y propietarios sobre el impacto ambiental de los edificios ineficaces (Ogolla 2022; Tatari 2022). También hay barreras a superar como los altos costos de implementación y mantenimiento, la seguridad y privacidad de los datos, las inhibiciones conductuales, la dificultad de adaptación al nuevo entorno, la falta de habilidades técnicas y la capacidad para instalarlas según las necesidades de los usuarios o la dificultad para cambiar el comportamiento rutinario de los residentes o propietarios, entre otras (Ogolla 2022; Tatari 2022). Se señala también la barrera asociada a la interoperabilidad generada por dificultades de que equipos, dispositivos, aparatos y sistemas de diferentes proveedores sean capaces de operar juntos. Además, existe falta de confiabilidad debido a que la interconexión de diversas tecnologías con diferentes tolerancias plantee un riesgo de fallo o de mal funcionamiento (Ogolla 2022).

Conclusiones

La aplicación de los BMS surgen ante la necesidad de reducir los costos energéticos en la operación de las edificaciones, además de dar una respuesta a las necesidades planteadas en las directivas europeas para reducir el impacto de las edificaciones en su ciclo de vida.

Los BMS constituyen un avance significativo en la tecnologización de los edificios, implementando sistemas que facilitan el control, la automatización y la gestión de sus instalaciones y servicios. Además de suponer una mejora sustancial en la eficiencia energética, comparada con edificaciones similares sin BMS, facilita las labores de mantenimiento, mejora aspectos como la seguridad, el confort y el uso del edificio. A pesar de los beneficios, existen una serie de barreras a la implantación de los BMS entre las que destacan su coste elevado, las dificultades de interoperabilidad entre componentes y protocolos, así como la falta de personal con formación adecuada para su empleo y aplicación.

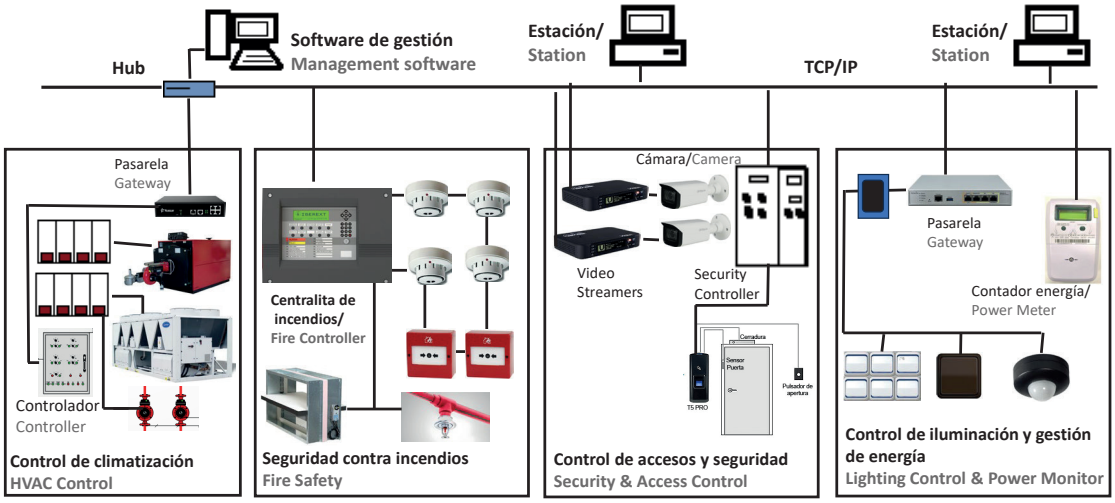


Imagen 4. Integración de un BMS (Fuente: Elaboración propia a partir de Wang 2010).
Image 4. An integrated intelligent building system (Source: Own elaboration based on Wang S 2010).

ensuring occupant safety, reducing water consumption and facilitating remote and centralised building monitoring, among others (Hassanain 2017; Jamil 2017; Ogolla 2022; Meng 2023).

Yet, there are disadvantages such as lack of financial resources for implementation, distrust in implementing new and unproven technologies, lack of professional capacity to integrate and manage smart technologies and unawareness of developers and owners about the environmental impact of inefficient buildings (Ogolla 2022; Tatari 2022). There are also barriers to overcome such as high implementation and maintenance costs, data security and privacy, behavioural constraints, difficulty in adapting to the new environment, lack of technical skills and the ability to install them according to users' needs, or difficulty in changing the routine behaviour of residents or owners, among others (Ogolla 2022; Tatari 2022). Also noted is the problem of interoperability due to the difficulty of equipment, devices, apparatus and systems from different vendors being able to operate together. In addition, there is a lack of reliability due to the interconnection of different technologies with different tolerances posing a risk of failure or malfunction (Ogolla 2022).

Conclusions

The application of BMSs arises from the need to reduce energy costs in the buildings' operation, in addition to responding to the needs set out in European directives to reduce the impact of buildings in their life cycle.

BMSs represent a significant advance in the technologisation of buildings, as they implement systems that facilitate control, automation and management of their installations and services. In addition to representing a substantial improvement in energy efficiency compared to similar buildings without BMS, they facilitate maintenance work, and improve aspects such as security, comfort and use of the building. However, there are also a number of barriers to their implementation, including their high cost, the difficulties of interoperability between components and protocols, as well as the lack of adequately trained personnel for their use and application.

BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

- AENOR. «Eficiencia energética de los edificios. Contribución de la automatización, el control y la gestión de los edificios. Parte 1: Marco general y procedimientos, UNE-EN ISO 52120-1 (ISO 52120-1:2021, Versión corregida 2022-09)».
- Aguilar J, Garces-Jimenez A, Gallego-Salvador N, De Mesa JAG. Gomez-Pulido JM, Garcìa-Tejedor, ÀJ. «Autonomic management architecture for multi-HVAC systems in smart buildings.» *Ieee Access*, 7 (2019): 123402-123415.
- Al-Mahdawi E (2023). «A literature review: Integrating Dali and BMS for enhancing the facility management.» In *AIP Conference Proceedings* 2793, nº 1 (2023). AIP Publishing.
- Balaji B, Weibel N, Agarwal Y. «Managing commercial HVAC systems: What do building operators really need?» *arXiv* preprint arXiv (2016):1612.06025.
- Fahmy DAE. «Application of Building Management System for sustainable buildings: Museums case study.» *International Journal of Multidisciplinary Studies in Architecture and Cultural Heritage* 7, nº 1 (2024): 12-23.
- Hassanain MA, Bin-Mohanna A, Al-Hammad AM, Sanni-Anibire MO (2017). «Challenges to the implementation of building management systems in Saudi Arabia.» *Built Environment Project and Asset Management* 7, nº 2 (2017): 130-142.
- Jamil M, Mittal S. «Building energy management system: A review.» In *2017 14th IEEE India Council International Conference (INDICON)* (2017): 1-6. IEEE.
- Meng L, Li RYM, Finocchiaro W, Alemu A. «Integrating Building Management Systems (BMS) and Building Information Model (BIM) to improve HVAC efficiency: a case study in Darwin.» In *Proceedings of the 2023 6th International Conference on E-Business, Information Management and Computer Science* (2023): 87-92.
- Minoli D, Sohraby K, Occhiogrosso B. «IoT considerations, requirements, and architectures for smart buildings - Energy optimization and next-generation building management systems.» In *IEEE Internet of Things Journal* 4, no. 1 (2017): 269-283.
- Ministerio de la Presidencia. «Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. Texto consolidado. Ultima modificación: 02 de agosto de 2022.» *Boletín Oficial del Estado* nº 207, de 29 de agosto de 2007, Referencia: BOE-A-2007-15820.
- Ogolla W, Kieti R (2022). «Application of building management system (BMS) in commercial property management in Kenya.» In *Understanding African Real Estate Markets* (2022): 188-200. Routledge.
- Ramalingam SP, Shanmugam PK. «A comprehensive review on wired and wireless communication technologies and challenges in smart residential buildings.» *Recent Advances in Computer Science and Communications* 15, nº 9 (2022): 1140-1167.
- Tatari M, Agarwal P, Alam MA, Ahmed J (2022). «Review of smart building management system.» In *ICT Systems and Sustainability: Proceedings of ICT4SD 2021* Volume 1 (2022): 167-176. Singapore: Springer Nature Singapore.
- Teraoka H, Balaji B, Zhang R, Nwokafor A, Narayanaswamy B, Agarwal Y. «Buildingsherlock: Fault management framework for HVAC systems in commercial buildings.» UC San Diego. Technical Reports (2014).
- Unión Europea. Directiva (UE) 2024/1275 del Parlamento Europeo y del Consejo de 24 de abril de 2024 relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición). *Diario Oficial de la Unión Europea*, 8 (2023): 1-168.
- Yin H (2010). «Building management system to support building renovation.» *Department of Civil and Environmental Engineering, UCC, Snapshots of Doctoral Research, University College Cork,* (2010): 164-169.
- Wang S. «Intelligent buildings and building automation.» Routledge (2009).
- Zhan S, Chong A, Lasternas B (2021, February). «Automated recognition and mapping of building management system (BMS) data points for building energy modeling (BEM).» In *Building Simulation* 14 (2021): 43-52. Tsinghua University Press.

TECNOLOGIAS APLICADAS A EDIFICACIONES SOSTENIBLES: UNA REDUCCION A LOS CONSUMOS ENERGETICOS PARA VIVIENDA

TECHNOLOGIES APPLIED TO SUSTAINABLE BUILDINGS: A REDUCTION IN ENERGY CONSUMPTION FOR HOUSING

Juan Francisco Palomino Bernal
University Institute of Materials Technology. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n 46022 (Valencia, Spain) E-mail jfpalber@doctor.upv.es/ Research Prof. Tecnologico Nacional de México Technological Institute of Ciudad Guzmán. Department of Earth Sciences Architecture. Av. Tecnológico 100, Mpio. de Zapotlán el Grande, Jalisco, Mexico C.P. 49000 Mexico. e-mail: juan.pb@cdguzman.tecnm.mx
Javier Cárcel Carrasco
Instituto Universitario de Tecnología de Materiales. Universitat Politècnica de València I España I Camino de Vera s/n 46022 (Valencia, Spain) E-mail: fracarc1@csa.upv.es
University Institute of Materials Technology. Universitat Politècnica de València I España I Camino de Vera s/n 46022 (Valencia, Spain) E-mail: fracarc1@csa.upv.es
Fabiola Colmenero Fonseca
Investigadora en el Dpto. Arquitectura diseño y comunicación; Universidad Lasalle México, fabiola.colmenero@lasalle.mx. Instituto Universitario de Tecnología de Materiales. Universidad Politécnica de València; Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. University Institute of Materials Technology fcolfon@upvnet.upv.es
Alejandro Guzmán Ramírez
Investigador Universidad de Guanajuato, Departamento de Arquitectura. Av. Juárez 77. 36000 Guanajuato, Gto. México. e-mail: alejandroguzman06@gmail.com
Kevin Alexander Echeverry Bucurú
University Institute of Materials Technology. Universitat Politècnica de València I España I Camino de Vera s/n 46022 (Valencia, Spain) E-mail: kaechbuc@doctor.upv.es

Resumen

Actualmente persisten las problemáticas medioambientales en el globo sin embargo las naciones unidas han reportado sus avances en el año 2023 para informar el avance a nivel global y también promover la concientización de la toma de acciones que permitan el avance hacia los objetivos. Además, el uso de nuevas tecnologías como el software Revit, BIM y Energy Plus, contribuye de manera significativa para eficientar y economizar propuestas para solventar estas problemáticas. El presente trabajo desarrolla un caso de estudio enfocado a la vivienda y los consumos energéticos que conllevan su uso en un periodo de tiempo de un año, se plantea un análisis comparativo del modelo desarrollado bajo un esquema doble el primero con materiales tradicionales como cemento y acero y el segundo con biomateriales los resultados muestran un beneficio al usar biomateriales en contraste con los materiales tradicionalmente usados, lo anterior responde como una solución a diferentes objetivos del desarrollo sostenible para mejorar desde la calidad de vida de las personas, su economía y el beneficio medioambiental al usar biomateriales.

Palabras Clave: *Simulación Avanzada, BIM, Biomateriales , Eficiencia Energética, Software*

Abstract

Currently, environmental problems persist around the globe, however the United Nations has reported its progress in 2023 to report progress at a global level and promote awareness of taking actions that allow progress towards the objectives. Furthermore, the use of new technologies such as Revit, BIM and Energy Plus software contributes significantly to making proposals more efficient and economizing to solve these problems. This work develops a case study focused on housing and the energy consumption that its use entails in a period of one year. A comparative analysis of the model developed under a double scheme is proposed, the first with traditional materials such as cement and steel. and the second with biomaterials, the results show a benefit when using biomaterials in contrast to the traditionally used materials, the above responds as a solution to different objectives of sustainable development to improve the quality of life of people, their economy and environmental benefit. when using biomaterials.

Keywords: *Advanced Simulation, BIM, Biomaterials, Energy Efficiency, Software*

Introducción

Actualmente ha sido publicado el en la cumbre de los ODS de 2023 (United Nations Organization, 2023)los avances y cumplimiento de estos, evidenciando que solo el 15 % de las metas establecidas en los ODS están dentro de un rango para cumplirse(Asamblea General de las Naciones Unidas, 2015). Dentro de ellos los ODS 9, 11, 13 y 17 publicaron sus avances evidenciando un crecimiento benéfico, sin embargo, no el esperado y en el numero 11 se ha encontrado hasta un retroceso. Lo anterior, enmarca la necesidad urgente de innovaciones y propuestas que fomenten e impacten directamente en los ODS de manera conjunta para alcanzar la consigna necesaria. Mediante la propuesta de una vivienda que adopte el entorno natural y sus materiales sean endémicos de la región y pueda ser utilizado para vivienda es posible englobar varios ODS y su debido desarrollo. Mediante la propuesta de vivienda que abarque desde reducciones en consumos energéticos, materiales con sistemas constructivos ancestrales hasta su escalabilidad en ciudades, es posible lograr un respeto medioambiental sin comprometer el confort para sus habitantes.

Lo anterior resulta ser importante analizarlo y desarrollarlo de manera adecuada no obstante la manera más eficiente actualmente es mediante el uso de nuevas tecnologías vanguardistas que no solo reduzcan el tiempo de modelado de vivienda para su adecuada planificación, sino también sean simulados para obtener datos duros para su cuantificación y evidenciar los beneficios que conllevan las propuestas. El uso del software Revit mediante su modelado y simulación han ganado terreno en el campo de la investigación debido a su enfoque en el modelado preciso con su metodología BIM(Dip Datta et al., 2023; Martins et al., 2022; Sacks et al., 2018; Taha et al., 2020). Además, con la simulación avanzada de la 6 dimensión enfocada en los consumos energéticos de sus modelos a simular, esta herramienta tecnológica es bastante innovadora y se alinea como una solución para las propuestas para poder resolver algunos de los ODS descritos.

El presente trabajo abarca un estudio de caso mediante el uso de las nuevas tecnologías descritas planteando una vivienda de tipo familiar modelada y simulada en software avanzado para obtener simulaciones en donde se evidencie los consumos energéticos que produce la vivienda y en función de los materiales que componen la misma produce datos cuantitativos para evidenciar la eficiencia de la vivienda. Mediante un análisis comparativo del mismo modelo, pero configurado con materiales tradicionalmente usados y otro modelo con materiales ancestrales es posible obtener los resultados al simular ambos modelos y obtener el mas eficiente en consumo energético (Colmenero Fonseca et al., 2024), para mostrar las ventajas de los biomateriales por sobre los materiales de construcción tradicionalmente usados como el cemento.

Introduction

Currently, the progress and compliance of these has been published at the 2023 SDG summit (United Nations Organization, 2023), showing that only 15% of the goals established in the SDGs are within a range to be met (General Assembly of the United Nations, 2015). Within them, SDGs 9, 11, 13 and 17 published their progress, evidencing beneficial growth, however, not what was expected and in number 11, even a setback has been found. The above frames the urgent need for innovations and proposals that promote and directly impact the SDGs together to achieve the necessary goal. By proposing a home that adopts the natural environment and its materials are endemic to the region and can be used for housing, it is possible to encompass several SDGs and their due development. Through the housing proposal that ranges from reductions in energy consumption, materials with ancestral construction systems to its scalability in cities, it is possible to achieve environmental respect without compromising the comfort of its inhabitants.

The above turns out to be important to analyze and develop appropriately, however the most efficient way currently is through the use of new cutting-edge technologies that not only reduce housing modeling time for proper planning, but are also simulated to obtain hard data for its quantification and demonstrate the benefits that the proposals entail. The use of Revit software through its modeling and simulation has gained ground in the research field due to its focus on accurate modeling with its BIM methodology (Dip Datta et al., 2023; Martins et al., 2022; Sacks et al. ., 2018; Taha et al., 2020). Furthermore, with the advanced simulation of the 6th dimension focused on the energy consumption

of its models to be simulated, this technological tool is quite innovative and is aligned as a solution for the proposals to be able to solve some of the SDGs described.

The present work covers a case study through the use of the new technologies described, proposing a family-type home modeled and simulated in advanced software to obtain simulations that show the energy consumption produced by the home and based on the materials it composes. It produces quantitative data to demonstrate the efficiency of the home. Through a comparative analysis of the same model, but configured with traditionally used materials and another model with ancestral materials, it is possible to obtain the results by simulating both models and obtaining the most efficient one in energy consumption (Colmenero Fonseca et al., 2024), to show the advantages of biomaterials over traditionally used construction materials such as cement.

Materiales y Métodos

Para el desarrollo del presente estudio fue utilizado el software Revit tanto para el modelo de una vivienda de tipo unifamiliar por duplicado para posteriormente ser configurados ambos modelos con materiales propuestos mediante la metodología BIM, mediante el desarrollo de dos modelos iguales se desarrollan cuatro fases para el estudio. El primer modelo se denominará modelo tradicional y el segundo modelo ancestral debido a los materiales que lo componen (Biomateriales), una vez desarrollados a totalidad ambos modelos serán configurados para si simulación avanzada para eficiencia energética en la sexta dimensión de Revit, para finalizar con la obtención de los datos cuantitativos para su análisis comparativo y evidenciar la eficiencia de un modelo sobre el otro la figura 1 muestra la metodología desarrollada en el presente estudio.

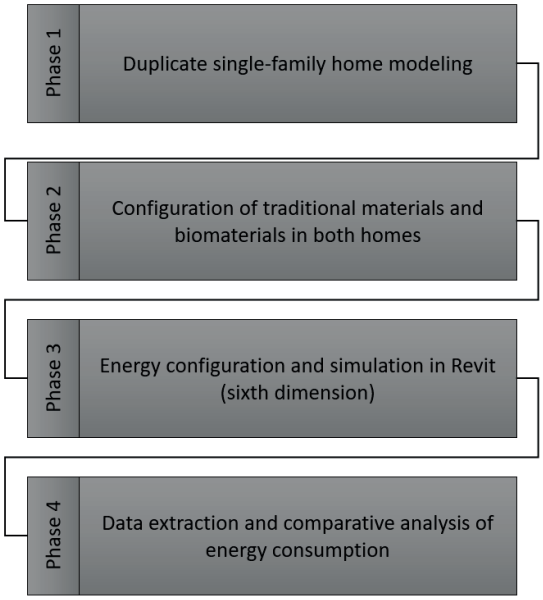


Figura 1 metodología desarrollada para el estudio energético/ **Figure 1 methodology developed for the energy study**

Fase 1 modelado de vivienda estudiada.

Una vivienda unifamiliar es seleccionada para desarrollar el modelo mostrado en la figura 2 la planta arquitectónica, la cual consta de espacios básicos para el desarrollo de las funciones familiares y habitables

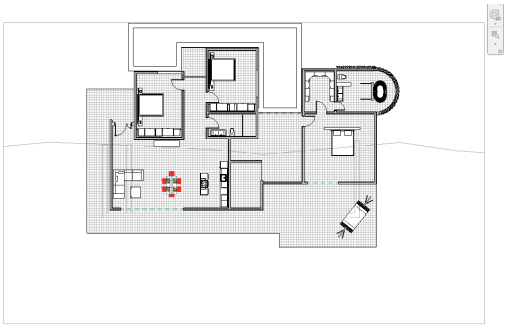


Figura 2 planta arquitectónica del modelo a utilizar. / Figure 2 architectural plan of the model to be used.

Fase 2 Configuración avanzada de materiales tradicionales y biomateriales para ambos modelos.

Desarrollado el modelo de la vivienda en tres dimensiones, se realiza la configuración de los materiales que componen cada modelo (Tradicional y Ancestral), en la figura 3 se muestra el explorador de materiales en Revit, el mismo contempla no solamente materiales en apariencia sino también en sus propiedades físico/térmicas las cuales serán consideradas posteriormente para la simulación avanzada y son parte indispensable parta el presente estudio, importante resulta mencionar la opción para crear materiales nuevos y su configuración de propiedades.

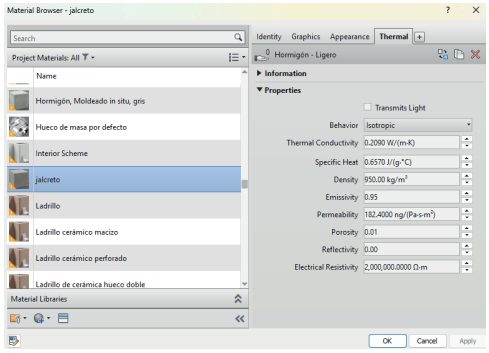


Figura 3 Explorador de materiales de Revit para la configuración de propiedades físico-térmicas/ Figure 3 Revit Materials Explorer for physical-thermal property settings.

La figura 4, se muestra la configuración utilizada para el biomaterial que compone el modelo ancestral y sus propiedades fisco-térmicas para posteriormente ser utilizado en la simulación energética en Revit.

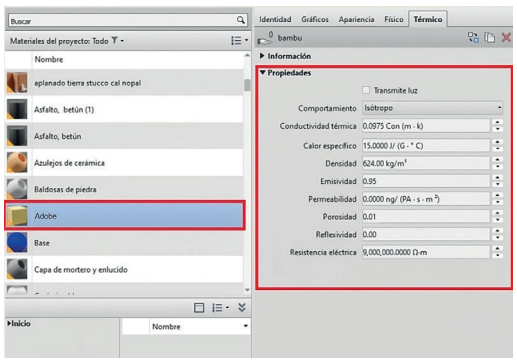


Figura 4 configuración avanzada de propiedades físico-térmicas de materiales BIM / Figure 4 advanced configuration of physical-thermal properties of BIM materials.

Posterior al desarrollo de la configuración avanzada de materiales y el modelado en tres dimensiones es posible continuar con la tercera fase de la metodología propuesta para simular el modelo y hacer el envío de datos hacia el servidor de Autodesk y obtener la simulación energética de los modelos denominado tradicional y el ancestral, la figura 5 muestra el modelo descrito en tres dimensiones configurado con los Biomateriales correspondientes.

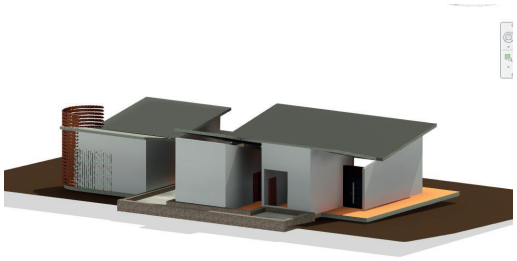


Figura 5 modelo desarrollado para las simulaciones energéticas. / Figure 5 model developed for energy simulations.

Fase 3 configuración de simulación energética para simulación avanzada en Revit.

Respecto a la simulación energética y su configuración es posible dividirla en dos vertientes, la primera; denominada como entorno, en esta edición es necesario asignar el lugar donde se ubicará la edificación. Seleccionando para este estudio la ciudad de Guadalajara, Jalisco, México, seleccionando una estación meteorológica para la extracción de los datos medioambientales para ser incluidos en la simulación energética del modelo, la figura 6 muestra la interfaz para seleccionar la estación meteorológica del modelo desarrollado.

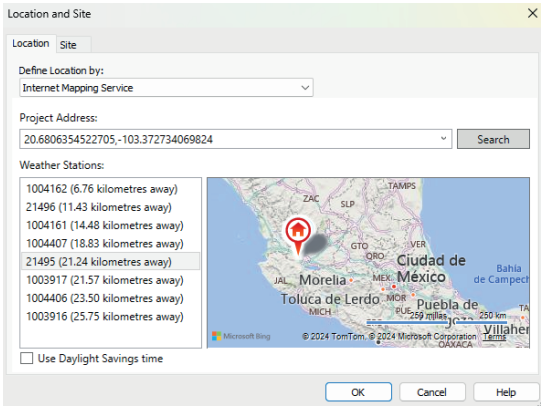


Figura 6 asignación de estación meteorológica para simulación energética en Revit. / Figure 6 weather station assignment for energy simulation in Revit.

Respecto a la segunda vertiente para configuración de simulación del modelo se denominará interno, debido a la configuración necesario de manera interna del modelo correspondiente a las zonas energéticas y separación de espacios para su análisis en base al modelo, dimensiones, materiales y los datos previamente seleccionados en la estación meteorológica, en la figura 7 se muestran los espacios analíticos y las zonas del sistema asignado para la simulación energética.

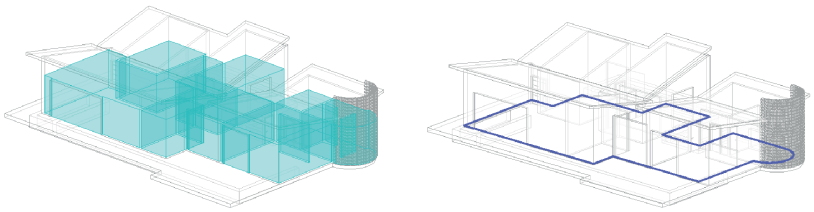


Figura 7 zonas del sistema y espacios analíticos para la simulación energética en Revit. / Figure 7 system zones and analytical spaces for energy simulation in Revit.

Fase 4 extracción de datos y análisis comparativo de los consumos energéticos.

Realizadas las configuraciones descritas anteriormente, se concluye la configuración de la simulacion con el analisis del sistema desarrollado en la figura 8, se muestra la interfaz para inicializar la simulacion energetica.

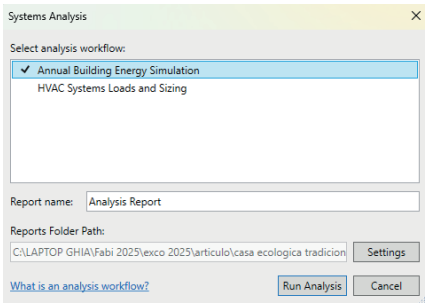


Figura 8 interfaz de inicialización de simulación energética del modelo. / Figure 8 model energy simulation initialization interface.

Materials and Methods

For the development of this study, the Revit software was used for both the model of a single-family home in duplicate and then both models were configured with materials proposed through the BIM methodology. Through the development of two equal models, four phases are developed for the study. The first model will be called the traditional model and the second ancestral model due to the materials that compose it (Biomaterials). Once fully developed, both models will be configured for advanced simulation for energy efficiency in the sixth dimension of Revit, to end with the Obtaining quantitative data for comparative analysis and demonstrating the efficiency of one model over the other. Figure 1 shows the methodology developed in the present study.

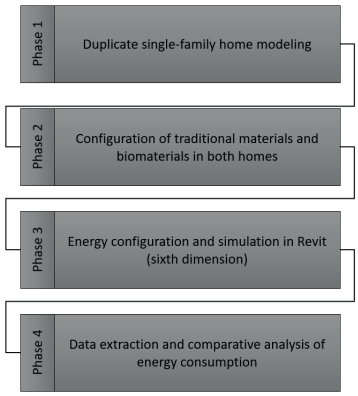


Figura 9 metodología desarrollada para el estudio energético/ Figure 1 methodology developed for the energy study

Phase 1 modeling of studied housing.

A single-family home is selected to develop the model shown in Figure 2, the architectural plan, which consists of basic spaces for the development of family and habitable functions.

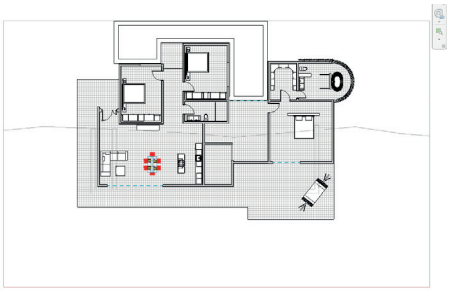


Figura 10 planta arquitectónica del modelo a utilizar. / Figure 2 architectural plan of the model to be used.

Phase 2 Advanced configuration of traditional materials and biomaterials for both models.

Once the model of the house has been developed in three dimensions, the configuration of the materials that make up each model (Traditional and Ancestral) is carried out. Figure 3 shows the materials explorer in Revit, which includes not only materials in appearance but also in its physical/thermal properties which will be considered later for the advanced simulation and are an indispensable part of the present study, it is important to mention the option to create new materials and their configuration of properties.

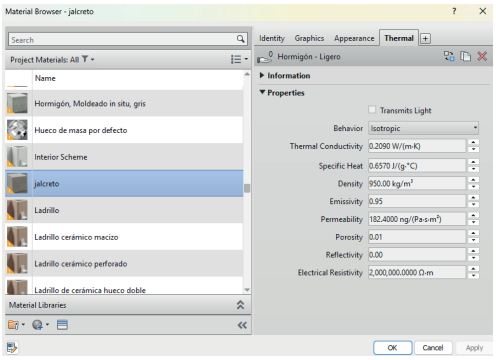


Figura 11 Explorador de materiales de Revit para la configuración de propiedades físico-térmicas/ Figure 3 Revit Materials Explorer for physical-thermal property settings.

Figure 4 shows the configuration used for the biomaterial that makes up the ancestral model and its physical-thermal properties to later be used in the energy simulation in Revit.

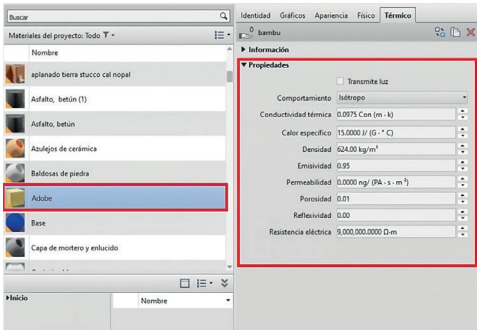


Figura 12 configuración avanzada de propiedades físico-térmicas de materiales BIM / Figure 4 advanced configuration of physical-thermal properties of BIM materials.

After the development of the advanced configuration of materials and three-dimensional modeling, it is possible to continue with the third phase of the proposed methodology to simulate the model and send data to the Autodesk server and obtain the energy simulation of the models called traditional and ancestral, Figure 5 shows the model described in three dimensions configured with the corresponding Biomaterials.

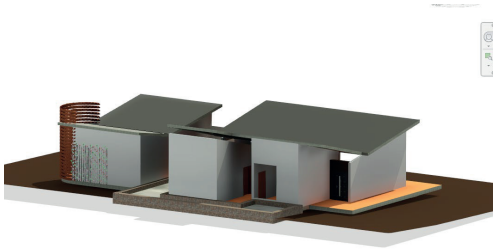


Figura 13 modelo desarrollado para las simulaciones energéticas. / Figure 5 model developed for energy simulations.

Phase 3 energy simulation configuration for advanced simulation in Revit.

Regarding the energy simulation and its configuration, it is possible to divide it into two aspects, the first; Called environment, in this edition it is necessary to assign the place where the building will be located. Selecting for this study the city of Guadalajara, Jalisco, Mexico, selecting a meteorological station for the extraction of environmental data to be included in the energy simulation of the model, Figure 6 shows the interface to select the meteorological station of the developed model.

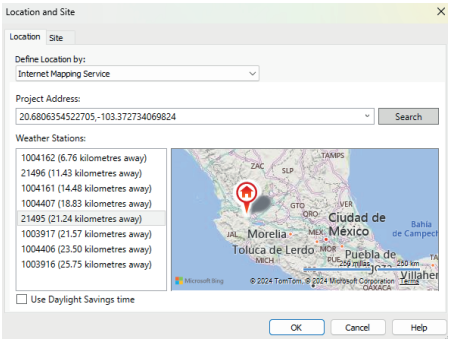


Figura 14 asignación de estación meteorológica para simulación energética en Revit. / Figure 6 weather station assignment for energy simulation in Revit.

Regarding the second aspect for the simulation configuration of the model, it will be called internal, due to the necessary internal configuration of the model corresponding to the energy zones and separation of spaces for analysis based on the model, dimensions, materials and previously selected data. At the weather station, Figure 7 shows the analytical spaces and areas of the system assigned for energy simulation.

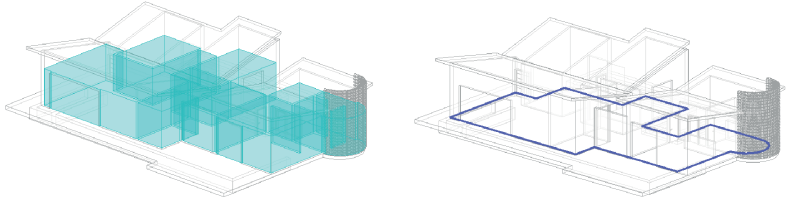


Figura 15 zonas del sistema y espacios analíticos para la simulación energética en Revit. / Figure 7 system zones and analytical spaces for energy simulation in Revit.

Phase 4 data extraction and comparative analysis of energy consumption.

Once the configurations described above have been made, the simulation configuration is concluded with the analysis of the system developed in Figure 8, the interface to initialize the energy simulation is shown.

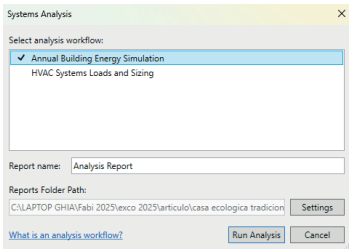


Figura 16 interfaz de inicialización de simulación energética del modelo. / **Figure 8 model energy simulation initialization interface.**

Resultados

Los resultados obtenidos al desarrollarse las simulaciones de los modelos tradicional y ancestral muestran los consumos energéticos demandados por cada uno tanto para enfriar como para calentar los espacios interiores de la vivienda. En total se desarrollaron dos modelos, dos simulaciones y se extrajeron los datos de cada uno para realizar un análisis comparativo entre ambos modelos en los cuales lo único que difiere son los materiales. La figura 9 muestra la interfaz del software con los resultados producidos por la simulación descrita.

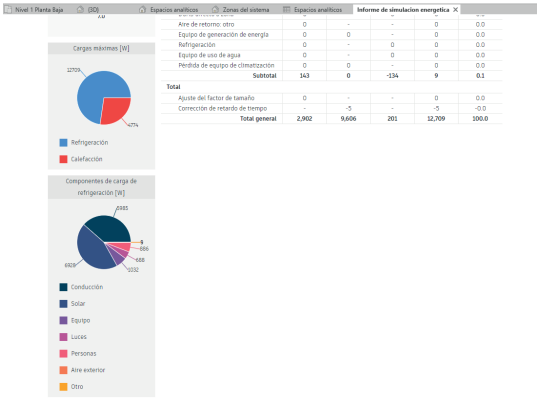


Figura 17 resumen de cargas máximas totales de la simulación energética para el modelo tradicional. / **Figure 9 summary of total maximum loads of the energy simulation for the traditional model.**

Posteriormente se extrae el resumen de los resultados de las simulaciones para ambos modelos, la tabla 1 muestra el resumen de ambos modelos y sus consumos energéticos, esta tabla facilita el análisis comparativo a desarrollar para obtener el mejor modelo para beneficio del usuario y el medioambiente.

Tabla 1 resumen de consumos energéticos del modelo tradicional y modelo ancestral en Revit con Energy Plus. / **Table 1 summary of energy consumption of the traditional model and ancestral model in Revit with Energy Plus.**

Cargas Resultantes	Modelo Tradicional consumos W	Modelo Ancestral consumos W
Refrigeración	12,709	7130
Calefacción	4,774	3844
Conducción	5985	3023
Solar	6928	2968
Equipos	1032	517
Luces	688	345
Personas	886	498
Aire Exterior	9	8

Results

The results obtained when developing the simulations of the traditional and ancestral models show the energy consumption demanded by each one both to cool and heat the interior spaces of the home. In total, two models and two simulations were developed and the data from each one was extracted to perform a comparative analysis between both models in which the only thing that differs are the materials. Figure 9 shows the software interface with the results produced by the described simulation.

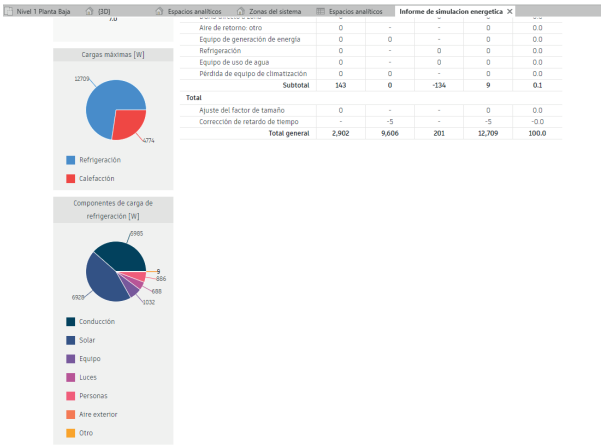


Figura 18 resumen de cargas máximas totales de la simulación energética para el modelo tradicional. / Figure 9 summary of total maximum loads of the energy simulation for the traditional model.

Subsequently, a summary of the results of the simulations for both models is extracted. Table 1 shows the summary of both models and their energy consumption. This table facilitates the comparative analysis to be developed to obtain the best model for the benefit of the user and the environment.

Tabla 2 resumen de consumos energéticos del modelo tradicional y modelo ancestral en Revit con Energy Plus. / Table 1 summary of energy consumption of the traditional model and ancestral model in Revit with Energy Plus.

Resulting Loads	Consuption traditional Model (W)	Consuption Ancestral Model (W)
Refrigeration	12,709	7130
Heating	4,774	3844
Conduction	5985	3023
Solar	6928	2968
Equipment	1032	517
Lights	688	345
People	886	498
External Air	9	8

Conclusiones

El modelado y simulación en software avanzado como Revit y su complemento Energy Plus benefician al modelador no solamente en tiempos sino en planificación y la toma de decisiones informadas(Nubia-Arias, 2016) previas a construir mediante el uso de materiales, entorno, consumos, sistema constructivo a usar y prever las ventajas y desventajas de la propuesta, siendo una alternativa practica y de bajo costo a comparación de los métodos experimentales (Martins et al., 2022). Sin embargo, el uso de software y simulación avanzada no dejan de ser una aproximación más nunca una realidad, pero resulta una herramienta bastante útil para los fines del estudio presentado.

Los resultados mostrados en la tabla 1 muestran las ventajas del uso de Biomateriales como el abobe y madera en comparación con el cemento y acero en función de los consumos energéticos de la vivienda, esto se alinea directamente con varias problemáticas a resolver planteadas por los Objetivos del Desarrollo Sostenible, beneficiando no solo a los usuarios sino al medioambiente por el tipo de materiales regionales y con un índice de incorporación al medioambiente alto.

Conclusions

Modeling and simulation in advanced software such as Revit and its Energy Plus complement benefit the modeler not only in terms of time but also in planning and making informed decisions(Nubia-Arias, 2016) prior to building through the use of materials, environment, consumption, construction system to use and foresee the advantages and disadvantages of the proposal, being a practical and low-cost alternative compared to experimental methods (Martins et al., 2022). However, the use of software and advanced simulation is still an approximation and never a reality, but it is a very useful tool for the purposes of the study presented.

The results shown in Table 1 show the advantages of using Biomaterials such as abobe and wood compared to cement and steel based on the energy consumption of the home. This is directly aligned with several problems to be resolved posed by the Objectives of the Sustainable Development, benefiting not only users but the environment due to the type of regional materials and with a high rate of incorporation into the environment.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- Asamblea General de las Naciones Unidas. (2015). 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). https://www.pactomundial.org/que-puedes-hacer-tu/ods/
- Colmenero Fonseca, F., Rodríguez Pérez, R., Perlaza Rodríguez, J., Palomino Bernal, J. F., & Cárcel-Carrasco, J. (2024). Sustainable Built Environments: Building Information Modeling, Biomaterials, and Regenerative Practices in Mexico. Buildings, 14(1), 202. https://doi.org/10.3390/buildings14010202
- Dip Datta, S., Rahman Sobuz, Md. H., Jahan Mim, N., & Deb Nath, A. (2023). Investigation on the effectiveness of using building information modeling (BIM) tools in project management: a case study. Revista de La Construcción, 22(2). https://doi.org/10.7764/RDLC.22.2.306
- Martins, S. S., Evangelista, A. C. J., Hammad, A. W. A., Tam, V. W. Y., & Haddad, A. (2022). Evaluation of 4D BIM tools applicability in construction planning efficiency. International Journal of Construction Management, 22(15), 2987–3000. https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1837718
- Nubia-Arias, B. (2016). El consumo responsable: educar para la sostenibilidad ambiental. AiBi Revista de Investigación, Administración e Ingeniería, 4(1), 29–34. https://doi.org/10.15649/2346030X.385
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). BIM Handbook. Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119287568
- Taha, F. F., Hatem, W. A., & Jasim, N. A. (2020). Effectivity of BIM technology in using green energy strategies for construction projects. Asian Journal of Civil Engineering, 21(6), 995–1003. https://doi.org/10.1007/s42107-020-00256-w
- United Nations Organization. (2024). Status of the Sustainable Development Goals in 2024. What Is the Status of the SDGs of the 2030 Agenda? https://www.pactomundial.org/noticia/en-que-situacion-se-encuentran-los-ods-de-la-agenda-2030/#:~:text=¿En%20qué%20situación%20se%20encuentran%20los%20ODS%20de%20la%20Agenda%202030%3F,-Índice&text=A%20falta%20de%20seis%20años,2024%20de%20las%20Naciones%20Unidas.

PERFIL DEL CLIENTE DEL AGENTE INMOBILIARIO ANTE LA DIGITALIZACIÓN DEL SECTOR

CUSTOMER PROFILE OF THE REAL ESTATE AGENT AS THE INDUSTRY GOES DIGITAL

Juan Carlos Asensio-Soto
Coordinador y profesor del Centro Profesional de la Universidad Europea de Valencia. Doctor en Administración y Dirección de Empresas. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: juancarlos.asensio@universidadeuropea.es
Coordinator and lecturer at the Professional Center of Universidad Europea de Valencia. Phd in Business Management and Organization. Universitat Politècnica de València.

Elena Navarro-Astor
Departamento de organización de empresas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. Universitat Politècnica de València (UPV). Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Profesora Titular de Universidad. Doctora en Organización de Empresas por la UPV. E-mail: enavarro@omp.upv.es
Department of Business Organization. School of Building Enginering. Universitat Politècnica de València. Senior Lecturer. Phd in Business Organization at UPV.

Abstract

The real estate sector is undergoing a transformation process due to increasing digitalisation and the emergence of technological platforms known as proptech. Despite this disruptive context, the real estate agent maintains a key market position, playing a critical role in the intermediation between buyers and sellers. The aim of this study is to analyse the profile of the customer who uses the services of the real estate agent in a highly digitalised environment.

Following a quantitative methodology, this research is based on data from 412 surveys conducted between 2018 and 2021 in Spain. The results show that the majority of participants prefer traditional intermediation over online agencies. Factors such as trust, expert advice and the complexity of the real estate process justify the demand for real estate agents. Although digitalisation poses a challenge to traditional brokerage, real estate agents remain relevant due to their ability to offer a comprehensive, personalised and efficient service. This contrasts with the limited penetration of digital platforms in a sector that still values human interaction and professional expertise.

Keywords
Customer Profile, Digitalisation, Disintermediation, Proptech, Real Estate Agent, Real Estate Sector.

Introducción

El sector inmobiliario constituye uno de los elementos más importantes de cualquier economía nacional. El análisis del mercado inmobiliario y su predicción constituyen información valiosa tanto para compradores y vendedores de inmuebles como para expertos y profesionales (Pai y Wang, 2020).

La intermediación inmobiliaria está atravesando uno de los momentos más disruptivos de las últimas décadas debido a la creciente incorporación de tecnologías en sus procesos y servicios. En España, este proceso cobra mayor impulso a partir de 2017 con la aparición de nuevas empresas más tecnológicas denominadas proptech (Asensio-Soto y Navarro-Astor, 2022). A pesar de estas innovaciones, el mercado inmobiliario sigue estando altamente intermediado, ya que el 90% de los compradores y vendedores recurren a un agente. No obstante, las bajas barreras de entrada y las comisiones han incrementado el acceso de intermediarios inexpertos, lo que puede afectar la calidad del servicio ofrecido (Gilbukh y Goldsmith-Pinkham, 2024). Esto se acentúa con el alto grado de opacidad y la falta de homogeneidad que caracterizan al sector y que, al mismo tiempo, justifican la existencia de agentes (Ziets y Sirmans, 2020). Estos desempeñan un papel crucial al guiar a compradores y vendedores en la búsqueda de propiedades, debido a que la obtención de información en este sector conlleva un alto coste en términos de tiempo y recursos (Zietz y Sirmans, 2020).

El auge de la tecnología e internet están transformando rápidamente este panorama. Al permitir que las distintas partes del mercado se conecten directamente a través de plataformas virtuales, el proceso de búsqueda y conexión entre compradores y vendedores es ahora más sencillo y económico que antes (Wigand, 2020). Así, las nuevas posibilidades que ofrece la digitalización ponen en cuestión la figura del agente inmobiliario tradicional enfrentándolo a un proceso vivido ya con anterioridad y del que, hasta el momento, ha salido victorioso: la desintermediación (Wigand, 2020).

El objetivo principal de este trabajo es conocer el perfil del cliente que requiere de la ayuda del agente inmobiliario en un sector cada vez más digitalizado.

Funciones del agente inmobiliario

El agente inmobiliario es el elemento de conexión entre la empresa y el mercado, siendo su presencia clave en el proceso de negociación entre comprador y vendedor. Representa una especie de intermediario con un cometido muy importante, ya que participa en casi todas las fases de la transacción inmobiliaria (Trio y Iazzi, 2016). Su papel ha sido revisado críticamente por un gran número de académicos (Benefield et al., 2019).

Muchos autores destacan la mala imagen de los agentes inmobiliarios (Talmatchi, 2020) asociada a la intangibilidad de su trabajo, esfuerzo apenas observable por parte de los clientes (Santore y Bruce, 2002). En cambio, Seiler et al. (2008), muestran que los compradores y los vendedores sí aprecian el contacto humano con el agente inmobiliario, el sentimiento de confianza, la capacidad de respuesta a sus necesidades y su empatía.

Talmatchi (2020) apunta a la posibilidad de prescindir de la ayuda del agente ya que, inevitablemente, incrementará el coste final de la operación. Añade Yáñez (2013) que el cliente puede intentar realizar la transacción por sí solo, aunque reconoce las dificultades que encontrará. Se trata de un proceso de decisión complejo debido al alto riesgo financiero que conlleva y al elevado tiempo que se emplea (Palm y Bolsen, 2022). Asimismo, el proceso de compra-venta no suele repetirse en el corto plazo y tiene un alto impacto de por vida en los compradores (Palm y Bolsen 2022). Concluye Talmatchi (2020) que al eliminar al agente, vendedores y compradores tienen un potencial para minimizar el coste, pero no se beneficiarían de un asesoramiento profesional.

La literatura académica subraya las ventajas y desventajas de contratar un agente inmobiliario. Para Benefield et al. (2019), el principal servicio proporcionado es el dirigido a la promoción y venta de la propiedad, por lo que es el vendedor quien obtendría un mayor beneficio de los servicios de los agentes inmobiliarios. Además, los agentes asesoran y acompañan a los vendedores en el proceso de negociación, y en los distintos trámites burocráticos necesarios para la compra-venta.

Introduction

The real estate sector is one of the most significant elements of any national economy. Real estate market analysis and forecasting is valuable information for buyers and sellers of real estate as well as for experts and professionals (Pai and Wang, 2020).

Real estate brokerage is going through one of the most disruptive moments in recent decades due to the increasing incorporation of technologies in its processes and services. In Spain, this process has been gaining momentum since 2017 with the emergence of new, more high-tech companies known as proptech (Asensio-Soto and Navarro-Astor, 2022). Despite these innovations, the real estate market remains highly intermediated with 90% of buyers and sellers hiring an agent. However, low barriers to entry and commission rates have increased access of inexperienced intermediaries, which may affect the quality of the service offered (Gilbukh and Goldsmith-Pinkham, 2024). This is reinforced by the high degree of opacity and lack of homogeneity that characterise the sector and, at the same time, justify the existence of agents (Ziets and Sirmans, 2020). These actors play a crucial role in guiding buyers and sellers in their property search, as obtaining information in this sector is costly in terms of time and resources (Zietz and Sirmans, 2020).

The rise of technology and the internet are rapidly transforming this scenario. By allowing the different parties in the market to directly connect through virtual platforms, the search and connection process between buyers and sellers is now simpler and cheaper than ever before (Wigand, 2020). Thus, the new possibilities offered by digitalisation challenge the role of the traditional property agents, confronting them with a process that has already been experienced before and from which, so far, they have emerged victorious: disintermediation (Wigand, 2020).

This paper's main objective is to determine the profile of the customer who requires assistance from the real estate agent in an increasingly digitalised sector.

Real estate agent's functions

The real estate agent is the connecting element between the firm and the market, being a key presence in the buyer-seller negotiation process. It represents a kind of intermediary with a very important role, as it is involved in almost all phases of the real estate transaction (Iazzi and Trio, 2016). Its role has been critically reviewed by many scholars (Benefield et al., 2019).

Numerous authors highlight the poor image of real estate agents (Talmatchi, 2020) associated with the intangibility of their work, an effort barely visible to customers (Santore and Bruce, 2002). In contrast, Seiler et al. (2008) show that buyers and sellers do appreciate the human contact with the real estate agent, the feeling of trust, responsiveness to their needs and empathy.

Talmatchi (2020) points out the possibility of avoiding the agent's assistance, as it will increase the final cost of the transaction. Yañez (2013) mentions that the customers could try to carry out the transaction on their own, although they will encounter difficulties. It is a complex decision-making process due to the high financial risk involved and the long time invested (Palm and Bolsen, 2022). In addition, the buying and selling process is not often repeated in the short term and it has a high lifetime impact on buyers (Palm and Bolsen 2022). Talmatchi (2020) concludes that by eliminating the agent, sellers and buyers have the potential to minimise cost; but they would not benefit from professional advice.

Scholarly literature highlights the advantages and disadvantages of hiring an agent. According to Benefield et al. (2019), the main service provided is the property promotion and sale, so it is the seller who would make the most profit. In addition, agents advise and assist sellers in the negotiation process and in the various bureaucratic procedures required for the sale and purchase.

Several authors have identified the functions that define the agent's job (see Table 1).

For Trio and Iazzo (2016), it provides solutions to the various difficulties that may arise during the transaction.

Varios autores han identificado las funciones que definen el trabajo del agente (Ver Tabla 1).

Para Trio y Iazzo (2016) proporciona soluciones a las distintas dificultades que pueden presentarse en el transcurso de la operación.

Por otro lado, Levitt y Syverson (2008) destacan el valor funcional del agente inmobiliario por la información que aporta y por su eficacia para ajustar los requisitos del cliente. Las soluciones presentadas por el profesional deben coincidir con las necesidades del comprador o vendedor, ofreciendo un resultado más eficiente que el de un medio en línea. Por tanto, también se mide por la eficiencia general del proceso: ahorrando tiempo y reduciendo riesgos. Para el vendedor, el proceso es eficiente cuando se reduce el plazo de venta; para el comprador, cuando accede a un mayor número de propiedades potenciales (Elder et al., 2003).

Tabla 1. Funciones del agente inmobiliario. / Table 1. Real estate agent's functions

Autor / Author	**Funciones /** Functions
Barresi (1968)	Intermediar entre comprador y vendedor, estimar el valor de la propiedad, ayudar en la adquisición de la hipoteca y asesorar sobre los distintos usos que se pueden dar a la propiedad. To intermediate between buyer and seller, estimate the property value, assist in obtaining a mortgage and advise on the different property uses.
Elder et al. (2003)	Intermediar entre los clientes, aportar información y estimar el valor de la propiedad. To intermediate between clients, provide information and estimate property value.
Ledesma Ibáñez (2008)	Informar del estado de la operación, actuar con discreción de las gestiones, actuar con lealtad al cliente, rendir cuentas, averiguar y comprobar la situación registral de la propiedad. To report on transaction progress, act with discretion and with loyalty to the client, be accountable, ascertain and verify the property's registration status.
Blanco Carrasco (2008)	Mediar entre las partes; ser diligente e imparcial; proporcionar información y respetar las normas deontológicas profesionales. To mediate between the parties; to be diligent and impartial, to provide information and to respect professional ethical standards.
Pacheco (2015)	Ofrecer seguridad jurídica en las transacciones, y que éstas sean rápidas, y al menor coste posible. To provide legal certainty in transactions, and for these to be quick, and at the lowest possible cost.
Gardès, (2019)	Identificar la oferta, poner en contacto a los clientes, valorar el precio de la vivienda, gestionar las ventas, publicidad y marketing, ofrecer una correcta asesoría y asistencia legal y negociar y asistir en el cierre de la transacción. To identify the deal, contact clients, assess the property price, manage sales, advertise and market the property, provide proper legal advice and assistance, and negotiate and assist in the completion of the transaction.
Wilcox y Forsyth (2022)	Ahorrar tiempo al cliente y brindarle la seguridad de que se han acordado los términos óptimos de la transacción. To save the customer time and provide assurance that the optimal terms of the transaction have been agreed.

Fuente: Elaboración propia / Source: Own elaboration

Asimismo, al prestar apoyo en la gestión de la transacción, el agente proporciona valor emocional al cliente, siendo fundamental para su seguridad psicológica (Gardès, 2019). En este sentido, su ayuda resulta tranquilizadora para el cliente ya que reduce su carga mental, especialmente cuando la situación se percibe como demasiado compleja. La posibilidad de llamar a un agente inmobiliario es capaz de reducir el riesgo de una negociación difícil y/o conflictiva, situación muy frecuente en la compraventa de vivienda entre dos partes con intereses opuestos.

On the other hand, Levitt and Syverson (2008) outline the functional value of the agent in relation to the information provided and its effectiveness in meeting customer requirements. The solutions presented by the professional should match buyer's or seller's needs, offering a more efficient result than an online medium. Therefore, it is also measured by the overall process efficiency: saving time and reducing risk. For the seller, the process is efficient when the selling time is reduced, for the buyer, when they have access to a larger number of potential properties (Elder et al., 2003).

In addition, by providing support in managing the transaction, the agent provides emotional value to the customer, which is essential for their psychological safety (Gardès, 2019). In this sense, the agent's advice is reassuring for the client as it reduces the mental burden, especially when the situation is perceived as too complex. The possibility of hiring a real estate agent can reduce the risk of a difficult and/or conflictive negotiation, which is a very common situation in home transactions between two parties with opposing interests. Gardès (2019) notes that an intermediary, supposedly an expert, working in the interests of both parties, should prevent these differences from escalating into conflicts. Their experience and knowledge of legal aspects reassure the client that the transaction will proceed smoothly. This customer recognition of the support provided by real estate agents on all the risks inherent in the transaction is also linked to this affective and emotional dimension.

Methodology

This is a descriptive research conducted using quantitative methodology. The target population is anyone who has participated in a property purchase or sale process between 2018 and 2021, inclusive, at a national level, whether or not the process has been completed. The established 4-year period is the time interval during which the online agency has coexisted with the traditional one. Sampling was a combination of non-probability convenience sampling and snowball sampling.

450 surveys were collected, of which 412 were validated, a sufficient number for statistical analysis. Fieldwork took place from October to December 2021. The questionnaire was elaborated based on the Reserv real estate services measurement scale, although modifications have been made to adapt it to the object of study, following authors' recommendations (Nelson y Nelson, 1995; Seiler and Reisenwitz (2010). Data were analysed using IBM SPSS Statistics 26.

Results

The profile of the client seeking the assistance of a real estate agent is described according to several variables: gender, age, education, occupation, income level, situation in the transaction process and type of agency selected.

56.1% of the sample are women and the rest are men (43.4%), showing a fairly even gender balance. The average age was 45 years, with an interquartile range of 37-52, the age range being 22-89 years. The 35-65 and 18-35 age groups have the highest relative weight (50.1% and 45.8% respectively). The under-18s make up 2.3% of the total and the over-65s 1.4%.

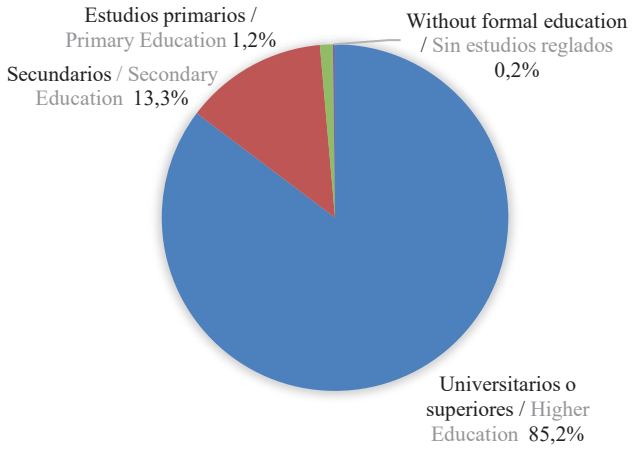


Imagen 1. Nivel de formación de los participantes. Image 1. Participants' level of education.
Fuente: Elaboración propia. Source: Own elaboration.

Apunta Gardès (2019) que la intervención de un intermediario, supuestamente un experto, que trabaje en interés de ambas partes, debe evitar que estas diferencias se conviertan en conflictos. Su experiencia y conocimientos en aspectos legales tranquilizan al usuario sobre el buen funcionamiento de la operación. Este reconocimiento de los clientes de la ayuda que aportan los agentes inmobiliarios sobre todos los riesgos inherentes a la transacción también está vinculado a esta dimensión afectiva y emocional.

Metodología

Se trata de una investigación descriptiva que utiliza la metodología cuantitativa. La población de estudio es toda persona que haya participado en un proceso de compra o venta de un inmueble en el periodo comprendido entre 2018 y 2021, ambos inclusive, a nivel nacional, haya o no finalizado dicho proceso. El periodo establecido de 4 años es el intervalo de tiempo durante el que la agencia online ha convivido con la tradicional. El muestreo ha sido una combinación de muestreo no probabilístico por conveniencia y por bola de nieve.

Se recogieron 450 encuestas de las cuales se validaron 412, número suficiente para realizar el análisis estadístico. El trabajo de campo tuvo lugar de octubre a diciembre de 2021. El cuestionario se diseñó a partir de la escala de medición de servicios en el sector inmobiliario Reserv, si bien se han realizado modificaciones para adaptarlo al objeto de estudio, siguiendo las recomendaciones de sus creadores Nelson y Nelson (1995) y de Seiler y Reisenwitz (2010). Los datos se han analizado mediante el programa IBM SPSS Statistics 26.

Resultados

Se describe el perfil del cliente que busca la ayuda de agente en base a diversas variables: sexo, edad, formación, ocupación, renta, situación en el proceso de la transacción y tipo de agencia.

Un 56,1% de la muestra son mujeres y el resto hombres (43,4%), estando bastante equilibrada en cuanto al sexo. La edad media es de 45 años, con un rango intercuartílico de 37-52, siendo el intervalo de edad entre los 22 y los 89 años. Los grupos de edad comprendidos entre 35-65 años y entre 18-35 años son los que poseen un mayor peso relativo, –50,1% y el 45,8% respectivamente–. Los menores de 18 años constituyen el 2,3% del total y los mayores de 65 años el 1,4%.

Por lo que respecta al nivel de formación (Imagen 1), el 85,2% de las personas encuestadas tiene estudios universitarios o superiores, de las cuales un 49,2% posee estudios de diplomatura, licenciatura o grado y un 35,9% dispone de un máster o doctorado. El 13,3% tiene estudios secundarios, el 1,2% estudios primarios y sólo el 0,2% se presenta sin estudios reglados.

En cuanto a la ocupación, el grupo con más peso corresponde a los trabajadores por cuenta ajena con el 68,9% (Imagen 2), mientras que el de los trabajadores por cuenta propia son el 19,2%. El 7,2% representa a las personas jubiladas o pensionistas, el 3,2% a las personas desempleadas y el grupo de estudiantes participa en un 1,5% del total.

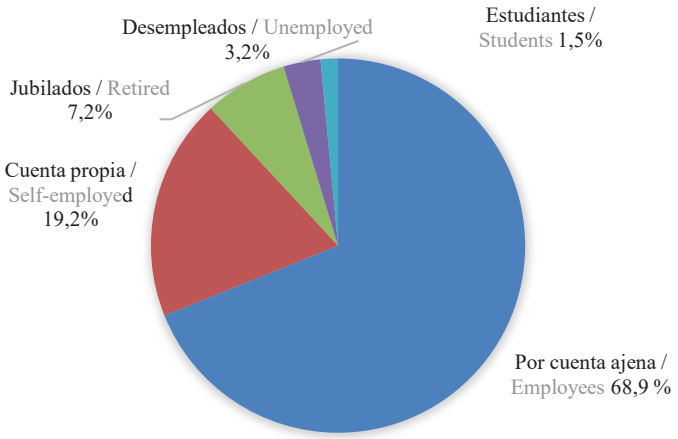


Imagen 2. Ocupación de los participantes. Image 2. Participants' occupation.
Fuente: Elaboración propia. Source: Own elaboration.

As regards education (Image 1), 85,2% of the people surveyed have higher education, of which 49,2% have a bachelor's degree and 35,9% have a master's degree or doctorate. 13, 3% have secondary education, 1,2% have primary education and only 0, 2% have no formal education.

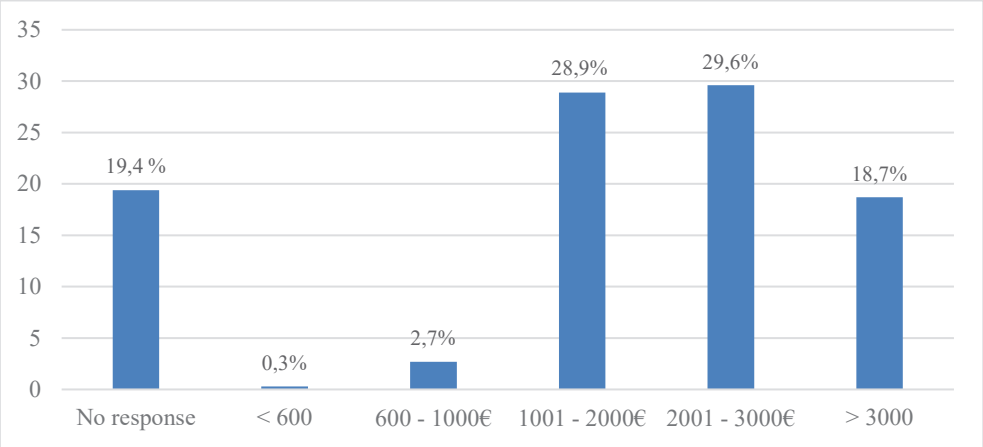


Imagen 3. Ingresos mensuales de los participantes. Image 3. Participants' monthly income.
Fuente: Elaboración propia. Source: Own elaboration

With reference to employment data (Image 2), the group with the highest share is made up of employees accounting for 68, 9% of the total, while the self-employed group accounts for 19,2%. Retired participants represent 7,2% of the sample, the unemployed 3,2% and students 1,5%.

Image 3 shows the information on income level. Two groups stand out, those with monthly incomes between €2,001 and €3,000 (29,6%) and those between €1,001 and €2,000 (28,9%). There is a third group that corresponds to incomes above €3,000 representing 18,7% of the sample. It should be added that 19,4% of the sample did not answer this question.

As regards participants' situation in the transaction process, Table 2 shows that most of them were buyers. Thus, 59% of the respondents made a purchase, 20,9% made a sale and 15,5% made both a sale and purchase. On the other hand, 4,9% of the sample did not complete the transaction process. In addition, there are significant differences in the age of the different profiles: sellers are older than the rest, with an average age of 53, while buyers are 42 on average.

Tabla 2. Situación en el proceso de transacción / Table 2. Situation in the transaction process

Tipo de transacción / Transaction type	Frecuencia / Frequency	Porcentaje / Percentage	Porcentaje acumulado / Cumulative Percentage
Compraventa / Sale & purchase	64	15,5	15,5
Compra / Purchase	242	58,7	74,3
Venta / Sale	86	20,9	95,1
Sin finalizar / Unfinished	20	4,9	100
Total	412	100	

Fuente: Elaboración propia / Source: Own elaboration

Finally, it is noteworthy that 95.8% of those surveyed used traditional brokers and only 4.2% used online agencies or proptech. There may be several reasons for this. On the one hand, the main online proptechs are based in the city of Barcelona, while the sample includes people from all over Spain. On the other hand, these firms have a high degree of specialisation that does not allow them to quickly access new markets, and therefore, they usually start up in large cities that are more transparent markets (Choi et al., 2019).

La Imagen 3 muestra la información relativa al nivel de renta. Destacan dos grupos respecto al resto, quienes ingresan mensualmente entre 2.001 € y 3.000 € representado por el 29,6% de la muestra y los que ingresan entre 1.001 € y 2.000 € (28,9%). Hay un tercer grupo destacable que corresponde a ingresos superiores a 3.000 € con un 18,7%. Conviene añadir que no respondió a esta pregunta el 19,4% de la muestra.

En lo referente a la situación de las personas encuestadas en el proceso de compra-venta, la Tabla 2 muestra que la mayoría fueron compradores. Así, un 59% realizó una compra, un 20,9% una venta y un 15,5% una compraventa, es decir, participaron en ambos procesos. Además, un 4,9% de la muestra no llegó a finalizar el proceso.

Además, existen diferencias significativas entre las edades de los distintos perfiles de tal manera que los vendedores son más mayores que el resto de perfiles teniendo una media de 53 años. Los compradores, por ejemplo, tienen 42 años de media.

Para terminar, resulta destacable que el 95,8% de los encuestados recurrieron a la intermediación tradicional y tan sólo el 4,2% lo hizo a través de agencias online o *proptech*. Los motivos pueden ser varios. Por un lado, las principales proptech tienen su base de operaciones en la ciudad de Barcelona, mientras que la muestra recoge a población de toda España. Por otro, tienen un alto grado de especialización que no les permite una penetración rápida a nuevos mercados y, por tanto, generalmente se desarrollan de inicio en grandes ciudades que son mercados más transparentes (Choi et al., 2019). Otro motivo puede ser el expuesto por Fuster et al. (2019), quienes sugieren que muchos compradores no se sienten cómodos trabajando con agencias plenamente digitales. Hernández et al. (2021) de hecho señalan que dentro del sector existe un número importante de agentes que dudan de la relevancia e impacto que estas empresas online puedan tener. Además, no hay que olvidar que las primeras agencias online empezaron a operar en España en 2017, y esto también podría justificar su reducida cuota de mercado actual.

Si se comparan ambos tipos de agencia, el 46% de los clientes online son mujeres, no existiendo diferencias significativas con los clientes de agencia tradicional. La edad media del cliente online es de 43 años, no existiendo diferencias significativas con el cliente de agencia tradicional, quien tiene de media 46 años.

Conclusiones

La figura del agente inmobiliario está altamente demandada a pesar del proceso digitalizador al que se enfrenta el sector. No son simples intermediarios que mueven fragmentos de información sin relación alguna. Si esto fuera así, ya habrían desaparecido o estarían en proceso de desaparecer al igual que ha ocurrido en otros sectores como el de los agentes de viajes.

La muestra analizada refleja una población mayoritariamente activa, cualificada y con preferencia por métodos tradicionales para la intermediación inmobiliaria. La mayoría de las personas encuestadas opta por la intermediación tradicional como el canal preferido para llevar a cabo sus transacciones inmobiliarias, mientras que las agencias online o proptech tienen una presencia residual. A pesar del crecimiento de las plataformas digitales, su penetración aún es limitada en este sector. Esto sugiere que, a pesar del auge de la digitalización, los métodos convencionales mantienen una amplia aceptación entre la población.

Another reason, suggested by Fuster et al. (2019), is that many buyers are not comfortable working with fully digital agencies. Indeed, Hernández et al. (2021) point out that within the sector there are a significant number of agents who doubt the relevance and impact that these online companies can have. Moreover, it should not be forgotten that the first online agencies started operating in Spain in 2017, and this could also justify their current low market share.

Comparing both types of agency, 46% of online customers are women, with no significant differences with traditional agency customers. The average age of the online customer is 43 years old, with no significant differences with the traditional agency customer, who is on average 46 years old.

Conclusions

Real estate agents are in high demand despite the digitalisation process that the sector is undergoing. They are not mere intermediaries moving unrelated fragments of information. If this was the case, they would have already disappeared or would be in the process of disappearing, as has happened in other sectors such as travel agents.

The sample analysed reveals a largely active, qualified population with a preference for traditional methods for real estate intermediation. The majority of those surveyed choose traditional intermediation as the preferred channel for carrying out their real estate transactions, while online agencies or proptechs have a residual presence. Despite the growth of digital platforms, their market penetration is still limited in this sector. This suggests that, despite the rise of digitalisation, conventional methods remain widely accepted by the population.

BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

- Asensio-Soto, J. C. and Navarro Astor, E. «Proptech: A qualitative analysis of online real estate brokerage agencies in Spain.» *Intangible Capital,* Vol. 18 nº 3, (2022): 489-505. https://doi.org/10.3926/ic.2090
- Barresi, C. M. «The role of the real estate agent in residential location.» *Sociological focus,* Vol. 1 nº 4 (1968): 59-71.
- Benefield, J. D., Sirmans, C. S. and Sirmans, G. S. «Observable agent effort and limits to innovation in residential real estate. » *Journal of Real Estate Research,* Vol. 41 nº 1 (2019): 1-36. https://doi.org/10.1080/10835547.2019.12091517
- Blanco Carrasco, M. «El contrato de corretaje.*» Cuadernos de Derecho Registral*. Fundación Registral. Madrid (2008).
- Choi, J., Kaul, K. y Goodman, L. «FinTech innovation in the home purchase and financing market.» Washington, DC: Urban Institute (2019).
- Elder, H., Zumpano, L. and Baryla, E. «Buyer brokers: Do they make a difference? Their influence on selling price and search duration.» *Real Estate Economics*, 8 (2003): 337-362.
- Fuster, A., Plosser, M., Schnabl, P. and Vickery, J. «The Role of Technology in Mortgage Lending.» *The Review of Financial Studies*, Vol. 32 nº 5 (2019): 1854-1899.
- Gardès, N. «Digitalisation du secteur immobilier: la proposition de valeur phygitale au cœur de la performance. » *La Revue des Sciences de Gestion*, nº 299-300 (2019): 133-146.
- Gilbukh S, Goldsmith-Pinkhamhe P. «Heterogeneous Real Estate Agents and the Housing Cycle.» *Review of Financial Studies*, Vol. 37, Issue 11, November (2024): 3431–3489, https://doi.org/10.1093/rfs/hhae048
- Hernández, V., Puigdevall, A. y López Gustavo, A. «Revolución Proptech. Una reflexión sobre la transformación e innovación en el mercado inmobiliario.» Barcelona: Gestión 2000 (2021).
- Ledesma Ibañez, M. P «La intermediación inmobiliaria». *Cuadernos de Derecho Judicial*. Consejo General del Poder Judicial, Madrid (2008).
- Levitt, S. and Syverson, C. «Market distortions when agents are better informed: The value of information in real estate transactions»", *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 90 nº 4 (2008): 599-611.
- Nelson, S. and Nelson, T. «RESERV: An instrument for measuring real estate brokerage service quality»" *Journal of Real Estate Research*, Vol. 10 nº1 (1995): 99–113.
- Pacheco, V. H. «La intermediación inmobiliaria como elemento de seguridad jurídica en las transferencias inmobiliarias en el Perú». Universidad Peruana de las Américas (2015).

- Pai P-F, Wang W-C. «Using Machine Learning Models and Actual Transaction Data for Predicting Real Estate Prices.» *Applied Sciences* Vol. 10 nº 17 (2020): 5832. https://doi.org/10.3390/app10175832
- Palm, R. and Bolsen, T. « The Role of the Real Estate Agent. In: Housing Market Response to Sea-Level Rise in Florida», Coastal Research Library, Vol. 37 (2022): 53-65. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-88435-2_5.
- Santore, R. and Bruce, D. «Downward commission rate rigidity in the real estate services industry.» University of Tennessee Working Paper (2001).
- Seiler, V. L., Seiler, M., Winkler, D., Newell, G. and Webb, J. «Service quality dimensions in residential real estate brokerage» *Journal of Housing Research*, Vol. 17 nº. 2 (2008):.101-117, https://doi.org/10.1080/10835547.2008.12091995
  Seiler, V. L., and Reisenwitz, T. H. « A review of service quality research in real estate*», Journal of Real Estate Literature*, Vol. 18 nº 2 (2010): 225–238. http://www.jstor.org/stable/24884092.
- Talmatchi, M. «The implications of Proptech on the real estate brokerage. The case study of Dubai, United Arab Emirates.» *MSc Real Estate Investment and Financ*e from Heriot-Watt Universit (2020).
- Trio, O. and Iazzi, A. «Trust and distrust in the relationships between construction firms and real estate agents: Empirical evidence from Italy. » *International Journal of Technology Marketing*, Vol. 11 nº 4 (2016): 1-37, https://doi.org/10.5539/ijbm.v11n4p37.
- Wigand, R. T. «Whatever happened to disintermediation. », *Electronic Markets,* Vol. 30 nº 1, (2020): 39-47, https://doi.org/10.1007/S12525-019-00389-0
- Wilcox, J. y Forsyth, J. «Real Estate: the basics. Routledge.» Oxon (2022).
- Yáñez, R. «La intermediación inmobiliaria.» *Revista Crítica de Derecho Inmobiliario*, nº. 737 (2013): 1583-1623. https://www.revistacritica.es/rcdi/article/view/1817
- Zietz, E. and Sirmans, S. «Review articles: Real estate brokerage research in the new millennium.» *Journal of Real Estate Literature*, Vol. 19 nº 1 (2020): 3-40, https://doi.org/10.1080/10835547.2011.12090284.

RESOURCE MAPPING AND SMART GEOLOCATION: HARVEST MAP TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABILITY, ESG GOVERNANCE AND CIRCULAR ECONOMY

MAPEO DE RECURSOS Y GEOLOCALIZACIÓN INTELIGENTE: TECNOLOGÍAS HARVEST MAP PARA SOSTENIBILIDAD, GOBERNANZA ESG Y ECONOMÍA CIRCULAR

Ramiro Rodriguez Pérez
University Institute of Materials Technology. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n 46022 (Valencia, Spain) E-mail: rrodper@doctor.upv.es/Research Prof. Tecnologico Nacional de México ITechnological Institute of Ciudad Guzmán. Department of Earth Sciences Architecture. Av. Tecnológico 100, Mpio. de Zapotlán el Grande, Jalisco, México C.P. 49000 Mexico. e-mail: ramiro.rp@cdguzman.tecnm.mx

Javier Cárcel Carrasco
Instituto Universitario de Tecnología de Materiales. Universitat Politècnica de València I España I Camino de Vera s/n 46022 (Valencia, Spain) E-mail: fracarc1@csa.upv.es/University Institute of Materials Technology. Universitat Politècnica de València I España I Camino de Vera s/n 46022 (Valencia, Spain) E-mail: fracarc1@csa.upv.es

Fabiola Colmenero Fonseca
Investigadora en el Dpto. Arquitectura diseño y comunicación; Universidad Lasalle México, fabiola.colmenero@lasalle.mx. Instituto Universitario de Tecnología de Materiales. Universidad Politécnica de València; Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. University Institute of Materials Technology fcolfon@upvnet.upv.es

Juana Mercedes Perlaza Rodríguez
NOVAMANTO Consulting and Research. Principal Consultant and Founder I Italia I Via del Castello 17, 75100 Matera, Italia, www.novamanto.com. e-mail: info@novamanto.com

Kevin Alexander Echeverry Bucurú
University Institute of Materials Technology. Universitat Politècnica de València I España I Camino de Vera s/n 46022 (Valencia, Spain) E-mail: kaechbuc@doctor.upv.es

Abstract

The deployment of geolocation technologies for the optimization of resources has become a pivotal aspect of sustainability, responsible governance, and the circular economy. This study explores the potential of Harvest Map, an innovative tool that integrates geolocation with Environmental Sustainability, Social and Economic Governance (ESG), and Circular Economy criteria, for the mapping and efficient management of resources in pivotal sectors. The primary focus is on the construction sector, where resource optimization has a profound impact on reducing waste and enhancing operational efficiency.

By employing geospatial data and machine learning algorithms, dynamic resource maps were generated in real time, thereby identifying underutilized materials in buildings. In the construction sector, Harvest Map demonstrated a direct impact on waste reduction. A 25% reduction in material waste was achieved by identifying and reusing materials that were previously discarded, resulting in considerable economic savings for companies. Furthermore, the optimization of the distribution of these resources led to an optimization of purchasing and storage processes, reducing operating costs by 22%.

Furthermore, the tool enabled the establishment of closed-loop systems within the buildings, enabling the reuse of recycled materials in accordance with the tenets of the circular economy. This approach facilitated the incorporation of discarded materials, including metals, wood, and concrete, into new construction projects, contributing to a 30% reduction in the amount of waste generated by construction sites. Additionally, the environmental impact of these actions was reflected in an 18% reduction in the carbon footprint of the analyzed projects.

In conclusion, Harvest Map is positioned as an effective tool for the optimization of resources in construction, reducing waste, improving operational efficiency, and promoting the circular economy. These results highlight its potential not only to reduce costs in the sector, but also to promote

more sustainable and responsible practices in the construction industry, making it a replicable solution in other contexts and regions.

Keywords: geolocation, environmental sustainability, circular economy, ESG governance, and resource reuse.

Introducción

El uso de tecnologías de geolocalización para la optimización de recursos ha adquirido una gran relevancia en el ámbito de la sostenibilidad, la gobernanza responsable y la economía circular. Este estudio investiga el potencial de Harvest Map, una herramienta innovadora que combina geolocalización con criterios de Sostenibilidad Ambiental, Gobernanza Social y Económica (ESG), y Economía Circular, para mapear y gestionar eficientemente los recursos en sectores clave. El enfoque principal se centra en el sector de la construcción, donde la optimización de recursos tiene un impacto significativo en la reducción de desperdicios y la mejora de la eficiencia operativa.

El crecimiento urbano y la construcción demandan grandes cantidades de recursos cada vez más escasos y distantes de los centros urbanos, lo que incrementa el consumo energético, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y los impactos ambientales negativos (World Economic Forum, 2024). Las ciudades y sus infraestructuras representan una vasta reserva de materiales y componentes que, sin estrategias adecuadas, se convertirán en los residuos del futuro (Yang et al., 2022). En este contexto, herramientas como Harvest Map, basadas en la geolocalización, facilitan la catalogación y reutilización de materiales, promoviendo la economía circular y los principios ESG (ambiental, social y de gobernanza).

La lucha contra el cambio climático, impulsada por los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), el Acuerdo de París y el Pacto Verde Europeo, subraya la importancia de modelos sostenibles que maximicen el aprovechamiento de recursos y minimicen el desperdicio (The Sustainable Development Goals Report, 2023). Las políticas públicas y herramientas tecnológicas deben integrarse para abordar estos desafíos desde una perspectiva holística, promoviendo equidad social y eficiencia económica (Portocarrero et al., 2021).

Esta investigación propone reducir el desperdicio y optimizar procesos operativos mediante la reutilización y el reciclaje, alineados con la economía circular. La integración de plataformas colaborativas como Harvest Map y tecnologías basadas en datos geoespaciales y algoritmos de aprendizaje automático permite identificar materiales subutilizados en tiempo real, fomentando alianzas entre sectores públicos, privados y sociales. Estas estrategias no solo mitigan la huella de carbono de la construcción, sino que también maximizan el impacto de prácticas sostenibles en el marco de los principios ESG.

Introduction

The use of geolocation technologies for resource optimization has become highly relevant in the field of sustainability, responsible governance and circular economy. This study investigates the potential of Harvest Map, an innovative tool that combines geolocation with Environmental Sustainability, Social and Economic Governance (ESG), and Circular Economy criteria, to map and efficiently manage resources in key sectors. The main focus is on the construction sector, where resource optimization has a significant impact on reducing waste and improving operational efficiency.

Urban growth and construction demand large amounts of resources that are increasingly scarce and distant from urban centers, which increases energy consumption, greenhouse gas (GHG) emissions, and negative environmental impacts (World Economic Forum, 2024). Cities and their infrastructures represent a vast reservoir of materials and components that, without adequate strategies, will become the waste of the future (Yang et al., 2022). In this context, tools such as Harvest Map, based on geolocation, facilitate the cataloguing and reuse of materials, promoting the circular economy and ESG (environmental, social and governance) principles.

The fight against climate change, driven by the Sustainable Development Goals (SDGs), the Paris Agreement and the European Green Deal, underlines the importance of sustainable models that maximise the use of resources and minimise waste (The Sustainable Development Goals Report, 2023). Public policies and technological tools must be integrated to address these challenges from a holistic perspective, promoting social equity and economic efficiency (Portocarrero et al., 2021).

This research proposes to reduce waste and optimize operational processes through reuse and recycling, aligned with the circular economy. The integration of collaborative platforms such as Harvest Map and technologies based on geospatial data and machine learning algorithms makes it possible to identify underutilized materials in real time, fostering alliances between public, private and social sectors. These strategies not only mitigate the carbon footprint of construction, but also maximize the impact of sustainable practices within the framework of ESG principles.

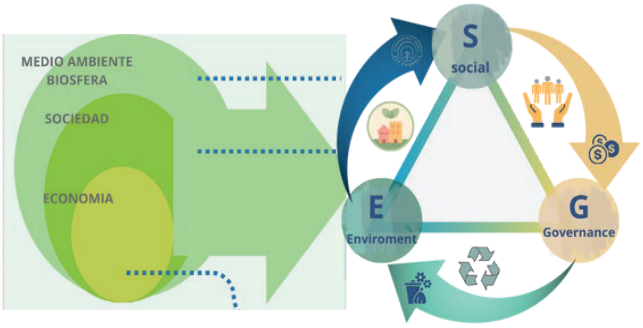


Imagen 1. ESG principios integrados a la sustentabilidad, elaboración propia
Image 1. ESG principles integrated into sustainability, own elaboration

Objetivos

El trabajo plantea como objetivo el Reducir el desperdicio de materiales y optimizar los procesos operativos mediante la reutilización y el reciclaje, alineados con los principios de la economía circular. Fomentar el uso de materiales reciclados para reducir la huella de carbono y los residuos generados por las obras de construcción. Además, desarrollar plataformas colaborativas basadas en datos geolocalizados que faciliten alianzas entre sectores gubernamentales, privados y sociales para así, transferir tecnología y conocimiento mediante mapas geoespaciales para maximizar el impacto de prácticas sostenibles, e Implementar tecnologías de geolocalización para mapear recursos subutilizados en sectores clave, con especial atención al sector de la construcción.

Ejes Centrales

Se pueden crear soluciones innovadoras y efectivas que promuevan un desarrollo más equitativo y sostenible a nivel global. Estos enfoques integran la tecnología y el análisis de datos con la planificación urbana y la gestión de recursos, fomentando una visión holística del desarrollo sostenible. Las políticas públicas en México, a través de la ley general de medio ambiente, y normativas existentes para el manejo RCDS como almacenaje, aprovechamiento recolección u disposición final utilizando la tecnología de geolocalización dentro del territorio basado en la minería urbana y manejo de RCDs. Imagen 2

Objectives

The objective of the work is to reduce material waste and optimize operational processes through reuse and recycling, in line with the principles of the circular economy. Encourage the use of recycled materials to reduce the carbon footprint and waste generated by construction works. In addition, develop collaborative platforms based on geolocalized data that facilitate partnerships between government, private and social sectors to transfer technology and knowledge through geospatial mapping to maximize the impact of sustainable practices, and Implement geolocation technologies to map underutilized resources in key sectors, with a special focus on the construction sector.

Central Axis

Innovative and effective solutions can be created that promote more equitable and sustainable development globally. These approaches integrate technology and data analysis with urban planning and resource management, fostering a holistic vision of sustainable development. Public policies in Mexico, through the general environmental law, and existing regulations for the management of MSW such as storage, use, collection and final disposal using geolocation technology within the territory based on urban mining and management of MSW. Image 2



Imagen 2. Procesos respetuosos con el medio ambiente Fuente: https://ulloaperu.com/wp-content/uploads/2016/04/ulloa-servicio-proceso-gestionintegral-02.jpg

Image 2. Environmentally friendly processes, source: https://ulloaperu.com/wp-content/uploads/2016/04/ulloa-servicio-proceso-gestionintegral-02.jpg

Plan Experimental

La estrategia efectiva de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y los principios de Sostenibilidad Ambiental, Gobernanza Social y Económica (ESG) representan acciones con un enfoque integral que fomente la cooperación de los diversos actores a nivel global, nacional y local. Esto comprende no solo identificar las necesidades específicas de cada dimensión ESG, sino también desarrollar estrategias creativas y sostenibles que integren la recuperación de recursos urbanos mediante la minería urbana, con el fin de promover un desarrollo más inclusivo, resiliente y equitativo.

La minería urbana, como estrategia que recupera materiales desechados o infrautilizados en las ciudades, se presenta como una solución innovadora para abordar los desafíos de sostenibilidad. A continuación, se describen las acciones clave y su vinculación con las dimensiones ESG, estas conforman una dimensión de sostenibilidad ambiental, para la reducción de residuos, la promoción de la salud ambiental e infraestructuras resilientes y sostenibles.

Experimental Plan

The effective strategy of the Sustainable Development Goals (SDGs) and the principles of Environmental Sustainability, Social and Economic Governance (ESG) represent actions with an integrated approach that fosters the cooperation of the various actors at the global, national and local levels. This includes not only identifying the specific needs of each ESG dimension, but also developing creative and sustainable strategies that integrate urban resource recovery through urban mining to promote more inclusive, resilient and equitable development.

Urban mining, as a strategy that recovers discarded or underutilized materials in cities, is presented as an innovative solution to address sustainability challenges. The key actions and their linkage to the ESG dimensions are described below, these form an environmental sustainability dimension, for waste reduction, environmental health promotion and resilient and sustainable infrastructure.

Metodología Integrada: Minería Urbana, ODS Y ESG

La minería urbana y los principios ESG se pueden operacionalizar a través de estrategias clave como las plataformas colaborativas, la transferencia tecnológica, el financiamiento innovador y herramientas como los harvest maps. Estas herramientas y enfoques son esenciales para facilitar la

descarbonización de las ciudades, fortalecer la cooperación multisectorial y promover la justicia social, económica y ambiental.

A continuación, se describe cómo estas estrategias se relacionan y potencian el impacto de la minería urbana en la sostenibilidad y el cumplimiento de los ODS:

Plataformas colaborativas: basadas en datos geolocalizados que faciliten la cooperación entre gobiernos, organizaciones y el sector privado, donde la descarbonización de las ciudades será de importancia para el cambio climático. Estas plataformas no solo facilitan la cooperación entre gobiernos, organizaciones y el sector privado, sino que también apoyan la descarbonización de las ciudades mediante la optimización de recursos y la reducción de residuos. Los principios ESG fortalece la colaboración y gobernanza social y la transparencia.

Transferencia de tecnología: Promover la transferencia de tecnología y conocimiento a través de alianzas estratégicas, utilizando mapas geoespaciales. Implementación en áreas urbanas, beneficios de la minería Urbana, mediante alianzas estratégicas y herramientas como los mapas geoespaciales, promoviendo su reutilización en áreas urbanas y proyectos sostenibles. Socialmente, fomenta la equidad al redistribuir recursos urbanos reutilizables hacia comunidades necesitadas.

Financiamiento colaborativo: Desarrollar mecanismos de financiamiento que utilicen datos geolocalizados para asegurar que los recursos se dirijan eficientemente a los proyectos y áreas que más los necesitan. Asegura que los recursos identificados a través de la minería urbana sean dirigidos hacia proyectos prioritarios, como infraestructuras educativas sostenibles, viviendas inclusivas o la mitigación de riesgos ambientales. El financiamiento innovador contribuye a la gobernanza económica mediante la eficiencia en la asignación de recursos.

Promoción de la Salud Ambiental: Utilizar harvest maps para identificar y mitigar zonas con alta concentración de materiales contaminantes y reubicar estos recursos de manera segura. Permiten identificar áreas urbanas con alta concentración de contaminantes o residuos mal gestionados. Esto posibilita la mitigación de riesgos ambientales y la recuperación segura de materiales que pueden ser reutilizados en nuevos proyectos. Responde directamente a la dimensión ambiental, mejorando la calidad del aire, suelo y agua en entornos urbanos, y promoviendo la resiliencia ecológica.

Infraestructura Educativa Sostenible: Implementar programas de reciclaje y reutilización de materiales en la construcción de escuelas, con la ayuda de harvest maps para localizar y obtener materiales sostenibles. Implementar programas de reciclaje y reutilización de materiales para la construcción de escuelas sostenibles fomenta la educación ambiental y el uso responsable de recursos. Al reducir residuos, mientras que fortalece la dimensión social al invertir en educación inclusiva y equitativa.

Vivienda Inclusiva: Desarrollar políticas de urbanismo que utilicen los harvest maps para redistribuir materiales de construcción, enfocándose en mejorar las viviendas de comunidades vulnerables. Redistribuir materiales de construcción favorece la creación de viviendas asequibles y de calidad en comunidades vulnerables, contribuyendo a reducir las desigualdades urbanas. Los beneficios de la minería urbana lleguen a quienes más lo necesitan.

Transparencia y Participación Ciudadana: Utilizar harvest maps para crear sistemas transparentes de distribución de materiales y permitir la participación ciudadana en la planificación urbana. La transparencia en la gestión y distribución de recursos urbanos, permiten a las comunidades participar activamente en la toma de decisiones. La transparencia y la participación ciudadana son fundamentales para una gobernanza social efectiva, y la justicia social.

Justicia en la Distribución de Recursos: Implementar políticas que aseguren que los recursos identificados a través de harvest maps beneficien equitativamente a todas las comunidades, evitando la marginalización. Políticas que aseguren una distribución equitativa de los recursos, promoviendo la equidad y la inclusión, al tiempo que garantiza un uso eficiente de los recursos, alineado con las dimensiones económica y ambiental.

Colaboración Multisectorial : La implementación de harvest maps requiere la colaboración entre gobiernos, empresas y comunidades. La colaboración entre gobiernos, empresas, instituciones académicas y comunidades. Fomenta la gobernanza social y económica mediante la cooperación multisectorial y la creación de políticas alineadas con los ODS.

Recursos y Tecnología: Necesidad de tecnología avanzada y recursos financieros para desarrollar y mantener sistemas de geolocalización y Harvest Map efectivos. Estas herramientas son esenciales para gestionar los recursos urbanos de manera eficiente y sostenible. La minería urbana fortalece la sostenibilidad ambiental, mientras que los beneficios económicos y sociales derivados de su implementación refuerzan las otras dimensiones del ESG.

Integrated Methodology: Urban Mining, SDGs and ESG

Urban mining and ESG principles can be operationalized through key strategies such as collaborative platforms, technology transfer, innovative financing, and tools such as harvest maps. These tools and approaches are essential to facilitate the decarbonization of cities, strengthen multisectoral cooperation, and promote social, economic, and environmental justice.

Below is a description of how these strategies relate to and enhance the impact of urban mining on sustainability and the fulfillment of the SDGs:

Collaborative platforms: based on geolocated data that facilitate cooperation between governments, organizations and the private sector, where the decarbonization of cities will be of importance for climate change. These platforms not only facilitate cooperation between governments, organizations and the private sector, but also support the decarbonization of cities by optimizing resources and reducing waste. ESG principles strengthen collaboration and social governance and transparency.

Technology Transfer: Promote the transfer of technology and knowledge through strategic partnerships, using geospatial maps. Implementation in urban areas, benefits of urban mining, through strategic alliances and tools such as geospatial maps, promoting their reuse in urban areas and sustainable projects. Socially, it fosters equity by redistributing reusable urban resources to communities in need.

Collaborative financing: Develop financing mechanisms that use geolocated data to ensure that resources are efficiently directed to the projects and areas that need them most. It ensures that the resources identified through urban mining are directed towards priority projects, such as sustainable educational infrastructure, inclusive housing or the mitigation of environmental risks. Innovative financing contributes to economic governance through efficient resource allocation.

Environmental Health Promotion: Use harvest maps to identify and mitigate areas with high concentrations of polluting materials and relocate these resources safely. They allow the identification of urban areas with a high concentration of pollutants or poorly managed waste. This makes it possible to mitigate environmental risks and safely recover materials that can be reused in new projects. It responds directly to the environmental dimension, improving air, soil and water quality in urban environments, and promoting ecological resilience.

Sustainable Educational Infrastructure: Implement recycling and reuse programs of materials in the construction of schools, with the help of harvest maps to locate and obtain sustainable materials. Implementing recycling and reuse programs of materials for the construction of sustainable schools promotes environmental education and the responsible use of resources.

By reducing waste, while strengthening the social dimension by investing in inclusive and equitable education.

Inclusive Housing: Develop urban planning policies that use harvest maps to redistribute construction materials, focusing on improving the housing of vulnerable communities. Redistributing construction materials favors the creation of affordable and quality housing in vulnerable communities, contributing to reducing urban inequalities. The benefits of urban mining reach those who need it most.

Transparency and Citizen Participation: Use harvest maps to create transparent systems for distributing materials and enable citizen participation in urban planning. Transparency in the management and distribution of urban resources allows communities to actively participate in decision-making. Transparency and citizen participation are fundamental for effective social governance, and social justice.

Justice in Resource Distribution: Implement policies that ensure that resources identified through harvest maps equitably benefit all communities, avoiding marginalization. Policies that ensure an equitable distribution of resources, promoting equity and inclusion, while guaranteeing an efficient use of resources, aligned with the economic and environmental dimensions.

Multi-Sector Collaboration: Implementing harvest maps requires collaboration between governments, businesses, and communities. Collaboration between governments, businesses, academic institutions and communities. It fosters social and economic governance through multisectoral cooperation, and the creation of policies aligned with the SDGs.

Resources and Technology: Need for advanced technology and financial resources to develop and maintain effective geolocation and Harvest Map systems. These tools are essential for

managing urban resources efficiently and sustainably. Urban mining strengthens environmental sustainability, while the economic and social benefits derived from its implementation reinforce the other dimensions of ESG.

Resultados

En el sector de la construcción, Harvest Map demostró un impacto directo en la reducción de desperdicios. Se logró reducir un 25% del desperdicio de materiales mediante la identificación y reutilización de materiales que anteriormente eran descartados, lo que resultó en un ahorro económico considerable para las empresas. Además, la eficiencia en la distribución de estos recursos permitió una optimización en los procesos de compra y almacenamiento, reduciendo un 22% los costos operativos. La herramienta también facilitó la creación de estrategias dentro de las edificaciones, permitiendo la reutilización de materiales reciclados, lo que se alinea con los principios de la economía circular. Este enfoque permitió que los materiales desechados, como metales, madera y concreto, fueran reincorporados en nuevas construcciones, contribuyendo a una reducción del 30% en la cantidad de residuos generados por las obras. Además, el impacto ambiental de estas acciones se reflejó en una disminución del 18% en la huella de carbono de los proyectos analizados.

Harvest Map

Es una herramienta que ayuda a la geolocalización de los materiales en un entorno especifico y que aporta a la gestión de los RCDs, aminorando el impacto ambiental y generando un escenario sustentable y con una visión económica desde circularidad. Esta tecnología permite la geolocalización de los materiales en tiempo real adoptando un modelo de consumo inteligente en el manejo y cuidado del medio ambiente como se muestra en la imagen 3, 4.

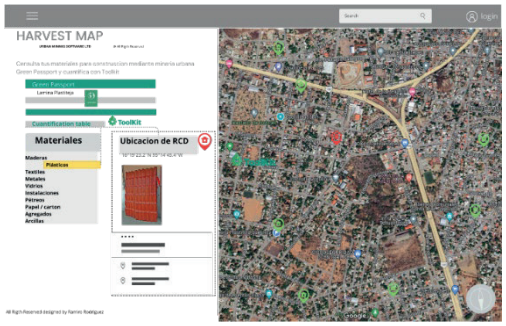


Imagen 3. Prototipo Harvest Map, material lamina fuente: elaboración propia
Image 3. Harvest Map Prototype, laminated material, source: own development

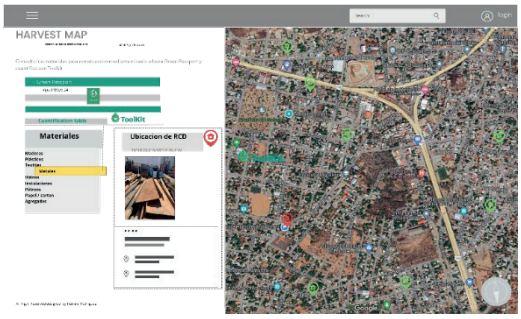


Imagen 4. Prototipo Harvest Map, material viga de acero, fuente: elaboración propia
Image 4. Harvest Map Prototype, steel beam material, source: own development

Resultados y principios de la ESG

La integración de estrategias sostenibles en entornos urbanos requiere adoptar principios alineados con los ODS y la Gobernanza Ambiental, Social y Económica (ESG). A continuación, se presentan los principales resultados y principios:

1. Optimización de Recursos

El uso de tecnologías de geolocalización y herramientas avanzadas de análisis de datos permite la optimización en la gestión de recursos urbanos. Estas herramientas deben ser eficientes en cuanto al consumo de energía, reduciendo los costos operativos y disminuyendo el impacto ambiental. Contribuye a la identificación y recuperación de materiales, apoyando los principios de economía circular (Graedel & Allenby, 2015).

2. Métodos de Baja Contaminación

La implementación de técnicas de recolección de datos debe minimizar la interferencia en los ecosistemas urbanos. Esto incluye sensores no invasivos y métodos de monitoreo ambiental que respeten la biodiversidad urbana (Takahashi et al., 2020).

3. Evaluación de Impactos Ambientales

La recolección y análisis de datos de geolocalización es fundamental para la planificación urbana sostenible. Estas evaluaciones permiten anticipar posibles impactos ambientales y sociales

derivados de proyectos urbanos, promoviendo decisiones más informadas y responsables (UNEP, 2021).

4. Tecnologías Limpias

La operatividad eficiente de los sistemas urbanos debe estar basada en el uso de energías limpias y renovables. Esto incluye la electrificación de equipos y procesos mediante fuentes de energía solar, eólica o biomasa, lo cual refuerza los objetivos de descarbonización y neutralidad climática en las ciudades (IPCC, 2022).

5. Accesibilidad Universal

El diseño de infraestructuras urbanas debe garantizar que los espacios sean accesibles para todas las personas, incluyendo aquellas con discapacidades. La accesibilidad universal no solo mejora la calidad de vida, sino que también fomenta ciudades inclusivas y resilientes (UN-Habitat, 2020).

6. Participación Ciudadana

El involucramiento de la comunidad en la planificación y diseño de proyectos urbanos es esencial para garantizar la aceptación y legitimidad de las iniciativas. Los harvest maps, por ejemplo, pueden ser utilizados para fomentar la transparencia y la participación de la ciudadanía en el manejo de recursos (Arnstein, 1969).

7. Equidad

La equidad social debe ser un principio rector en el desarrollo urbano. Esto implica considerar las necesidades de todos los grupos sociales, evitando la gentrificación y promoviendo la diversidad. La implementación de políticas inclusivas garantiza que los beneficios del desarrollo urbano se distribuyan equitativamente entre todas las comunidades (Raworth, 2017).

8. Regulaciones y Políticas

Es fundamental la implementación de regulaciones y políticas públicas que fomenten prácticas sostenibles en la construcción y el desarrollo urbano. Estas políticas deben estar respaldadas por datos geolocalizados para garantizar la asignación eficiente de recursos y la planificación estratégica de proyectos (OECD, 2021).

9. Transparencia

Una comunicación clara y abierta sobre las decisiones y procesos relacionados con la planificación urbana fomenta la confianza entre los diferentes actores. Las plataformas colaborativas basadas en datos geoespaciales son herramientas clave para promover la transparencia en la gestión de recursos (World Economic Forum, 2022).

10. Colaboración Público-Privada

El trabajo conjunto entre gobiernos, empresas y la sociedad civil es indispensable para lograr objetivos sostenibles. Las alianzas estratégicas permiten maximizar los recursos, el financiamiento y la transferencia de tecnología para el desarrollo de infraestructuras sostenibles y resilientes (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

ESG Results and Principles

The integration of sustainable strategies in urban environments requires adopting principles aligned with the SDGs and Environmental, Social and Economic Governance (ESG). The main findings and principles are presented below:

1. Resource Optimization

The use of geolocation technologies and advanced data analysis tools allows optimization in the management of urban resources. These tools must be efficient in terms of energy consumption, reducing operating costs and reducing environmental impact. It contributes to the identification and recovery of materials, supporting the principles of circular economy (Graedel & Allenby, 2015).

2. Low Pollution Methods

The implementation of data collection techniques should minimize interference with urban ecosystems. This includes non-invasive sensors and environmental monitoring methods that respect urban biodiversity (Takahashi et al., 2020).

3. Environmental Impact Assessment

The collection and analysis of geolocation data is critical to sustainable urban planning. These assessments make it possible to anticipate possible environmental and social impacts derived from urban projects, promoting more informed and responsible decisions (UNEP, 2021).

4. Clean Technologies

The efficient operation of urban systems must be based on the use of clean and renewable energies. This includes the electrification of equipment and processes through solar, wind or biomass

energy sources, which reinforces the objectives of decarbonisation and climate neutrality in cities (IPCC, 2022).

5. Universal Accessibility

The design of urban infrastructure must ensure that spaces are accessible to all people, including those with disabilities. Universal accessibility not only improves quality of life, but also fosters inclusive and resilient cities (UN-Habitat, 2020).

6. Citizen Participation

Community involvement in the planning and design of urban projects is essential to ensure the acceptance and legitimacy of initiatives. Harvest maps, for example, can be used to promote transparency and citizen participation in resource management (Arnstein, 1969).

7. Fairness

Social equity must be a guiding principle in urban development. This involves considering the needs of all social groups, avoiding gentrification and promoting diversity. Implementing inclusive policies ensures that the benefits of urban development are equitably distributed among all communities (Raworth, 2017).

8. Regulations and Policies

The implementation of regulations and public policies that promote sustainable practices in construction and urban development is essential. These policies should be supported by geolocated data to ensure efficient allocation

Conclusiones

La herramienta Harvest Map, integrada con los principios ESG y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), se presenta como una solución innovadora para impulsar el desarrollo urbano sostenible. Su capacidad para transformar las ciudades en espacios más resilientes, inclusivos y sostenibles la posiciona como un catalizador clave en esta transición. Además, su alineación con la economía circular mejora la eficiencia operativa y económica, destacando su impacto positivo en la industria de la construcción.

Este enfoque combina tecnología, como la geolocalización, con estrategias colaborativas multisectoriales, promoviendo la regeneración urbana, la cohesión social y el establecimiento de modelos replicables en diversas regiones. A través de la minería urbana, respaldada por plataformas como Harvest Map, se fomenta la cooperación entre gobiernos, empresas, academia y sociedad civil, impulsando prácticas más responsables, éticas y sostenibles.

La herramienta también facilita la creación de circuitos cerrados para la reutilización de materiales reciclados como madera, metales y concreto, lo que refuerza su compromiso con la economía circular. Esto no solo reduce costos y mitiga el impacto ambiental, sino que también consolida a Harvest Map como una solución estratégica para transformar la industria de la construcción a nivel global, beneficiando tanto a las empresas como al medio ambiente.

Conclusions

The Harvest Map tool, integrated with ESG principles and the Sustainable Development Goals (SDGs), is presented as an innovative solution to drive sustainable urban development. Its ability to transform cities into more resilient, inclusive and sustainable spaces positions it as a key catalyst in this transition. In addition, its alignment with the circular economy improves operational and economic efficiency, highlighting its positive impact on the construction industry.

This approach combines technology, such as geolocation, with multi-sector collaborative strategies, promoting urban regeneration, social cohesion and the establishment of replicable models in various regions. Through urban mining, supported by platforms such as Harvest Map, cooperation between governments, companies, academia and civil society is fostered, promoting more responsible, ethical and sustainable practices.

The tool also facilitates the creation of closed loops for the reuse of recycled materials such as wood, metals and concrete, reinforcing its commitment to the circular economy. This not only reduces costs and mitigates environmental impact, but also consolidates Harvest Map as a strategic solution to transform the global construction industry, benefiting both companies and the environment.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

Arnstein, S. R. (1969). A Ladder Of Citizen Participation. *Journal of the American Planning Association*, *35*(4). https://doi.org/10.1080/01944366908977225

Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, *33*(5). https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124

Dubey, R., Gunasekaran, A., Childe, S. J., Papadopoulos, T., & Helo, P. (2019). Supplier relationship management for circular economy: Influence of external pressures and top management commitment. *Management Decision*, *57*(4). https://doi.org/10.1108/MD-04-2018-0396

Ellen MacArthur Foundation. (2019, June 1). *Cities and circular economy for food*. Ellen MacArthur Foundation. https://ellenmacarthurfoundation.org

Frishammar, J., & Parida, V. (2019). Circular business model transformation: A roadmap for incumbent firms. *California Management Review*, *61*(2). https://doi.org/10.1177/0008125618811926

Graedel, T. E., & Eckelman, M. J. (2023). Industrial Ecology and Sustainable Engineering Concepts. In *Industrial Ecology and Sustainability*. https://doi.org/10.1142/9789811277610_0004

Gupta, S., Chen, H., Hazen, B. T., Kaur, S., & Santibañez Gonzalez, E. D. R. (2019). Circular economy and big data analytics: A stakeholder perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, *144*. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.06.030

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022, June 12). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/

Portocarrero, L., Morató, J., Quintero, R., & Vanegas, J. (2021). Gobernanza y sostenibilidad: dos conceptos para el impulso de la gestión pública eficiente. *Revista de Estudios Políticos y Estratégicos*, *9*(1).

Studies, O. U. (2020). The Circular Economy in Cities and Regions: Synthesis Report Paris. *OECD Publishing Retrieved November*, *27*.

World Economic Forum. (2022). *Financing the transition to a circular economy*. World Economic Forum. https://www.weforum.org/

World Economic Forum. (2024, December 11). *Climate hazards will slash 7% off corporate earnings annually by 2035, research warns*. https://www.weforum.org/press/2024/12/climate-hazards-will-slash-7-off-corporate-earnings-annually-by-2035-research-warns/

Yang, X., Hu, M., Zhang, C., & Steubing, B. (2022). Urban mining potential to reduce primary material use and carbon emissions in the Dutch residential building sector. *Resources, Conservation and Recycling*, *180*. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106215

ANÁLISIS DE LA VIVIENDA MINERA EN ESPAÑA. ESTUDIO PARA LA CONVERSIÓN EN PARQUE ENERGÉTICAMENTE EFICIENTE

ANALYSIS OF MINING HOUSING IN SPAIN. STUDY FOR CONVERSION INTO AN ENERGY-EFFICIENT HOUSING PARK

Aurora Martínez-Corral
Ph. D. Investigadora en el Instituto Universitario de Tecnología de Materiales (IUTM) y profesora del Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Universitat Politècnica de Valencia (UPV). E-mail: aumarcor@csa.upv.es
Ph.D. Researcher at the University Institute of Materials Technology (IUTM) and a professor in the Department of Architectural Constructions. Universitat Politècnica de Valencia (UPV). E-mail: aumarcor@csa.upv.es
Domingo Cuéllar
Ph. D. en Historia y Especialista en Transportes, profesor de Historia Económica e Historia del Pensamiento Económico en la Universidad Rey Juan Carlos. E-mail: domingo.cuellar@urjc.es.
PhD. in History and Specialist in Transport, he is a professor of Economic History and History of Economic Thought at the Universidad Rey Juan Carlos. E-mail: domingo.cuellar@urjc.es.

Abstract

This article presents a study of mining housing in Spain built during the Franco regime. The analysis is focused on three fronts: on the one hand, the legislation and regulations in force during the period under study, on the other hand, the urban planning situation and land development, and finally, the construction characteristics, materials and pathologies of the dwellings. The main objective of the study is to make a diagnosis of the current state of this large housing stock, more than 23,000 registered, which is still in use and which, due to the current lack of housing in the country, its rehabilitation would allow for the possibility of having a greater number of affordable rental housing as well as favouring the revitalisation of urban centres in pursuit of a more sustainable way of life.

Keywords
Social housing, building materials, constructive details, Spain

Introducción

Los datos que presentamos recogen dos hechos que son significativos para entender el desarrollo inmobiliario reciente en España. Por un lado, la construcción de vivienda vivirá un primer periodo expansivo durante el desarrollismo franquista, mostrando las carencias del periodo autárquico, e incluso del denominado decenio bisagra. El ritmo de construcción posterior no decaerá demasiado, e iniciará un nuevo periodo de expansión, ya en el nuevo milenio. Por otro lado, la promoción de vivienda con financiación o protección pública será dominante durante el franquismo (sin restar relevancia al sector privado, venta por pisos, autoconstrucción, etc.), pero decaerá desde 1980 (por debajo del 20%) hasta la marginalidad actual (4-5%).

Desde el punto de vista regulatorio, se distinguen tres etapas surgidas de los cambios legislativos de las leyes sobre vivienda: 1939 (vivienda protegida y creación del INV y OSH), 1954 (renta limitada y ley del suelo), y 1963-1968 (viviendas de protección oficial y creación de normas técnicas y constructivas de mayor obligación y cumplimiento). La ley de 19 de enero de 1939 respondía tanto a los deseos del régimen, a través de Falange, de implantar políticas paternalistas que tenían en la vivienda y la familia un elemento ideológico esencial, como a los graves problemas que se arrastraban de acceso a la vivienda de los años precedentes y de la pérdida de inmuebles durante la guerra civil. Junto a esta ley se creaba el Instituto Nacional de la Vivienda como órgano regulador en la promoción de viviendas sociales, papel que debía corresponder a la Obra Sindical del Hogar y la Arquitectura; todo esto estaba encuadrado dentro del Ministerio del Trabajo. El sistema se sostenía en la financiación de las viviendas a través de institutos públicos (Instituto Nacional de la Vivienda e Instituto Nacional de Previsión, 20+20 años), que aportaban el 90% del coste mediante anticipos sin interés y préstamos a bajo interés (3,5%). El 10% restante debía ser aportado por el promotor a través del valor del suelo o cantidad equivalente. La ley de 15 de julio de 1954 buscaba unificar y reorganizar la abundancia de tipos de viviendas y sus diferentes particularidades, que generaban enorme confusión. También fue un modo de impulsar la promoción privada, con apoyo oficial, mediante la simplificación del proceso administrativo y la aplicación de mayores ayudas, exenciones y subvenciones a promotores y a compradores. La nueva ley del suelo y de ordenación urbana (1956) y la creación del Ministerio de la Vivienda (1957) serán también dos momentos relevantes. La financiación de las viviendas se haría ahora con la subvención a fondo perdido de 30.000 ptas. para promotores y compradores, y la presencia de cajas de ahorros, banca pública y banca privada comercial, en menor medida, que realizarán los préstamos a las empresas promotoras, o en el caso de las cooperativas, a los trabajadores, que en muchos casos encontrarán el aval de sus empresas. Poco a poco el sector privado entraba en la promoción de vivienda social, donde ya encontraba rentabilidad y había evidentes facilidades administrativas a través de los planes generales de urbanización que había propiciado la nueva ley del suelo.

La recopilación de leyes y decretos de vivienda de 1963 y su texto refundido de 1968 dio paso a un nuevo tipo, la vivienda de protección oficial, que seguía las pautas de la ley de 1954, pero que ahora iba a contar con una regulación técnica y constructiva mayor, y sobre todo más específica y con mayor capacidad de cumplimiento. Como hemos visto en la gráfica anterior es el decenio más productivo de la historia de España con más 3 millones de viviendas construidas. El balance a modo de reconocimiento de fracaso se indicaba en el preámbulo del RDL 12/1976, donde se a "las clases medias y altas como tenedoras de las viviendas sociales", además de constatar la implantación de "la especulación del suelo urbano y la vivienda como bien mercantil", sin que las abundantes subvenciones a fondo perdido y financiaciones a bajo tipo de interés hayan evitado el resultado final.

Introduction

Our data include two significant facts for understanding recent real estate development in Spain. On the one hand, housing construction experienced a first expansive period during Franco's developmentalism, showing the autarkic period's shortcomings, and even the so-called hinge decade. The pace of subsequent construction will not slow down too much, and a new period of expansion will begin, already in the new millennium. On the other hand, the promotion of housing with public financing or protection was dominant during the Franco regime (without detracting from the relevance of the private sector, sale by flats, self-construction, etc.), but it declined from 1980 (below 20%) to the current marginality (4-5%).

From the regulatory point of view, three stages can be distinguished because of the legislative changes in the housing laws: 1939 (subsidised housing and the creation of the INV and OSH), 1954 (limited rent and land law), and 1963-1968 (subsidised housing and the creation of technical and construction standards of greater obligation and compliance). The law of 19 January 1939 responded both to the wishes of the regime, through the Falange, to implement paternalistic policies that had housing and the family as an essential ideological element, and to the serious problems that dragged on in access to housing in previous years and the loss of real estate during the civil war. Together with this law, the National Housing Institute was created as a regulatory body in the promotion of social housing, a role that should correspond to the Work of the Home and Architecture Union; all this was framed within the Ministry of Labor. The system was based on the financing of housing through public institutes (National Housing Institute and National Welfare Institute, 20+20 years), which contributed 90% of the cost through interest-free advances and low-interest loans (3.5%). The remaining 10% had to be contributed by the developer through the value of the land or an equivalent amount. The law of 15 July 1954 sought to unify and reorganise the abundance of types of housing and their different particularities, which generated enormous confusion. It was also a way to promote private development, with official support, by simplifying the administrative process and applying greater aid, exemptions and subsidies to developers and buyers. The new Land and Urban Planning Law (1956) and the creation of the Ministry of Housing (1957) were also two important moments. The financing of the homes would now be done with the non-refundable subsidy of 30,000 pesetas for developers and buyers, and the presence of savings banks, public banks and private commercial banks, to a lesser extent, which will make the loans to the developer companies, or in the case of cooperatives, to the workers, who in many cases will find the guarantee of their companies. Little by little, the private sector entered the development of social housing, where it was already profitable and there were obvious administrative facilities through the general urbanization plans that had been brought about by the new land law.

The compilation of housing laws and decrees of 1963 and its revised text of 1968 gave way to a new type, social housing, which followed the guidelines of the 1954 law, but which now had greater technical and constructive regulation, and above all more specific and with greater capacity for compliance. As we have seen in the graph above, it is the most productive decade in the history of Spain with more than 3 million homes built. The balance sheet by way of acknowledgment of failure was indicated in the preamble to RDL 12/1976, where "the middle and upper classes as holders of social housing" were mentioned, in addition to noting the implementation of "speculation in urban land and housing as a commercial good", without the abundant non-repayable subsidies and financing at low interest rates having prevented the result.

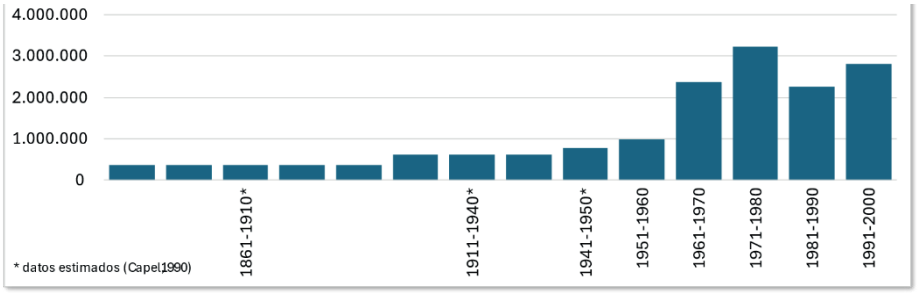


Figura 1. Viviendas construidas en España (1861-2000). E. Propia
Figure 1. Homes built in Spain. Own Elaboration.

Planificación de vivienda minera

Los datos adjuntos (figura 2) nos muestran que el grueso de la construcción de la vivienda objeto de nuestro estudio se produjo entre 1949 y 1958 (70%) y que el gran promotor fue el Estado a través del INV y la OSH. Son resultados provisionales, pero ofrecen una primera radiografía de gran interés. Dentro de las empresas industriales que figuran como promotoras de vivienda hemos incluido también tres grupos: minería, siderurgia y metalurgia. Muchos grupos metalúrgicos y siderúrgicos tenían potentes divisiones mineras que hacen muy difícil separar cuando la construcción estaba destinada a mineros, a empleados de taller, a administrativos, etc. Empresas como RCAM pueden ser identificadas como grupo minero, si bien, tras una primera etapa dedicada solo a extracción de carbón en las proximidades de Arnao, se centró en la producción metalúrgica, aunque mantuvo la explotación de algunas minas de carbón en Asturias y la mina de Zinc en Reocín (Cantabria). Como estos podríamos poner muchos ejemplos (ENSIDESA en Avilés, ENCASO en Puertollano, entre otros).

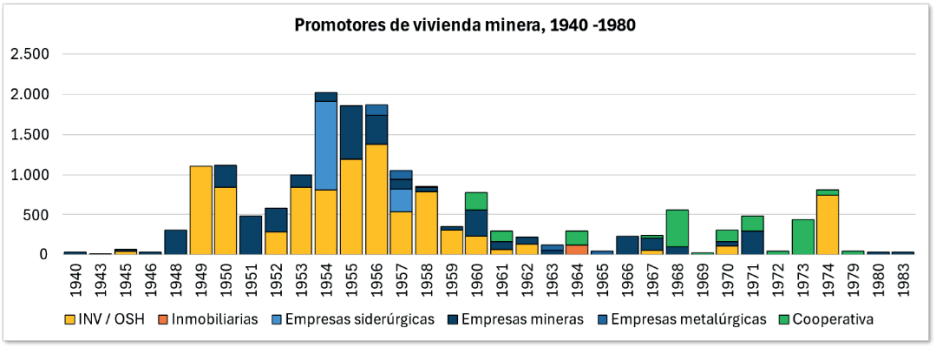


Figura 2. Promotores de vivienda minera en España (1940-1980). Elaboración propia.
Figure 2. Developers of mining housing in Spain (1940-1980). Own elaboration.

La relevancia del INV y de la OSH salta a la vista de los datos. La promoción de vivienda por parte de las empresas ya se recogía en la ley de 1939 y fue objeto de un decreto específico en 1944 donde las empresas debían destinar el 20% de sus reservas financieras a fines sociales (con mención especial a la construcción de viviendas), en empresas de más de 50 trabajadores. Posteriormente, en 1955 se volvería a incidir en esta obligación. Sin embargo, las empresas demoraron todo lo que pudieron este mandato y, salvo excepciones, no fueron grandes promotores de vivienda (ENCASO y ENSIDESA construyeron más de un millar de viviendas, y en menor escala, Hullera Vasco Leonesa, Aluminio Ibérico, Rio Tinto Patiño, Altos Hornos de Vizcaya o Real Compañía Asturiana de Minas, levantaron entre 300 y 500 viviendas para sus empleados).

Ante las carencias de vivienda, especialmente en los cotos mineros carboníferos de Asturias, León y Teruel, el BOE entre 1944 y 1954 publicó varios encargos al INV para la construcción de esas viviendas. También en la montaña palentina (Barruelo de Santullán) y Sierra Morena (Peñarroya-Pueblonuevo y Puertollano) se realizaron viviendas por parte del INV. Estas viviendas, una vez construidas, eran entregadas a las empresas mineras, que serían las encargadas de su mantenimiento y reparación, y también de tramitar el cobro mensual de la cuota de amortización, para devolver los anticipos y préstamos (20 + 20 años), momento en el que pasaban a ser propietarios. Como reconocían sus responsables, el INV no se había configurado para la gestión de miles de viviendas (para ser casero, en definitiva), por lo que este sistema le liberaba de tal obligación y le permitía dedicarse a la gestión de la promoción que debía hacer la OSH.

Respecto a la tenencia es muy interesante la evolución, desde las promociones en régimen de alquiler de los primeros años, a la introducción progresiva del sistema de amortización (obligado el INV a desprenderse de la gestión de miles de viviendas, por ejemplo, en los valles mineros), y ya en la década de 1970 la generalización de las promociones de cooperativas en propiedad, que ya compartían relevancia con el mercado de promotores privados, venta por pisos, que afrontaban inversiones de alta rentabilidad en los suelos recién calificados por los ayuntamientos y que suplían al Estado en la promoción de viviendas.

Mining Housing Planning

The attached data (Figure 1) show us that the bulk of the construction of the house under study took place between 1949 and 1958 (70%) and that the main promoter was the State through the INV and the OSH, although this will have to be explained later. These are provisional results, but they offer a first x-ray of great interest. Within the industrial companies that appear as housing developers we have also included three groups: mining, steel and metallurgy. Many metallurgical and steel groups had powerful mining divisions that make it very difficult to separate when the construction was intended for miners, workshop employees, administrative staff, etc. Companies such as RCAM can be identified as a mining group, although, after an initial stage dedicated only to coal extraction in the vicinity of Arnao, it focused on metallurgical production, although it maintained the exploitation of some coal mines in Asturias and the zinc mine in Reocín (Cantabria), in the vicinity of which the unique town of Puente de San Miguel was built. We could give many examples like these (ENSIDESA in Avilés, ENCASO in Puertollano among others).

The relevance of the INV and the OSH is obvious from the data. The promotion of housing by companies was already included in the 1939 law and was the subject of a specific decree in 1944 where companies had to allocate 20% of their financial reserves to social purposes (with special mention to the construction of housing), in companies with more than 50 workers. Subsequently, in 1955, this obligation would be stressed again. However, the companies delayed this mandate as long as they could and, with few exceptions, they were not large housing developers (ENCASO and ENSIDESA built more than a thousand homes, and on a smaller scale, Hullera Vasco Leonesa, Aluminio Ibérico, Rio Tinto Patiño, Altos Hornos de Vizcaya or Real Compañía Asturiana de Minas, built between 300 and 500 homes for their employees).

Faced with the lack of housing, especially in the coal mining reserves of Asturias, León and Teruel, the BOE between 1944 and 1954 published several orders to the INV for the construction of these houses. Also, in the mountains of Palencia (Barruelo de Santullán) and Sierra Morena (Peñarroya-Pueblonuevo and Puertollano) houses were built by the INV. These homes, once built, were handed over to the mining companies, which would oversee their maintenance and repair, and of processing the monthly collection of the repayment fee, to repay the advances and loans (20 + 20 years), at which time they became owners. As those in charge acknowledged, the INV had not been configured to manage thousands of homes (to be homemade, in short), so this system freed it from this obligation and allowed it to dedicate itself to the management of the development that the OSH had to do.

Regarding tenure, the evolution from the rental developments of the first years, to the progressive introduction of the amortization system (forced by the INV to divest itself of the management of thousands of homes, for example, in the mining valleys), and already in the 1970s the generalization of the promotions of owned cooperatives, is very interesting. which already shared relevance with the market of private developers, sale by flats, who faced high-profitability investments in the land recently qualified by the municipalities and which supplied the State in the development of housing.

Tabla 1. Resumen construcción vivienda minera en España (1940-1980). Elaboración propia.
Table 1. Summary of construction of mining housing in Spain (1940-1980). Own elaboration.

Grupo promotor	N.º viviendas	N.º promociones	N.º municipios
INV / OSH	12.485	80	57
Empres. mineras	5.435	77	34
Cooperativas	2.676	28	17
Empres. siderúrgicas	1.390	2	2
Empres. metalúrgicas	711	8	7
Inmobiliarias	120	1	1
Pendientes asign.	321	8	8
Totales	23.138	204	99*

Características edificatorias

La construcción de vivienda minera partía de una gran demanda (movilización del factor trabajo con urgencia a los cotos puestos en explotación) y de la ubicación en zonas alejadas de grandes núcleos, a lo sumo a las afueras de poblaciones pequeñas y medianas, en zonas montañosas y con dificultades en el acceso. Esto diferencia a la vivienda minera de las construidas en los entornos urbanos de medianas y grandes poblaciones, y también, claro, al caso de la vivienda ferroviaria, que se construyó mayoritariamente en esas medianas y grandes poblaciones. Esta circunstancia también se reflejó en las características edificatorias, estructurales y constructivas de las viviendas mineras, si bien, siempre quedaron enmarcadas dentro de una pauta general en el que formas y materiales estaban reguladas con mayor o menor rigidez desde el organismo competente, que era de modo natural el Ministerio de Trabajo, como departamento que gestionaba el Instituto Nacional de la Vivienda, pero también, por el Ministerio de la Gobernación, que fue el encargado de determinar las condiciones higiénicas mínimas que debían tener las viviendas de nueva construcción (Orden de 29-02-1944).

El estudio de las características arquitectónicas de las viviendas durante el franquismo debe necesariamente tener en cuenta el condicionante máximo de las políticas autárquicas del régimen, que limitaba el uso de materiales, como acero y cemento, y daba al ladrillo protagonismo máximo como elemento estructural de la construcción. Así, en los proyectos de los años 40 y 50, el uso del ladrillo es preferente en muros de carga, forjados y particiones, como forma de construcción tradicional, con equipamientos al mínimo, sin control alguno de calidad en la construcción y ausencia total de elementos prefabricación.

Desde el punto de vista tipológico, las construcciones se diferenciaron entre el modelo de manzana cerrada, utilizado sobre todo por las viviendas en hilera, de una o dos alturas, y la construcción abierta, que fue adoptada por las viviendas en altura, para facilitar la ventilación de las piezas de la casa. Lo que además posibilitaba la instalación de zonas ajardinadas en los exteriores, aunque la precariedad inicial de las construcciones hizo que esto solo figurara en los planos y no en la realidad.

Este punto de partida condicionó las características edificatorias, estructurales y constructivas de las viviendas mineras. La tradición imponía la vivienda de una o dos alturas, con escasa fábrica, cimentaciones superficiales y uso de materiales sencillos, ladrillo y mampostería en las estructuras y los cerramientos. Además, el tejado solía ser de materiales vegetales y de escasa consistencia. Las normas constructivas derivadas de la ley de 1939 eran nada exigentes, pero en este sentido se terminó imponiendo el tejado a dos aguas con teja, plana o árabe. En este sentido, la primera promoción de viviendas de Almadén (1944) quería mantener el tejado de armazón de madera con fibras vegetales en la cubierta. La escasez de materiales de la construcción fue uno de los grandes problemas para los promotores, ya que uso de acero y cemento estaba muy limitado. Esto tendría sus consecuencias en el diseño y construcción final de las viviendas.

Respecto de las instalaciones, hasta hace poco más de medio siglo, las viviendas ofrecían unas instalaciones muy básicas, ya que ni la normativa obligaba a más ni tampoco existía una demanda objetiva de otros servicios más allá del agua corriente y la toma eléctrica. El periodo 1950-1970 es el momento de la gran transición en lo que (Giedion 1978), en su estudio clásico, mostraba la relevancia que tuvo la vivienda y sus servicios en el triunfo de esa mecanización. Ese avance se puede ver en la configuración de los servicios de las cooperativas de El Entrego, Mieres, Gijón, Avilés o Puertollano entre otras. Lo habitual de las primeras décadas fue la sencillez espartana hasta el extremo de prescindir de instalaciones de calefacción hasta en zonas extremadamente frías (Andorra, Teruel, entre otros). La electricidad también era ya norma implantada en las viviendas de nueva construcción (según datos de (Tafunell 2005), el 20% de las viviendas en España carecía de electricidad y el 65% de agua corriente). En esos años, la instalación eléctrica era solo de un circuito de escaso amperaje, alimentado con un sencillo tubo Bergman, si bien tampoco había mayor demanda, ante la ausencia de electrodomésticos en los hogares españoles. Novedades como las antenas colectivas de televisión, la conexión telefónica o los ascensores en las fincas llegarían más tarde.

Building characteristics

The construction of mining housing was based on a great demand (mobilization of the labor factor urgently to the preserves put into operation) and the location in areas far from large centers, at most on the outskirts of small and medium-sized towns, in mountainous areas and with difficulties in access. This differentiates mining housing from those built in urban environments with medium and large populations, and, of course, the case of railway housing, which was built mostly in these medium and large towns. This circumstance was also reflected in the building, structural and constructive characteristics of the mining houses, although they were always framed within a general guideline in which forms and materials were regulated with greater or lesser rigidity by the competent body, which was naturally the Ministry of Labour, as the department that managed the National Housing Institute. but also, by the Ministry of the Interior, which oversaw determining the minimum hygienic conditions that newly built homes should have (Order of 29-02-1944).

The study of the architectural characteristics of housing during the Franco regime must necessarily consider the maximum conditioning factor of the autarchic policies of the regime, which limited the use of materials, such as steel and cement, and gave brick maximum prominence as a structural element of construction. Thus, in the projects of the 40s and 50s, the use of brick is preferential in load-bearing walls, slabs and partitions, as a traditional form of construction, with minimal equipment, without any quality control in the construction and total absence of prefabricated elements.

From a typological point of view, the constructions were differentiated between the closed block model, used above all by row houses, of one or two floors, and the open construction, which was adopted by high-rise houses, to facilitate the ventilation of the rooms of the house. This also made it possible to install garden areas outside, although the initial precariousness of the constructions meant that this only appeared in the plans and not in reality.

This starting point conditioned the building, structural and construction characteristics of the mining houses. Tradition imposed the housing of one or two floors, with little masonry, superficial foundations and the use of simple materials, brick and masonry in the structures and enclosures. In addition, the roof was usually made of plant materials and of poor consistency. The construction standards derived from the 1939 law were not at all demanding, but in this sense the gabled roof with tile, flat or Arabic was imposed. In this sense, the first housing development in Almadén (1944) wanted to maintain the wooden frame roof with vegetable fibres on the roof. The shortage of construction materials was one of the big problems for the developers, since the use of steel and cement was very limited. This would have its consequences in the design and final construction of the houses.

Regarding installations, until just over half a century ago, homes offered very basic facilities, since neither the regulations required more nor was there an objective demand for other services beyond running water and electricity. The period 1950-1970 is the time of the great transition in which (Giedion 1978), in his classic study, showed the relevance of housing and its services in the triumph of this mechanization. This progress can be seen in the configuration of the services of the cooperatives of El Entrego, Mieres, Gijón, Avilés or Puertollano among others. The usual thing in the first decades was the Spartan simplicity to the extreme of dispensing with heating installations even in extremely cold areas (Andorra, Teruel, among others). Electricity was also already the norm implemented in newly built homes (according to data from (Tafunell 2005), 20% of homes in Spain lacked electricity and 65% had running water). In those years, the electrical installation was only a low-amperage circuit, powered by a simple Bergman tube, although there was no greater demand either, in the absence of electrical appliances in Spanish homes. Novelties such as collective television antennas, telephone connection or elevators in the buildings would come later.

Urbanismo y ocupación del espacio

Las formas y espacios de la minería han sido tradicionalmente muy particulares, y han estado asociados a conceptos como dispersión geográfica, alejamiento de núcleo de población importantes y precariedad general asociada a la propia temporalidad de muchas de las instalaciones mineras, lo que conllevaba movimientos constantes de unos puntos a otros, según las explotaciones se abrieran o cerraran. De ahí, la vivienda, los espacios de convivencia han contado como malas condiciones higiénicas, habitaciones provisionales y temperaturas extremas, lo que hacía especialmente gravosa la vida de las familias mineras en las proximidades de los cotos.

A pesar de estas precariedades y temporalidades, en la configuración de los espacios de convivencia mineros siempre aparece una traza urbana, por simple o sencilla que esta fuera. Durante el franquismo, en muchos casos, su consolidación proviene de la fiebre minera decimonónica, pero la temporalidad de muchas de esas construcciones y la aparición de nuevos núcleos conllevó el diseño y construcción de muchos espacios de un urbanismo naciente. Desde poblados dotados de servicios amplios (escuela, capilla, médico, economato, e incluso salón social o casino) hasta simples manzanas de viviendas o edificios aislados, pasando por aldeas o nuevos barrios adyacentes o alejados de entornos urbanos de pequeño o mediano porte. Hemos de tener presente que acercar al trabajador al tajo conllevaba alejarlo de los núcleos más poblados

La configuración de los nuevos núcleos, como este de Ciñera (León) es clara en las viviendas construidas durante las décadas de 1950 a 1970. El 90% de su caserío actual procede de ese periodo y está asociado completamente a la explotación minera. En otros casos, la evolución es diferente, como Peñarroya-Puertollano, donde como decimos, existe caserío consolidado anterior, del periodo de explotación de SMMP, que se marchó de la zona en la década de 1960, y la construcción para mineros de la zona será ahora en forma de barrios periféricos y con grupos promotores diferentes (INV, cooperativa y ENCASUR), pero conviviendo con promoción privada (aunque con subvención pública). Por último, el caso de La Camocha es también significativo, por la transformación del entorno agrario en minero que se produce en muy poco tiempo, tras el descubrimiento del yacimiento de carbón en la década de 1930, lo que obliga a la llegada de nuevo pobladores que necesitan vivienda y que es proporcionada tanto por la empresa Felgueroso SA como por el INV (cerca de 1.000 viviendas). Pero en La Camocha también se constata la segregación espacial y social de las diferentes clases de trabajadores de las minas: por un lado, el barrio del Vaticano, destinado a facultativos y empleados, y por otro, Les Cases, para mineros y obreros. En los sitios más pequeños y remotos, donde la actividad minera se detuvo hace mucho tiempo, han quedado fosilizadas viviendas y calles, como en La Piela, Corullón (León) que vivió brevemente el fulgor del wolframio y el INV construyó 40 viviendas en 1955, pero apenas si el poblado fue habitado durante 5 años. También fue habitado durante poco tiempo el poblado de El Arteal, en Almería, en las proximidades de Sierra Almagrera: 200 viviendas construidas 1952 por la empresa Minas de Almagrera SA, empresa con participación mayoritaria del INI, que también cesó pronto la explotación y las viviendas quedaron abandonadas a partir de 1958. Otros casos jalonan estos urbanismos fracasados, tan propios de los ciclos mineros.

De todos modos, es evidente que la convivencia entre la mina (espacio industrial agresivo y en movimiento) y los lugares de convivencia (poblados, barrios y viviendas) es compleja y se ha desarrollado siempre entre grandes conflictos, en los que la mina ha condicionado la situación y expansión de los poblados. Al menos ha sido así en sus etapas de máxima producción, solo cuando esta ha decaído y el poblamiento del entorno se ha consolidado (se independizado económicamente de la producción minera) se ha visto limitada la acción minera. Pero durante la segunda mitad del siglo XX, la mina mandaba. La proximidad a la actividad productiva ya sea la minera o en las factorías a ella asociada, ha condicionado gravemente la vida en los poblados y aldeas mineras. Ruido, polvo y suciedad en general es un entorno nada fácil de llevar.

Urban planning and occupation of space

The forms and spaces of mining have traditionally been very particular and have been associated with concepts such as geographical dispersion, distance from important population centres and general precariousness associated with the very temporality of many of the mining facilities, which entailed constant movements from one point to another, depending on whether the operations were opened or closed. Hence, housing, living spaces have counted as poor hygienic conditions, temporary rooms and extreme temperatures, which made the life of mining families in the vicinity of the preserves especially burdensome.

Despite these precariousness and temporalities, in the configuration of mining coexistence spaces there is always an urban trace, no matter how simple or simple it may be. During the Franco regime, in many cases, its consolidation came from the nineteenth-century mining fever, but the temporality of many of these constructions and the appearance of new nuclei, led to the design and construction of many spaces of a nascent urbanism. From villages equipped with extensive services (school, chapel, doctor, commissary, and even social hall or casino) to simple blocks of houses or isolated buildings, through villages or new neighborhoods adjacent to or far from small or medium-sized urban environments. We must bear in mind that bringing the worker closer to the pit entailed moving him away from the most populated areas

The configuration of the new nuclei, such as this one in Ciñera (León) is clear in the houses built during the 1950s and 1970s. 90% of its current hamlet comes from that period and is completely associated with mining exploitation. In other cases, the evolution is different, such as Peñarroya-Puertollano, where, as we have said, there is a consolidated hamlet from the previous period of exploitation of SMMP, which left the area in the 1960s, and the construction for miners in the area will now be in the form of peripheral neighborhoods and with different promoter groups (INV, cooperative and ENCASUR). but coexisting with private promotion (although with public subsidy). Finally, the case of La Camocha is also significant, due to the transformation of the agricultural environment into a mining environment that took place in a very short time, after the discovery of the coal deposit in the 1930s, which forced the arrival of new settlers who needed housing and which was provided by both the company Felgueroso SA and the INV (about 1,000 homes). But in La Camocha there is also the spatial and social segregation of the different classes of workers in the mines: on the one hand, the Vatican district, intended for doctors and employees, and on the other, Les Cases, for miners and workers. In the smallest and most remote sites, where mining activity stopped a long time ago, houses and streets have been fossilized, such as in La Piela, Corullón (León) which briefly experienced the glow of tungsten and the INV built 40 houses in 1955, but the town was barely inhabited for 5 years. The village of El Arteal, in Almeria, in the vicinity of Sierra Almagrera, was also inhabited for a short time: 200 houses built in 1952 by the company Minas de Almagrera SA, a company with a majority participation of the INI, which also soon ceased exploitation, and the houses were abandoned from 1958 onwards. Other cases mark these failed urbanisms, so typical of mining cycles.

In any case, the coexistence between the mine (aggressive and moving industrial space) and the places of coexistence (villages, neighbourhoods and homes) is complex and has always developed between major conflicts, in which the mine has conditioned the situation and expansion of the villages. At least this has been the case in its stages of maximum production, only when it has declined, and the population of the environment has been consolidated (it has become economically independent of mining production) has mining action been limited. But during the second half of the twentieth century, the mine ruled. The proximity to productive activity, whether mining or in the factories associated with it, has seriously conditioned life in mining towns and villages. Noise, dust and dirt in general is not an easy environment to bear.

Conclusiones

Aun con el proceso de registro en marcha, contabilizamos 23.128 viviendas (50% realizadas por INV-OSH), 204 promociones en 99 municipios diferentes, con la participación de 37 empresas y 16 cooperativas.

La vivienda minera se construyó mayoritariamente en las décadas de 1950-1960, eran viviendas unifamiliares, en línea o pareadas, con el ladrillo como material de construcción principal y ubicadas en núcleos de población pequeños (poblados, aldeas o barrios), con una cierta segregación espacial.

Es necesaria la patrimonialización de la vivienda minera como elemento destacado dentro de los conjuntos y paisajes industriales (Carta de Nizhny-Tagil, 2003), sin necesidad de atributos artísticos o estéticos específicos.

Conclusions

Even with the registration process underway, we counted 23,128 homes (50% carried out by INV-OSH), 204 developments in 99 different municipalities, with the participation of 37 companies and 16 cooperatives.

Mining housing was mostly built in the 1950s-1960s, they were single-family houses, in a row or semi-detached, with brick as the main construction material and located in small population centers (towns, villages or neighborhoods), with a certain spatial segregation.

It is necessary to patrimonialize mining housing as a prominent element within industrial complexes and landscapes (Nizhny-Tagil Charter, 2003), without the need for specific artistic or aesthetic attributes.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- Arends Morales, L. N. (2012). Vivienda Social en España. Universitat Politècnica de Catalunya. upcommons.upc.edu
- Cuéllar, D., Martínez-Corral, A., & Cárcel-Carrasco, J. (2022). Planes, materiales, lugares: Análisis de la vivienda social ferroviaria en España, 1939-1989. Editorial Área de Desarrollo y Sostenibilidad SL. https://www.3ciencias.com/libros/libro/planes-materiales-lugares-analisis-de-la-vivienda-social-ferroviaria-en-espana-1939-1989/
- Giedion, S. (1978). La mecanización toma el mando (E. Riambau, Trad.). Gustavo Gili.
- López Díaz, Jesús. (2003). Vivienda social y Falange: Ideario y construcción en la década de los 40. Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales, VII(146 (024)). http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-146%28024%29.htm
- Sambricio (ed.), C. (2003). Un siglo de vivienda social: 1903-2003. Tomo I y II (polibuscador; Vols. 1-2). Nerea.
- Tafunell, X. (2005). Urbanización y vivienda. En Estadísticas históricas de España, siglox XIX-XX, Albert Carreras y Xavier Tafunell (Coord.): Vol. I (pp. 455-499). Fundación BBVA.
- Vilagrasa, J. (Ed.). (1997). Vivienda y promoción inmobiliaria en España. Servei de Publicacions, Universitat de Lleida.

Agradecimientos/Acknowledgments

El marco de esta investigación se encuadra dentro del proyecto PID2022-137302NB-C32, "La minería durante el franquismo: marco institucional y medio ambiente".

The framework of this research is framed within the project PID2022-137302NB-C32, "Mining during Francoism: institutional framework and the environment".

CHAPTER 2

SUSTAINABILITY

CAPÍTULO 2 ***SOSTENIBILIDAD***

IMPACT OF URBAN INTERDUNE LAGOONS ON THE SOCIAL WELFARE AND SUSTAINABILITY OF COASTAL METROPOLITAN AREAS.

IMPACTO DE LAS LAGUNAS INTERDUNARES URBANAS EN EL BIENESTAR SOCIAL Y LA SOSTENIBILIDAD DE LAS ÁREAS METROPOLITANAS COSTERAS

Maria del Carmen ixtepan Turrent
Doctorante de proyectos: universidad Americana de Europa
PhD. Student of Projects. American University of Europe; mcixtepanturrent@hotmail.com

Fabiola Colmenero Fonseca
Investigadora en el Departamento de Formación. Universidad Americana de Europa. fabiola.colmenero@aulagrupo.es. Instituto Universitario de Tecnología de Materiales. Universidad Politécnica de València; Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. University Institute of Materials Technology fcolfon@upvnet.upv.es

Javier Cárcel Carrasco
Instituto Universitario de Tecnología de Materiales. Universitat Politècnica de València I España I Camino de Vera s/n 46022 (Valencia, Spain) E-mail: fracarc1@csa.upv.es
University Institute of Materials Technology. Universitat Politècnica de València I España I Camino de Vera s/n 46022 (Valencia, Spain) E-mail: fracarc1@csa.upv.es

Andrés Salas Montoya
Research Prof. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.Civil Engineering Department, Carrera 27, 64-60, Manizales Colombia, 170001, e-mail: asalasmo@unal.edu.co

Alejandro Guzmán Ramírez
Investigador Universidad de Guanajuato, Departamento de Arquitectura. Av. Juárez 77. 36000 Guanajuato, Gto. México. e-mail: alejandroguzman06@gmail.com

Abstract

Globalization has rapidly boosted the development of port areas around the world, leading to a notable increase in the need for infrastructure to manage global trade. This process of expansion and development of ports has promoted the integration of surrounding municipalities, facilitating the creation of coastal metropolitan areas.
However, this growth presents challenges in terms of sustainability, especially about nearby natural ecosystems, such as interdune lagoons, which are crucial for both biodiversity and the well-being of local communities.
This study uses the MuSIASEM method together with a mixed methodology to analyze the common characteristics of interdune lagoons and their relationship with urban development, complemented by a SWOT analysis. Key findings show that uncontrolled urbanization and port expansion are damaging these ecosystems, negatively impacting the ecosystem services they provide. In addition, it was observed that existing public policies do not adequately address the protection and conservation of these natural spaces in the context of urban development.
The results suggest that it is essential for national and local governments to adopt comprehensive approaches that recognize the importance of the environmental and social aspects of interdune lagoons. It is concluded that in order to achieve a sustainable integration of these areas, it is necessary to establish an effective governance that balances economic development with environmental conservation.
As for future lines of research, it is recommended to deepen the implementation of public policies that promote

Keywords

Port development, Sustainability, Interdune lagoons, Urbanization, Social welfare

Introducción

Las costas son recursos naturales fundamentales que generan actividades económicas clave para los países. En el contexto actual de globalización, la demanda de mayor infraestructura para el intercambio comercial ha impulsado la ampliación de puertos, lo que afecta significativamente las zonas urbanas adyacentes. Este fenómeno tiene un efecto en cascada sobre los municipios cercanos, generando Inter municipalidad y contribuyendo a la formación de áreas metropolitanas.

México, con una extensa franja costera, no es la excepción. El estado de Veracruz, que cuenta con varias zonas metropolitanas, ocupa el tercer lugar a nivel nacional y el primero entre los estados costeros en términos de importancia económica. El puerto de Veracruz es el principal centro de comercio internacional del país y se encuentra en proceso de ampliación. A su alrededor, municipios como Boca del Río, reconocido por su gastronomía y turismo, y otros como Alvarado, Medellín de Bravo y Jamapa, han experimentado una integración progresiva, formando una gran metrópoli.

Sin embargo, este crecimiento también ha traído consigo retos significativos:

- La ocupación de terrenos agrícolas para satisfacer la demanda de vivienda asequible.
- Problemas de movilidad derivados de los largos trayectos entre áreas habitacionales y laborales.
- La invasión de áreas naturales, causando daños a ecosistemas y vasos reguladores.

Para abordar estos desafíos, se propone la implementación de índices específicos de bienestar social como herramienta diagnóstica inicial. Este enfoque permitiría identificar fortalezas y debilidades en la región, facilitando un análisis detallado de los puntos críticos y promoviendo la integración de las lagunas interdunarias en un circuito conectado por corredores verdes. Dichos corredores no solo mejorarían la sostenibilidad urbana, sino que también reforzarían la cohesión de la metrópoli.

Factores clave como la gobernanza, la economía y el medio ambiente son esenciales para establecer líneas de acción que beneficien a la población mediante:

- Garantizar la seguridad y salud de los habitantes.
- Reactivar áreas económicas y comerciales abandonadas.
- Mejorar la calidad del aire y contribuir a mitigar la crisis climática.
- Promover la participación ciudadana.
- Coordinar recursos e intervenciones a través de los distintos niveles de gobierno.

Este enfoque integral busca equilibrar el desarrollo económico y social con la preservación ambiental, promoviendo una metrópoli sostenible y resiliente, como se muestra en el Figura 1.

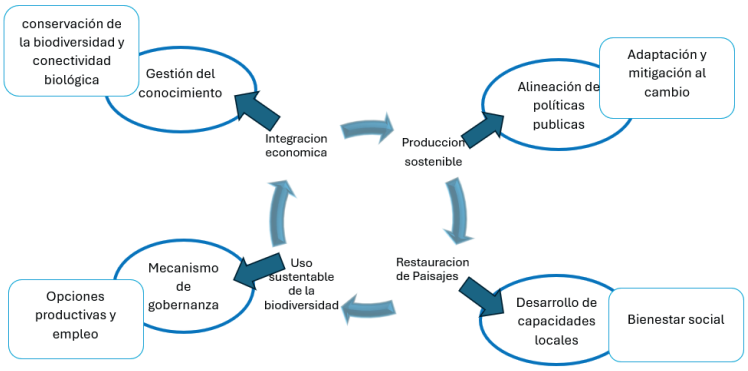


Figura 1.- integración del entorno Urbano -Natural

Introduction

Coasts are fundamental natural resources that generate key economic activities for countries. In the current context of globalization, the demand for greater infrastructure for trade has driven the expansion of ports, which significantly affects adjacent urban areas. This phenomenon has a cascading effect on nearby municipalities, generating inter-municipality and contributing to the formation of metropolitan areas.

Mexico, with an extensive coastal strip, is no exception. The state of Veracruz, which has several metropolitan areas, ranks third nationally and first among coastal states in terms of economic importance. The port of Veracruz is the main center of international trade in the country and is in the process of expanding. Around it, municipalities such as Boca del Río recognized for its gastronomy and tourism, and others such as Alvarado, Medellín de Bravo, and Jamapa, have experienced progressive integration, forming a large metropolis.

However, this growth has also brought with it significant challenges:

- The occupation of agricultural land to meet the demand for affordable housing.
- Mobility problems derived from long journeys between housing and work areas.
- The invasion of natural areas, causing damage to ecosystems and regulating vessels.

To address these challenges, the implementation of specific indices of social well-being is proposed as an initial diagnostic tool. This approach would make it possible to identify strengths and weaknesses in the region, facilitating a detailed analysis of the hotspots and promoting the integration of interdisciplinary lagoons into a circuit connected by green corridors. Such corridors would not only improve urban sustainability but would also strengthen the cohesion of the metropolis.

Key factors such as governance, the economy, and the environment are essential to establish lines of action that benefit the population through:

- Guarantee the safety and health of the inhabitants.
- Reactivate abandoned economic and commercial areas.
- Improve air quality and contribute to mitigating the climate crisis.
- Promote citizen participation.
- Coordinate resources and interventions across the different levels of government.

This comprehensive approach seeks to balance economic and social development with environmental preservation, promoting a sustainable and resilient metropolis, as shown in figure 1.

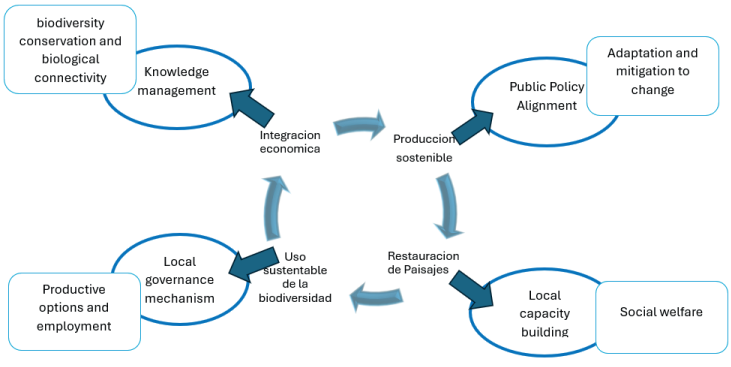


Figure 1.- Integration of the urban-natural environment

Plan Experimental

Objetivos

1. Identificar y estructurar el potencial de los ecosistemas costeros como generadores de bienestar para la población y recursos clave para el equilibrio ambiental global.

2. Diseñar un plan metropolitano integrado que coordine los planes locales específicos en áreas costeras y lagunares.
3. Desarrollar un programa estratégico para la promoción del ecoturismo sostenible en la región.
4. Fomentar la participación ciudadana activa en la conservación y el desarrollo sostenible de los ecosistemas costeros.
5. Promover la integración de conocimientos ambientales interdisciplinarios en las políticas y acciones locales.
6. Implementar infraestructuras sostenibles, como ciclovías y parques de uso múltiple, que impulsen el uso de la bicicleta y el contacto con la naturaleza.
7. Promover la actividad física en espacios naturales como parte de un enfoque integral de bienestar social.
8. Mitigar las islas de calor urbanas mediante soluciones basadas en la naturaleza y estrategias urbanísticas

Materiales y método

1. Ecosistemas Costeros y su Importancia

Los ecosistemas costeros son áreas geográficas situadas entre la tierra y el mar, que incluyen una variedad de hábitats como estuarios, manglares, marismas y dunas. Estos ecosistemas juegan un papel crucial en la conservación de la biodiversidad, la protección contra fenómenos naturales como huracanes y tsunamis, y la provisión de recursos naturales como agua dulce y alimentos. Además, los ecosistemas costeros tienen la capacidad de regular el clima, actúan como sumideros de carbono y proporcionan hábitats para diversas especies de flora y fauna. Estos sistemas ofrecen beneficios tanto locales como globales y, por lo tanto, deben ser gestionados de manera sostenible para garantizar su perdurabilidad y funcionalidad.

2. Urbanización y sus Efectos sobre los Ecosistemas Costeros

La urbanización ha tenido un impacto negativo sobre muchos ecosistemas costeros. La expansión de las zonas urbanas ha llevado a la destrucción de hábitats naturales, especialmente a lo largo de las costas. La conversión de terrenos naturales en áreas urbanas no solo reduce la biodiversidad, sino que también incrementa la vulnerabilidad de las áreas urbanas a fenómenos climáticos extremos. Las costas urbanizadas pueden experimentar una pérdida en sus capacidades de regulación hídrica y protección contra inundaciones. Por lo tanto, es esencial integrar los ecosistemas costeros en los planes urbanos para mejorar la resiliencia de las ciudades frente a los efectos del cambio climático.

3. Metodología Multiescalar (Mustiasen)

El método multiescalar MuSIASEM (Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism) es una herramienta analítica que permite evaluar la sostenibilidad de los ecosistemas y las dinámicas sociales y urbanas a través de la identificación de flujos de recursos (agua, energía, materiales) y sus impactos en la sostenibilidad. Este enfoque ayuda a comprender cómo los recursos se distribuyen y se utilizan en diferentes niveles espaciales y temporales. El MuSIASEM permite una visión integral de las interacciones entre los sistemas ecológicos y las dinámicas urbanas, y es particularmente útil para identificar estrategias sostenibles en la planificación urbana.

Plan Experimental

Objectives

1. Identify and structure the potential of coastal ecosystems as generators of well-being for the population and key resources for global environmental balance.
2. Design an integrated metropolitan plan that coordinates specific local plans in coastal and lagoon areas.
3. Develop a strategic program for the promotion of sustainable ecotourism in the region.
4. To encourage active citizen participation in the conservation and sustainable development of coastal ecosystems.
5. Promote the integration of interdisciplinary environmental knowledge into local policies and actions.

6. Implement sustainable infrastructures, such as cycle lanes and multi-use parks, that promote the use of bicycles and contact with nature.
7. Promote physical activity in natural spaces as part of a comprehensive approach to social welfare.
8. Mitigate urban heat islands through nature-based solutions and urban strategies.

Materials and method

1. Coastal Ecosystems and their Importance

Coastal ecosystems are geographical areas situated between land and sea, including a variety of habitats such as estuaries, mangroves, marshes, and dunes. These ecosystems play a crucial role in conserving biodiversity, protecting against natural phenomena such as hurricanes and tsunamis, and providing natural resources such as fresh water and food. In addition, coastal ecosystems can regulate the climate, act as carbon sinks, and provide habitats for various species of flora and fauna. These systems offer both local and global benefits and therefore must be managed sustainably to ensure their durability and functionality.

2. Urbanization and its Effects on Coastal Ecosystems

Urbanization has hurt many coastal ecosystems. The expansion of urban areas has led to the destruction of natural habitats, especially along coastlines. The conversion of natural land into urban areas not only reduces biodiversity but also increases the vulnerability of urban areas to extreme weather events. Urbanized coastlines may experience a loss in their water regulation and flood protection capabilities. It is therefore essential to integrate coastal ecosystems into urban plans to improve the resilience of cities to the effects of climate change.

3. Multiscalar Methodology (MuSIASEM)

The multi-scale MuSIASEM method (Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism) is an analytical tool that allows the sustainability of ecosystems and social and urban dynamics to be assessed through the identification of resource flows (water, energy, materials) and their impacts on sustainability. This approach helps to understand how resources are distributed and used at different spatial and temporal levels. The MuSIASEM allows a comprehensive view of the interactions between ecological systems and urban dynamics and is particularly useful for identifying sustainable strategies in urban planning.

4. Longitudinal Transformation Model

The longitudinal transformation model, proposed by Gardner M.K. (2012), is based on an analysis approach that uses the parameters of time and energy to develop strategies in scenarios where resources are limited. This approach is useful when seeking to implement long-term changes in conditions of scarce resources and when collaborative efforts between different actors are required.

4. Modelo de Transformación Longitudinal

El modelo de transformación longitudinal, propuesto por Gardner M.K. (2012), se basa en un enfoque de análisis que utiliza los parámetros de tiempo y energía para desarrollar estrategias en escenarios donde los recursos son limitados. Este enfoque es útil cuando se busca implementar cambios en el largo plazo en condiciones de recursos escasos y cuando se requieren esfuerzos colaborativos entre diferentes actores. El modelo facilita la integración de los datos cualitativos y cuantitativos, ayudando a priorizar las acciones necesarias en función de la viabilidad a corto, mediano y largo plazo.

5. Sostenibilidad Urbana y Bienestar Social

La sostenibilidad urbana hace referencia a la capacidad de las ciudades para satisfacer las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas. En este contexto, la sostenibilidad incluye la integración de principios ambientales, sociales y económicos. Los indicadores de bienestar social, como la calidad del aire, el acceso a servicios básicos, la participación comunitaria y la movilidad urbana, son esenciales para medir los efectos de las

políticas de sostenibilidad. Fomentar el ecoturismo, la creación de infraestructuras sostenibles y la participación ciudadana son estrategias clave para lograr ciudades más sostenibles y resilientes.

6. Planificación y Gobernanza Metropolitana

La planificación y gobernanza metropolitanas son fundamentales para integrar los diferentes niveles de gobierno y los actores locales en la toma de decisiones sobre el uso del suelo y la gestión de los recursos naturales. La integración de los sistemas lagunares costeros en los planes urbanos es un paso necesario para garantizar que los beneficios de estos ecosistemas sean aprovechados de manera sostenible. La gobernanza debe involucrar a la comunidad en el proceso de toma de decisiones, promoviendo una gestión participativa que considere tanto las necesidades humanas como la conservación ambiental.

7. Intervenciones Urbanas Sostenibles

La creación de infraestructuras sostenibles, como ciclovías, parques urbanos, corredores verdes y la promoción del ecoturismo son intervenciones clave para mejorar la calidad de vida en las áreas urbanas. Estas infraestructuras no solo promueven la movilidad sostenible, sino que también contribuyen a la mitigación de problemas ambientales, como las islas de calor y la contaminación del aire. Además, las infraestructuras verdes ofrecen un espacio para la recreación, el bienestar social y la mejora de la biodiversidad urbana.

La investigación se llevará a cabo mediante una metodología mixta, que combina análisis cuantitativos y cualitativos, integrada al método multiescalar MuSIASEM. Se parte de un enfoque epistemológico urbanista racionalista-deductivo que permitirá estructurar y analizar las interacciones entre los ecosistemas costeros y las dinámicas urbanas.

1. Recolección y análisis de datos:
    - Análisis documental: Se recopilarán datos secundarios relacionados con los ecosistemas costeros, las dinámicas urbanas, y los planes locales existentes.
    - Estudios de campo: Se realizarán entrevistas y grupos focales con expertos en el tema y habitantes de las áreas lagunares. Esto permitirá identificar percepciones, retos y oportunidades específicas.
2. Metodología multiescalar (MuSIASEM):
    - Este método será empleado para evaluar la sostenibilidad de los ecosistemas costeros, considerando aspectos energéticos, sociales, económicos y ambientales. Permite identificar flujos de recursos y su impacto en la sostenibilidad.

The model facilitates the integration of qualitative and quantitative data, helping to prioritize the necessary actions based on short-, medium- and long-term feasibility.

5. Urban Sustainability and Social Welfare

Urban sustainability refers to the ability of cities to meet present needs without compromising the ability of future generations to meet theirs. In this context, sustainability includes the integration of environmental, social, and economic principles. Social well-being indicators, such as air quality, access to basic services, community participation, and urban mobility, are essential for measuring the effects of sustainability policies. Promoting ecotourism, the creation of sustainable infrastructures, and citizen participation are key strategies to achieve more sustainable and resilient cities.

6. Metropolitan Planning and Governance

Metropolitan planning and governance are critical to integrating different levels of government and local actors in decision-making on land use and natural resource management. The integration of coastal lagoon systems into urban plans is a necessary step to ensure that the benefits of these ecosystems are harnessed sustainably. Governance must involve the community in the decision-making process, promoting participatory management that considers both human needs and environmental conservation

7. Sustainable urban interventions

The creation of sustainable infrastructure, such as cycle paths, urban parks, green corridors, and the promotion of ecotourism, are key interventions to improve the quality of life in urban areas. These infrastructures not only promote sustainable mobility but also contribute to the mitigation of environmental problems, such as heat islands and air pollution. In addition, green infrastructure provides a space for recreation, social well-being, and the enhancement of urban biodiversity.

The research will be carried out using a mixed methodology, which combines quantitative and qualitative analyses, integrated into the multi-scale MuSIASEM method. It is based on a rationalist-deductive urban epistemological approach that will allow structuring and analyzing the interactions between coastal ecosystems and urban dynamics.

1. Data collection and analysis:
    a. Desk analysis: Secondary data related to coastal ecosystems, urban dynamics, and existing local plans will be collected.
    b. Field studies: Interviews and focus groups will be conducted with experts on the subject and the inhabitants of the lagoon areas. This will allow the identification of specific perceptions, challenges, and opportunities.
2. Multi-scalar methodology (MuSIASEM):
    a. This method will be used to evaluate the sustainability of coastal ecosystems, considering energy, social, economic, and environmental aspects. It allows you to identify resource flows and their impact on sustainability.
3. Longitudinal transformation model:
    a. Based on the approach proposed by Gardenr M.K (2012), this model uses time and energy as key parameters to develop strategies under conditions of limited resources.
    b. This approach will facilitate the integration of qualitative and quantitative data and will allow for the establishment of collaborative and scalable lines of action.
4. Data analysis and integration:
    a. The data collected will be tabulated, analyzed, and cross-referenced to identify patterns and hotspots.

3. Modelo de transformación longitudinal:
    - Basado en el enfoque propuesto por Gardenr M.K (2012), este modelo utiliza tiempo y energía como parámetros clave para desarrollar estrategias en condiciones de recursos limitados.
    - Este enfoque facilitará la integración de datos cualitativos y cuantitativos, y permitirá establecer líneas de acción colaborativas y escalables.
4. Análisis e integración de datos:
    - Los datos recopilados serán tabulados, analizados y cruzados para identificar patrones y puntos críticos.
    - Se desarrollará una matriz de análisis que permita priorizar acciones y establecer estrategias a corto, mediano y largo plazo.
5. Validación de resultados:
    - Las conclusiones y propuestas se validarán a través de talleres participativos con la comunidad y expertos, garantizando su viabilidad y alineación con las necesidades locales.

Fase 1: Planificación y Recolección de Datos En esta fase inicial, el enfoque se centra en la recopilación de información clave a partir de documentos existentes sobre ecosistemas costeros, urbanización y sostenibilidad. Se realizarán entrevistas con expertos y grupos focales con la comunidad local para obtener una visión más detallada sobre las necesidades y percepciones de los residentes de las áreas lagunares. Además, se identificará a los actores clave en la gobernanza y los procesos urbanos para asegurar una integración adecuada de las partes involucradas.

Fase 2: Análisis y Diseño de Estrategias Una vez obtenidos los datos, se aplicarán métodos como el MuSIASEM para analizar los flujos de recursos (agua, energía, materiales) y su relación con el bienestar ambiental y social en la región. Además, se diseñarán estrategias específicas para promover el ecoturismo, la participación ciudadana y la creación de infraestructuras sostenibles, como ciclovías y parques urbanos. También se establecerán indicadores de bienestar social para medir los impactos de estas estrategias a nivel local.

Fase 3: Implementación y Validación En esta fase, se ejecutarán proyectos piloto en las áreas seleccionadas, centrados en el ecoturismo y la sostenibilidad urbana. Se llevará a cabo un proceso de evaluación para medir los resultados de estos proyectos en términos de bienestar social y sostenibilidad. Además, se organizarán talleres de validación con la comunidad y los actores clave para ajustar las estrategias según sus percepciones y retroalimentación. Finalmente, se creará una matriz de decisiones para guiar futuras acciones y políticas urbanas.

Fase 4: Seguimiento y Ajustes Después de la implementación, se establecerá un sistema de monitoreo para seguir el progreso de los proyectos en tiempo real. A medida que se recopilen los datos, se revisarán las estrategias implementadas, y se realizarán los ajustes necesarios según los resultados del monitoreo y las observaciones comunitarias. Esta fase busca asegurar que las iniciativas se mantengan alineadas con los objetivos de sostenibilidad y bienestar social a largo plazo. Como se muestra en la figura 2.

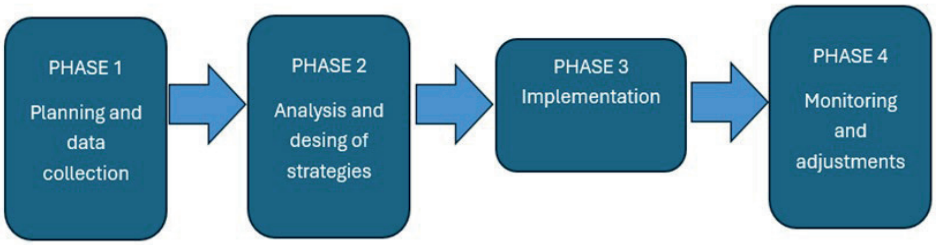


Figura 2.- fases metodológicas

b. An analysis matrix will be developed to prioritize actions and establish strategies in the short, medium, and long term.

5. Validation of results:

   a. The conclusions and proposals will be validated through participatory workshops with the community and experts, ensuring their viability and alignment with local needs.

Phase 1: Planning and Data Collection In this initial phase, the focus is on gathering key information from existing documents on coastal ecosystems, urbanization, and sustainability. Interviews with experts and focus groups will be conducted with the local community to gain a more detailed view of the needs and perceptions of the residents of the lagoon areas. In addition, key actors in governance and urban processes will be identified to ensure the proper integration of stakeholders.

Phase 2: Strategy Analysis and Design Once the data has been obtained, methods such as MuSIASEM will be applied to analyze the flows of resources (water, energy, materials) and their relationship with environmental and social well-being in the region. In addition, specific strategies will be designed to promote ecotourism, citizen participation, and the creation of sustainable infrastructures, such as cycle paths and urban parks. Social welfare indicators will also be established to measure the impacts of these strategies at the local level.

Phase 3: Implementation and Validation In this phase, pilot projects will be implemented in the selected areas, focusing on ecotourism and urban sustainability. An evaluation process will be carried out to measure the results of these projects in terms of social welfare and sustainability. In addition, validation workshops will be organized with the community and key actors to adjust strategies according to their perceptions and feedback. Finally, a matrix of decisions will be created to guide future urban actions and policies.

Phase 4: Tracking and Adjustments After implementation, a monitoring system will be set up to track the progress of projects in real-time. As data is collected, the strategies implemented will be reviewed, and adjustments will be made as needed based on the results of monitoring and community observations. This phase seeks to ensure that initiatives remain aligned with long-term sustainability and social welfare goals. As shown in figure 2

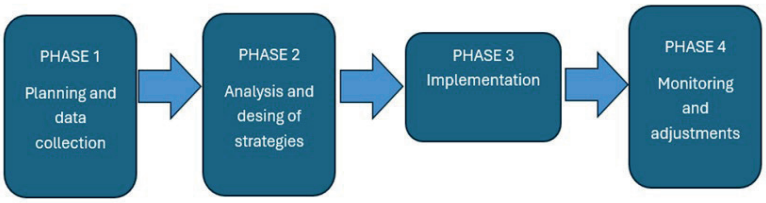


Figure 2.- Methodological phases

Results:

It is expected that at the end of the study process, the established objectives will be achieved and that the hypothesis proposed will be proven through the data obtained. This study aims to demonstrate that the integration of coastal lagoon systems into metropolitan urban plans is not only feasible but beneficial. It is anticipated that the results will show the positive impact of the implementation of measures such as the improvement in the quality of life, ecotourism, urban sustainability, and the strengthening of social welfare. Likewise, the effectiveness of the proposed strategies in terms of reducing heat islands, ecosystem recovery, and improving the environmental services that these systems offer, such as water regulation and mitigation of risks associated with floods, will be validated.

Conclusion

Coastal lagoon systems, despite their relevance in terms of ecological sustainability, water management, and biodiversity protection, have not received the attention they deserve from the urban population and government authorities. This lack of interest has resulted in their abandonment, affecting both their conservation and the potential they could have to benefit the community and the surrounding natural environment. The lack of investment and integration of these systems into urban plans has led to the loss of their multiple ecosystem services, such as regulating the water cycle, flood protection, and improving air quality and biodiversity, as shown in Table 1.

FACTOR	CRITERIO	VARIABLE INDEPENDIENTE	VARIABLE DEPENDIENTE
SOCIAL -ECONOMICO	POBLACION	SEGURIDAD PROTECCION	INUNDACIONES
			BANDALISMO
SITUACION JURIDICA	INTERVENCION	AREA PROTEGIDA PRIVADA MUNICIPAL MUNICIPAL	RECURSOS
MEDIO AMBIENTE	MICRO CLIMA CALIDAD DEL AGUA	FEDERAL REDUCCION DE ISLAS DE RESERVA ACUIFERO FILTRACION DE AGUA	VEGETACION ENDEMICA RIESGO ABSORCION
	PROTECCION DE FAUNA Y FLORA	ESPECIES EN PELIGRO DE EXTINSION	AVES MIGRATORIAS
		ESPECIES ENDEMICAS EXISTENTES	VEGETACION ENDEMICA
MOVILIDAD	ACCESIBILIDAD	PEATONAL CICLISTA	ACERAS SEGURAS CARRIL CICLISTA
	CONECTIVIDAD	TRANSPORTE PUBLICO	EFICIENTE

Table 1.- Existing situation relationship matrix of the urban natural environment

It is essential that governments, both at the local and state levels, recognize the importance of these ecosystems and that integrated management is promoted to promote their conservation, **restoration, and sustainable use. Incorporating these** systems into urban and metropolitan plans, promoting their ecotourism, and creating green corridors and community participation, will not only generate environmental benefits but will improve the quality of life of urban dwellers and help mitigate the effects of climate change, such as heat islands and water scarcity. This will contribute to the creation of more sustainable, resilient cities with greater social welfare.

Results:

Se espera que al finalizar el proceso de estudio se logren alcanzar los objetivos establecidos, y que la hipótesis planteada sea comprobada a través de los datos obtenidos. Este estudio tiene como fin demostrar que la integración de los sistemas lagunares costeros en los planes urbanos metropolitano no solo es viable, sino beneficioso. Se anticipa que los resultados evidencien el impacto positivo de la implementación de medidas como la mejora en la calidad de vida, el ecoturismo, la sostenibilidad urbana, y el fortalecimiento del bienestar social. Asimismo, se validará la eficacia de las estrategias propuestas en términos de reducción de islas de calor, recuperación de ecosistemas y la mejora en los servicios ambientales que estos sistemas ofrecen, como la regulación del agua y la mitigación de riesgos asociados con inundaciones.

Conclusión

Los sistemas lagunares costeros, a pesar de su relevancia en términos de sostenibilidad ecológica, gestión hídrica y protección de la biodiversidad, no han recibido la atención que merecen por parte de la población urbana y las autoridades gubernamentales. Este desinterés ha resultado en su abandono, afectando tanto su conservación como el potencial que podrían tener para beneficiar a la comunidad y el entorno natural circundante. La falta de inversión e integración de estos sistemas en los planes urbanos ha llevado a la pérdida de sus múltiples servicios ecosistémicos, como la regulación del ciclo del agua, la protección contra inundaciones, la mejora de la calidad del aire y la biodiversidad, como se muestra en la tabla 1

MATRIX OF RELATIONSHIP OF EXISTING SITUATION OF THE NATURAL URBAN ENVIRONMENT			
FACTOR	CRITERION	INDEPENDENT VARIABLE	DEPENDENT VARIABLE
SOCIAL -ECONOMIC	POPULATION	SECURITY PROTECTION	FLOODS
			BANDALISM
LEGAL STATUS	INTERVENTION	PROTECTED AREA PRIVATE MUNICIPAL	RESOURCES
ENVIRONMENT	MICRO CLIMATE	FEDERAL OF HEAT	VEGETACION ENDEMICA
	WATER QUALITY	AQUIFER RESERVE WATER FILTRATION	RISK ABSORPTION
	PROTECTION OF FAUNA AND FLORA	RENDANGERED SPECIES EXTINSION	MIGRATORY BIRDS
		ENDEMIC SPECIES EXISTING	VEGETATION ENDEMIC
MOVILIDAD	ACCESIBILIDAD	PEDESTRIAN CYCLIST	SAFE SIDEWALKS CYCLING LANE
	CONECTIVIDAD	PUBLIC TRANSPORT CONNECTIVITY	EFFICIENT

Tabla 1.- Matriz de relación de situación existente del entorno natural-urbano

Es fundamental que los gobiernos, tanto a nivel local como estatal, reconozcan la importancia de estos ecosistemas y que se fomente una gestión integrada que promueva su conservación, restauración y aprovechamiento sostenible. Incorporar estos sistemas en los planes urbanos y metropolitanos, promoviendo su ecoturismo, creación de corredores verdes y participación comunitaria, no solo generará beneficios ambientales, sino que mejorará la calidad de vida de los habitantes urbanos y ayudará a mitigar los efectos del cambio climático, como las islas de calor y la escasez de agua. Así, se contribuirá a la creación de ciudades más sostenibles, resilientes y con un mayor bienestar social

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- Alejandro Iza (2019) Gobernanza para la adaptación basada en ecosistemas International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, 89es. https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2019.EPLP.89.es
- Arauko. (s.f.) 2021 Buena gobernanza – Humedales Sitio desarrollado por Agencia Triboost. https://humedalesarauko.cl/buena-gobernanza/ consultado el 21 de agosto 2024
- Azuz-Adeath, I. (2023b). Comunidades costeras y gobernanza. En EPOMEX-UAC eBooks (pp. 309-330).https://doi.org/10.26359/epomex01202310
- CAF. (2019, 18 abril). 10 intervenciones exitosas en ciudades de América Latina que se podrían replicar. https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2016/10/10-intervenciones-exitosas-en-ciudades-de-america-latina-que-se-podrian-replicar/ consultado 21 21 de agosto 2024
- Giampietro, M., Aspinall, R., Ramos-Martin, J., y Bukkens, S. (2014). Resource accounting for sustainability assessment: The nexus between energy, food, water, and land use. Routledge.
- Hidro SM. (2021, 13 octubre). Recuperación de cuerpos de agua 💧 - Presentación del proyecto [Vídeo]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=WG6tA6PYr3E
- La restauración de ríos y lagos - Revista Ciencias. (s. f.). https://www.revistacienciasunam.com/en/81-revistas/revista-ciencias-72/668-la-restauracion-de-rios-y-lagos.html
- Pérez-Sánchez, L., Giampietro, M., Velasco-Fernández, R., y Ripa, M. (2019). Characterizing the metabolic pattern of urban systems using MuSIASEM: The case of Barcelona. Energy Policy, 124, 13-22.

VALUTAZIONE DELL'INTERAZIONE TRA LUCE NATURALE E OUTDOOR VIEW NELL'EDILIZIA UNIVERSITARIA: UN CASO STUDIO

EVALUATION OF THE INTERACTION BETWEEN DAYLIGHT AND OUTDOOR VIEW IN UNIVERSITY BUILDINGS: A CASE STUDY

Giacomo Caccia

Ingegnere Edile e delle Costruzioni / Building Engineer. E-mail: giacomo.caccia@mail.polimi.it

Matteo Cavaglià

Ph.D. Student within the Department of Architecture, Built Environment and Construction Engineering (DABC) at the University of the Polytechnic of Milan in Italy. E-mail: matteo.cavaglia@polimi.it

Alberto Speroni

Researcher within the Department of Architecture, Built Environment and Construction Engineering (DABC) at the University of the Polytechnic of Milan in Italy. E-mail: alberto.speroni@polimi.it

Luis Palmero Iglesias

Prof. architect/building engineer within the Department of Building Architecture at the Universitat Politècnica de València. E-mail: lpalmero@csa.upv.es

Tiziana Poli

Full professor at the University of the Polytechnic of Milan in Italy, affiliated with the Department of Architecture, Built Environment and Construction Engineering (DABC). E-mail: tiziana.poli@polimi.it

Andrea Mainini

Associate professor at the University of the Polytechnic of Milan in Italy, affiliated with the Department of Architecture, Built Environment and Construction Engineering (DABC). E-mail: andreagiovanni.mainini@polimi.it

Abstract

People spend most of their lives indoors and providing them a good view to outside can be an important strategy to improve their indoor comfort. This study examines the relationship, still unclear, between outdoor view and daylight through the analysis of building 1C of Universitat Politecnica de València as a case study, following the UNI EN 17037 standard. The analysis compares the illuminance and glare levels with the view quality, focusing on the possible correlation between these aspects. The case study analysis investigates first the comfort condition of the actual building, later compared to two possible future scenarios: the addition of internal roller blinds and the construction of a new building in front of the case study one.

The findings reveal an inverse relationship between outdoor view quality and daylight availability: higher view quality often coincides with disturbing glare and excessive illuminance, reducing visual comfort despite better views. Additionally, the standard does not consider the impact of blinds or other shading devices, which can significantly alter the results. Finally, some differences between the perceived view and the calculated quality of it have been encountered, due to some calculation limitations of the standard.

Keywords

Outdoor view; EN 17037; visual comfort; daylight; building simulation

Introduzione

In media, le persone trascorrono oltre il 90% della loro vita in ambienti interni (EPA, 1989), rendendo l'accesso a viste di qualità altamente significativo per diverse ragioni. Secondo Lottrup et al. (Lottrup et al., 2015), la soddisfazione per le viste negli uffici, in particolare quelle che includono elementi naturali, è associata a un aumento della produttività e della soddisfazione lavorativa, migliorando così il comfort degli occupanti. L'impatto delle viste è rilevante in diversi ambienti, come ospedali (McCuskey Shepley, 2006), prigioni (Moore, 1981) e strutture educative (Matsuoka, 2010). Ad esempio, Kim e Wineman (Kim & Wineman, 2005) hanno osservato che, nelle aule universitarie, i posti vicino alle finestre sono preferiti rispetto a quelli più lontani, poiché le migliori viste offrono anche maggiori benefici psicologici.

Dal punto di vista medico, avere una vista adeguata sull'esterno può offrire "pause" dalle attività, aiutando a ridurre l'affaticamento visivo (Kaplan, 2001). Guardare brevemente paesaggi lontani mentre si svolgono attività come lavorare al computer ha un effetto rilassante sugli occhi (Thomson, 1998), (Aries et al., 2010). Complessivamente, viste piacevoli e ampie possono migliorare la salute e il benessere mentale degli occupanti (Kaplan, 1993), (Channon, 2023). Osservare elementi naturali ha numerosi effetti positivi, come la riduzione della pressione arteriosa diastolica (Hartig et al., 2003), (Knight & Haslam, 2010) e la diminuzione di depressione (Knight & Haslam, 2010), ansia (Chang & Chen, 2005), (Bodin & Hartig, 2003) e stress (Parsons et al., 1998), oltre a migliorare la capacità di attenzione, il benessere psicologico (R. Ulrich, 1993), (Verderber, 1986) e accelerare il recupero dalle malattie (R. S. Ulrich, 1984). Heschong e Saxena (Heschong & Saxena, 2003) hanno scoperto che una vista dall'ambiente di lavoro potrebbe migliorare la memoria e le funzioni cognitive dal 10% al 25%.

Il tipo di paesaggio visibile dalle finestre influisce significativamente sulla percezione del comfort degli occupanti. La ricerca ha dimostrato che le viste naturali, in particolare quelle che includono spazi verdi (Taylor et al., 2002) e corpi idrici (Bulut & Yilmaz, 2009), influenzano positivamente il comfort e il benessere soggettivo. Al contrario, le viste di aree urbane poco attraenti e strade possono avere un impatto negativo sul comfort, spesso a causa dell'associazione con inquinamento, qualità dell'aria inferiore e livelli di rumore più elevati (Farley & Veitch, 2001). È importante notare che anche la presenza di elementi naturali all'interno (ad esempio, piante e fiori) può produrre effetti positivi (Lohr et al., 1996). Inoltre, le viste di paesaggi naturali tendono a ridurre i problemi di abbagliamento più efficacemente rispetto alle viste urbane, con gli elementi acquatici che amplificano ulteriormente questo beneficio (Tuaycharoen & Tregenza, 2005).

Considerando la vista da un edificio, la privacy visiva è un fattore essenziale. Mentre le viste verso l'esterno dovrebbero essere massimizzate durante il giorno per migliorare il comfort degli occupanti, le viste verso l'interno devono essere limitate durante la notte (Dartevelle et al., 2014). La privacy è un aspetto fondamentale nella progettazione degli edifici residenziali (Heydaripour et al., 2017) e dovrebbe tenere conto delle diverse prospettive culturali e religiose, poiché queste possono influenzare le interpretazioni della privacy negli ambienti domestici (Al-Birawi & Adawi, 2019), (Rahim, 2015).

La letteratura sul rapporto tra luce diurna e vista sull'esterno afferma che questa relazione deve ancora essere chiarita, anche se esiste una forte connessione (Sasaki et al., 2023). Studiare questa correlazione è complesso, poiché numerose variabili influenzano le valutazioni del comfort visivo (Hellinga, 2013) e questi due aspetti hanno tra loro un'influenza reciproca: la valutazione di una vista può essere condizionata dai livelli di luce stessi, così come da altri fattori legati all'attività svolta durante la valutazione della vista (Khanie et al., 2013).

Per chiarire questa correlazione e indagare le principali limitazioni delle attuali procedure di calcolo, è stata condotta un'analisi su un caso studio reale, un edificio scolastico dell'Università Politecnica di Valencia (UPV), seguendo la metodologia della norma EN 17037 , secondo cui la vista viene valutata classificando l'area occupata del pavimento con un livello di qualità della vista tra insufficiente, minimo, medio e massimo. Questi livelli sono assegnati sulla base di tre criteri:

- distanza (F <6m; m >6m; M >20m; H >50m),
- horizontal sight angle (F <14°; m >14°; M >28°; H >54°),
- numero di layer visibili (F: nessuno layer visibile; m: solo paesaggio; M: paesaggio + 1 altro layer; H: paesaggio + 2 altri layer).

Introduction

On average, people spend over 90% of their lives indoors (EPA, 1989), making access to quality views of the outdoors highly significant for various reasons. According to Lottrup et al.(Lottrup et al., 2015), satisfaction with views in office settings, particularly those with natural elements, is associated with increased productivity and job satisfaction, which in turn enhances overall occupant comfort. The impact of views is important across different environments, including hospitals (McCuskey Shepley, 2006), prisons (Moore, 1981), and educational facilities (Matsuoka, 2010). For instance, Kim & Wineman (Kim & Wineman, 2005) observed that in university classrooms, seats near windows are preferred over those further away, as better views provide greater psychological benefits.

From a medical perspective, adequate views of the outdoors can offer "restorative mini-breaks" from tasks, helping to reduce eye strain (Kaplan, 2001). Briefly looking at distant landscapes while focusing on close-up tasks (like working on a computer) induces a relaxing effect on the eyes (Thomson, 1998), (Aries et al., 2010). Overall, pleasant and wide views can enhance occupant health and mental well-being (Kaplan, 1993), (Channon, 2023). Viewing natural elements has multiple positive effects, such as lowering diastolic blood pressure (Hartig et al., 2003), (Knight & Haslam, 2010), reducing depression (Knight & Haslam, 2010), anxiety (Chang & Chen, 2005), (Bodin & Hartig, 2003), and stress (Parsons et al., 1998), while also improving attention, psychological well-being (R. Ulrich, 1993), (Verderber, 1986) and accelerating recovery from illnesses (R. S. Ulrich, 1984). Heschong & Saxena (Heschong & Saxena, 2003) found that having a view from the workplace could enhance memory and cognitive function by 10% to 25%.

The type of landscape visible from windows significantly affects occupants' perception of comfort. Research has shown that natural views, particularly those featuring green spaces (Taylor et al., 2002) and water bodies (Bulut & Yilmaz, 2009), positively influence comfort and subjective well-being. Conversely, views of less appealing urban areas and streets may negatively impact comfort, often due to associations with pollution, lower air quality, and higher noise levels (Farley & Veitch, 2001). Notably, even the presence of natural elements indoors (e.g., plants and flowers) can produce positive effects (Lohr et al., 1996). Additionally, views of natural landscapes tend to alleviate glare issues more effectively than urban views, with water elements further enhancing this benefit (Tuaycharoen & Tregenza, 2005).

Lastly, when considering the view from a building, visual privacy is an essential factor. While outward views should be maximized during the day to enhance occupant comfort, inward views need to be limited at night (Dartevelle et al., 2014). Privacy is a critical aspect of residential building design (Heydaripour et al., 2017), and it should consider different cultural and religious perspectives, as these can influence varying interpretations of privacy in domestic settings (Al-Birawi & Adawi, 2019), (Rahim, 2015).

Literature about the relationship between daylight and outdoor view states that the relationship between them has still to be clarified, even if a strong connection is present (Sasaki et al., 2023). Investigating their correlation is difficult as a high number of variables is affecting visual comfort evaluations (Hellinga, 2013), and these two aspects have a mutual interaction on each other: for example, the rating of a view can be affected by the light levels itself, but also by the activity carried out while pursuing the view assessment (Khanie et al., 2013).

To clarify this correlation and investigate the main limitations of current calculation procedures, an analysis was conducted on a real case study—a school building at the Polytechnic University of Valencia (UPV)—following the methodology outlined in the EN 17037 standard. According to this standard, the view is evaluated by classifying the occupied floor area with a view quality level ranging from insufficient to minimum, medium, and maximum. These levels are assigned based on three criteria:

- distance (F <6m; m >6m; M >20m; H >50m),
- horizontal sight angle (F <14°; m >14°; M >28°; H >54°),
- number of layers seen (F: no layer seen; m: just landscape; M: landscape + 1 other layer; H: landscape + 2 other layers).

Definizione e modellazione del caso studio

Come caso studio è stato selezionato l'edificio 1C della Scuola di Ingegneria Edile dell'Universitat Politècnica de València, al fine di valutare l'equilibrio tra luce naturale, abbagliamento e outdoor view e analizzare le principali limitazioni dello standard EN 17037. Questo edificio ha funzioni sia amministrative che educative, e la sua analisi è particolarmente interessante in quanto il design delle schermature si è rivelato non particolarmente efficace rispetto all'orientamento attuale dell'edificio, causando problemi legati all'illuminazione naturale e al comfort termico, con conseguente attivazione precoce dei sistemi di raffrescamento per bilanciare i carichi termici eccessivi. L'analisi attuale sulla luce naturale e sulla vista può fornire un contributo importante per futuri miglioramenti e ristrutturazioni dell'edificio.

L'analisi seguente esamina l'outdoor view in combinazione con la luce naturale e l'abbagliamento, poiché questi fattori sono strettamente interconnessi, rendendo particolarmente interessante valutare la loro relazione e influenza reciproca. Sebbene il comfort termico sia intrinsecamente legato a questi aspetti, non sarà affrontato in questa analisi.

Questo studio è stato condotto modellando l'edificio in Rhinoceros 7 e sviluppando simulazioni con ClimateStudio, un plug-in per Rhino, in conformità alla norma EN 17037, utilizzando il file meteo EPW (TMYx.2004-2018) di Valencia fornito dallo CS stesso. Per semplificare il modello e velocizzare i calcoli, tutti gli elementi come pareti, pavimenti e finestre sono stati semplificati come superfici, con l'eccezione delle schermature orizzontali fisse sulle pareti vetrate, che sono state modellate in 3D. I materiali sono stati selezionati tra quelli disponibili in ClimateStudio e sono riportati nella Tabella 1. Il terreno, ad eccezione della parte erbosa, non è stato modellato poiché tutti gli edifici sono stati posizionati a un'altezza di Z=0, che corrisponde al terreno di default in ClimateStudio. Un confronto tra l'edificio reale e il modello è mostrato nella Figura 1.

Tabella 1. Materiali assegnati in ClimaStudio e relative prorietà.
Table 1. Assigned Material in ClimateStudio and related properties.

Oggetto / Object	**Materiale / Material**		**Rugosità (%) / Roughness (%)**	**VR (%)**
Muri / Walls	Vernice bianca / White paint		0.20	84
Soffitti / Ceilings				
Pavimenti / Floors	Ceramica /Ceramic		0.20	33.7
Edificio di contest / Context building	Cemento/Concrete		0.30	33.4
Prato / Grass	Prato / Grass		0	7.4
Alberi / Trees				
Foglie / Leaves	Acero / Acer		0	10.3/8.6
Rami / Twig	Corteccia / Bark		0	14.9
Tronco / Trunk				
Finestre e schermature / Windows and shadings				
Telai finestre / Window frames	PVC grigio / Grey PVC		0.05	10.7
Schermature fisse / Fixed shadings				
	LT (%)	**VR (%)**	**U-value (W/m² K)**	**SF (%)**
Vetro / Glass	73	15	1.5	75

L'analisi delle viste è stata condotta considerando un'altezza del piano di lavoro di 1,2 m, corrispondente all'altezza media della testa di una persona seduta, come suggerito sia da ClimateStudio che dalla norma EN 17037. Poiché anche l'abbagliamento è correlato alla posizione della testa, l'altezza di 1,2 m è stata impostata come altezza di analisi anche per la valutazione annuale dell'abbagliamento, mentre l'analisi della luce naturale è stata eseguita considerando un'altezza del piano di lavoro di 0,8 m, ovvero l'altezza di riferimento di una scrivania per ufficio o scuola.

L'analisi si compone di tre fasi principali: una valutazione iniziale delle condizioni attuali dell'edificio, seguita da un'indagine sull'implementazione di sistemi di schermatura interna con tende a rullo. La fase finale esamina l'impatto dell'aggiunta di un nuovo edificio nel contesto circostante e i suoi effetti sulle variabili studiate.

Case study definition and modeling

As a case study, building 1C at the Building Engineering School of the Universitat Politècnica de València has been selected, in order to evaluate the breakeven between light, glare and view out and benchmarking the main limitations of the EN 17037 standard. This building is both an administrative and educational one, and its analysis is particularly interesting as the shading design has resulted not to be particularly effective according to the actual building orientation, causing problems related to daylight and thermal comfort, that lead to an early activation of the cooling systems to balance the excessive thermal loads. The actual daylight and view analysis can give an important contribution in case of future improvements and refurbishment of the building.

The following analysis examines outdoor views in conjunction with natural light and glare, as these factors are closely interrelated, making it highly interesting to assess their relation and mutual influence. Although thermal comfort is also intrinsically linked to these aspects, it will not be considered in this work.

This study has been carried out modeling the building in Rhinoceros 7, and simulations were developed using ClimateStudio, a Rhino plug-in, according to the EN 17037 standard, using the València EPW (TMYx.2004-2018) provided by the tool itself. To simplify the model and speed up calculations, all elements such as walls, floors, and windows have been simplified as surfaces, with the exception of the horizontal fixed shading devices on the curtain walls, which were modeled in 3D. The materials have been selected from the ClimateStudio ones and are reported in Table 1. The ground, except the grass part, has not been modeled as all the buildings have been placed at a height of Z=0, that is the ground default plane of CS. A comparison between the model and real case study is shown in Figure 1.



Figura 1. Comparazione tra il modello Rhino e l'edificio attuale. Prospetto sud (top). Prospetto est (bottom).
Figure 1. Comparison between Rhino model and real building. South elevation (top). East elevation (bottom).

The view analysis has been carried out considering a workplane height of 1.2 m, that is the average height of the head of a seated person, suggested by CS and EN 17037 as well. As glare is related to the head position too, 1.2 m has been set as the analysis height also for annual glare evaluation, whereas the daylight analysis has been pursued considering a workplane height of 0.8m, that is the reference height of an office or school desk.

The analysis consists of three main stages: an initial evaluation of the building's current conditions, followed by an investigation into the implementation of internal roller blind shading systems. The final stage examines the impact of adding a new building in the surrounding context and its effects on the studied variables.

Analisi dello stato di fatto

Prima, è stata effettuata un'analisi dell'edificio senza considerare le schermature interne. Questa analisi confronta la vista, valutata secondo la norma EN 17037, insieme alla luce naturale e all'abbagliamento. La luce naturale è stata valutata considerando l'illuminamento durante i giorni e le ore più caratteristiche dell'anno, riportato sinteticamente con una rappresentazione a boxplot, la spatial Daylight Autonomy (sDA) con una soglia minima di 300 lux e l'Useful Daylight Illuminance (UDI), considerando un intervallo utile tra 300 e 2000 lux. L'abbagliamento, invece, è stato valutato utilizzando lo spatial Disturbing Glare (sDG), che indica sull'area regolarmente occupata la percentuale di vista che sperimenta abbagliamento disturbante o intollerabile (DGP > 38%) per almeno il 5% delle ore occupate, considerando valori per otto diverse direzioni di vista.

Dopo un'analisi complessiva dell'intero edificio, è stato valutato un singolo spazio. L'area considerata è l'ufficio del direttore della Scuola di Ingegneria Edile, che ha un'area di 87 m² e si trova al terzo piano. Ha una finestra esposta a sud, mentre il lato est è completamente vetrato, poiché caratterizzato da una facciata continua. I risultati dell'analisi sono riportati nella Figura 2, ad eccezione dell'illuminamento della stanza dei giorni più significativi, mostrato in Figura 3.

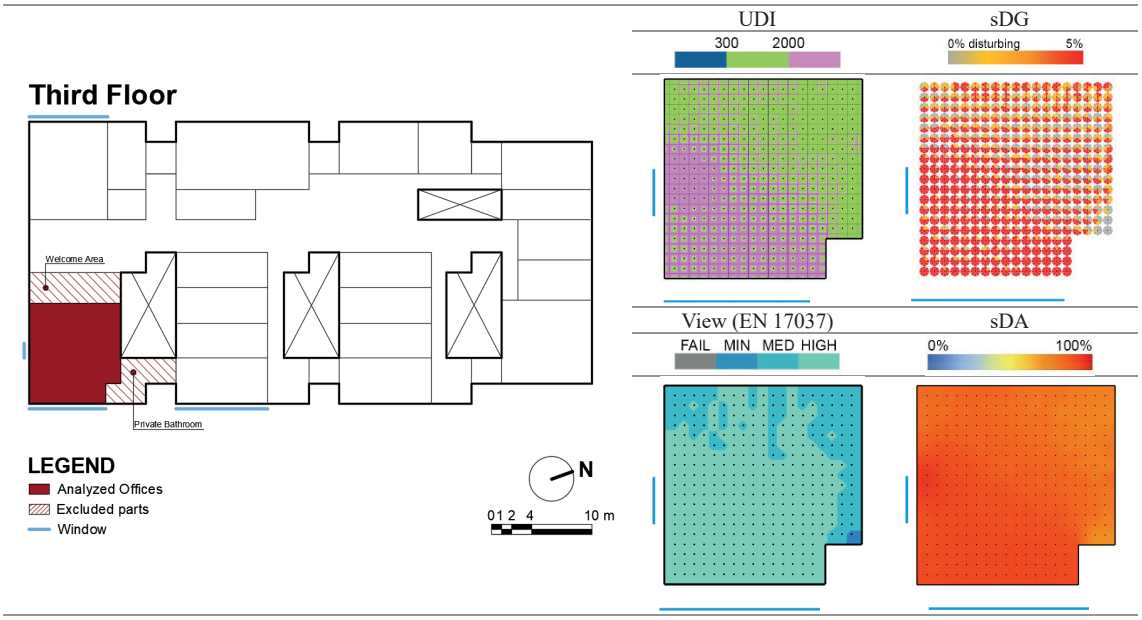


Figura 2. Localizzazione dell'area considerata (sinistra) e risultati dei diversi parametri analizzati (destra).
Figure 2. Location of the considered area (left) and results of the different analyzed variables (right).

A causa della grande parete vetrata sul lato est, dal punto di vista dell'illuminazione naturale, i problemi sono più rilevanti: soprattutto nelle ore mattutine, quando il sole è direttamente rivolto verso la parete vetrata, si registrano valori elevati di illuminamento. Questo stesso risultato è visibile anche nelle mappe di UDI e sDA riportate nella figura precedente. Questi risultati mostrano che l'attuale sistema di schermatura fissa orizzontale non è particolarmente efficace.

Dal lato della vista, invece, l'ufficio mostra buoni risultati, poiché la maggior parte dell'area analizzata presenta il livello massimo di qualità della vista. Questo risultato soddisfacente è dovuto principalmente al fatto che uno dei lati della stanza è una parete vetrata che consente un ampio accesso alla vista.

Il risultato principale è che l'analisi della vista e dell'illuminazione naturale hanno portato a risultati discordanti: dove la vista presenta i valori più alti, c'è una grande presenza di abbagliamento disturbante e l'illuminamento supera la soglia superiore dell'intervallo UDI.

Actual building analysis

First, an analysis of the building without internal shadings has been made. This analysis compares the view, evaluated according to EN 17037 standard, with daylight and glare. Daylight has been evaluated considering the point-in-time illuminance of the most characteristic days and hours of the year, synthetically reported with a boxplot representation, the spatial Daylight Autonomy (sDA) with a minimum threshold of 300 lux and the Useful Daylight Illuminance (UDI), considering a useful range between 300 and 2000 lux. Glare, instead, has been evaluated using the spatial Disturbing Glare (sDG), that that indicates the percentage of view across the regularly occupied floor that experiences disturbing or intolerable glare (DGP > 38%) for at least 5% of the occupied hours, considering values for eight different view directions.

After an overall analysis of the entire building, a single space has been evaluated. The considered area is the office of the director of the Building Engineering School, that has an area of 87 m^2 and is located on the third floor. It has a window exposed to South, whereas the East side is completely glazed, as it is characterized by the curtain wall. The results of the analysis are reported in Figure 2, except the point-in-time illuminance results, shown in Figure 3.

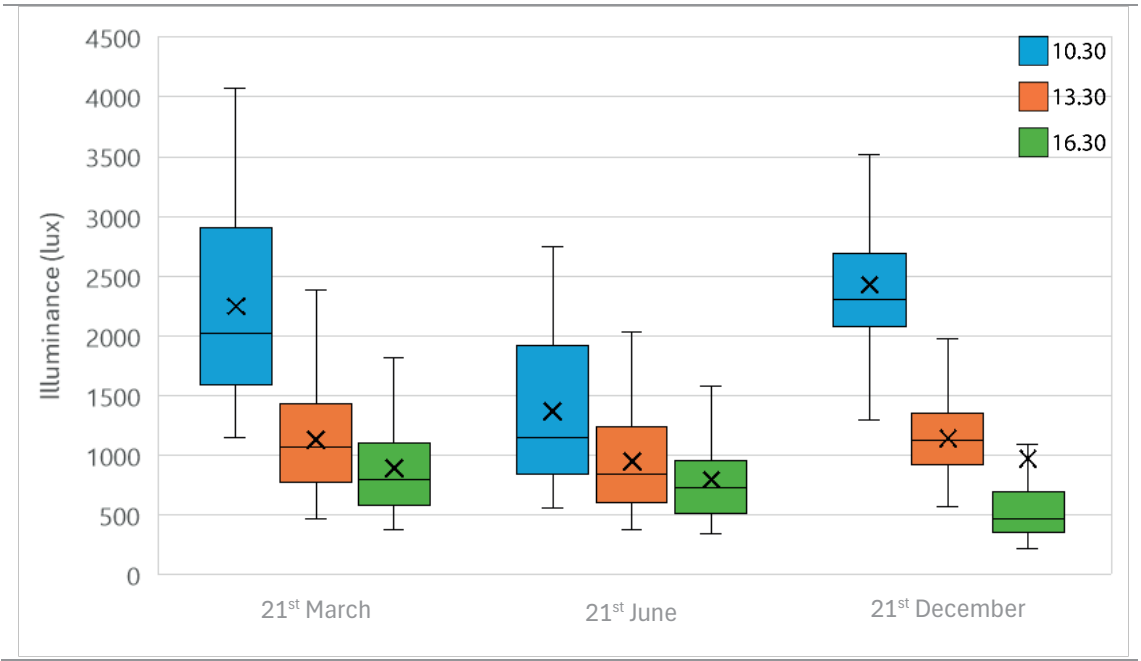


Figura 3. Analisi di illuminamento dei giorni più rilevanti.
Figure 3. Point.in.time illuminance analysis for the most relevant days.

Due to the large curtain wall on the East side, from the daylight point of view, the problems are more relevant: especially in the morning hours, when the sun is directly facing the curtain wall, high illuminance values are registered. This same result can be seen also in UDI and sDA maps visible in the previous figure. These results show that the actual horizontal fixed shading system is not highly effective.

On the view side, instead, the office shows good results, as most of the analyzed area has the maximum level of quality view. This satisfying result is mainly due to the fact that one of the room's sides is a curtain wall that allows more view access.

The main result is that the analyses of view and daylight have led to discordant results: where the view has the highest values, there is a high presence of disturbing glare and the illuminance overcome the upper threshold of the UDI range.

Possibili scenari futuri

Per approfondire l'analisi, sono stati considerati due possibili scenari futuri: l'aggiunta di tende a rullo interne automatizzate in tutto l'edificio e la costruzione di un nuovo edificio di fronte all'esistente.

L'obiettivo principale della prima analisi (Figura 4) è comprendere come l'introduzione delle tende, una soluzione comune per controllare la luce naturale, influisca sulla valutazione della vista secondo la norma EN 17037, oltre a proporre una soluzione che mitighi i problemi di abbagliamento e illuminamento riscontrati in alcune zone dell'edificio. Sono stati testati due tipi di schermatura diversi: una tenda trasparente (VT=6%) e una opaca, con la stessa regola di attivazione (illuminamento > 2000 lux).

L'aggiunta della tenda trasparente, dal punto di vista dell'illuminazione naturale, migliora le condizioni di luce e aiuta a ridurre i problemi di abbagliamento. Per questi ultimi, nello specifico, la tenda opaca si è rivelata più efficace, causando però illuminamento insufficiente in alcuni aree. Considerando la vista, i risultati sono interessanti poiché mostrano che l'aggiunta delle tende a rullo, così come la loro trasparenza, non ha alcun impatto sulla qualità della vista secondo la norma EN 17037. Non considerare le schermature nel calcolo può causare interpretazioni errate dei risultati della qualità della vista, poiché, in generale, se una tenda a rullo è abbassata, completamente o parzialmente, la vista verso l'esterno è ridotta o totalmente negata.

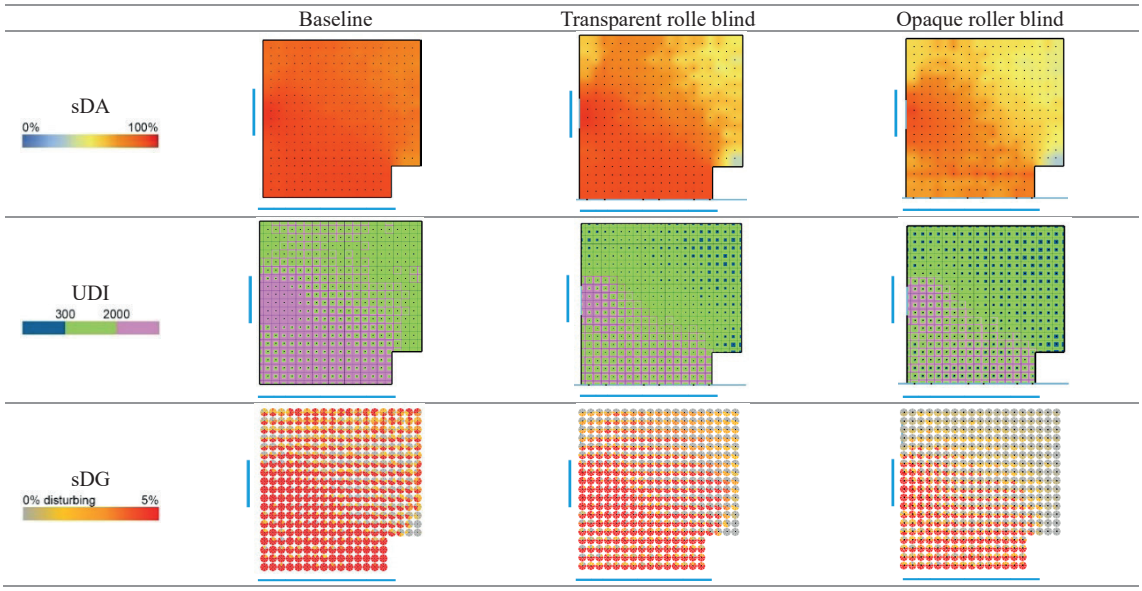


Figura 4. Impatto delle schermature mobili su luce e abbagliamento. Figure 4. Impact of movable shadings on daylight and glare.

L'ultimo passo dell'analisi del caso studio è la valutazione della vista nel caso di aggiunta di un edificio accanto a quello analizzato (Figura 5). Oltre allo scenario attuale, sono stati analizzati due casi: il primo (Caso A) con un nuovo edificio posto a 14,5 m da quello esistente e il secondo (Caso B) con il nuovo edificio a 13,5 m. Queste distanze sono state decise per testare i criteri della norma EN 17037, in particolare quello relativo alla distanza.

Il primo risultato è che, confrontando lo scenario attuale con il Caso A, si può notare che, sebbene la vista sia notevolmente diversa, i risultati della vista sono esattamente gli stessi, nonostante si vedano meno elementi verdi e cielo nella vista. Un altro risultato rilevante è che, confrontando Caso A e B, sebbene la vista sia quasi identica, la valutazione della vista mostra risultati molto diversi.

Conclusioni

Le schermature mobili non sono mai considerate nell'attuale metodologia di calcolo per la view out, poiché il loro funzionamento non è incluso nell'indicatore della norma, mentre sono considerate nel calcolo della luce naturale. Possibili scenari di transizione delle condizioni esterne possono modificare il calcolo di vista e luce: un cambiamento del contesto influisce su entrambi gli aspetti, mentre un'ipotetica ristrutturazione in cui vengono aggiunte tende ad attivazione automatica, secondo la norma considerata, impatta solo sul controllo della luce naturale. La view out e la naturale luce sembrano avere una relazione inversa, ma il confronto attuale si basa su metriche annuali per la luce e atemporali per la vista, quindi i risultati devono essere meglio studiati in futuri sviluppi del lavoro.

Possible future scenarios

To deepen the analysis, two possible future scenarios have been considered: the first one considers the addition of automated internal roller blinds in the whole building, wherease the second one evaluates the effects of the construction of a new building in front of the analyzed one.

The main goal of the refurbishment analysis (Figure 4) is to understand how the introduction of blinds, a common solution to control daylight, affects the view evaluation according to EN 17037, besides proposing a solution that mitigates glare and excessive illuminance problems in some parts of the building. Two different shading types have been tested: a transparent blind (VT=6%) and an opaque one, with the same activation rule (illuminance > 2000 lux).

The addition of the transparent blinds, from the daylight point of view, brings better light conditions and helps reduce glare problems. For these ones specifically, the opaque blind has resulted to be more effective, but caused insufficient light levels in some areas. On the view side, results are interesting as they show that the addition of roller blinds, as well as their transparency, has no impact at all on the quality of a view according to EN 17037. Not considering the shadings in the calculation can cause misleading interpretations of the quality view results, as, in general, if a roller blind is down, completely or partially, the view to outdoors is reduced or totally denied.

The last step of the case study analysis is the evaluation of the view in case of addition of a building next to the analyzed one (Figure 5). Besides the actual scenario, two cases have been analyzed: the first one (Case A) with a new building placed at 14.5 m from the existing one and the second one (Case B) with the new building at 13.5 m. These distances have been decided in order to challenge the EN 17037 criteria, especially the distance one.

The first result is that, comparing the current scenario with Case A, although the view is noticeably different, the view results are exactly the same, despite the fact that fewer green elements and less sky are seen in the view. Another relevant finding is that, comparing Case A and B, although the perceived view is almost identical, the view assessment shows very different results.

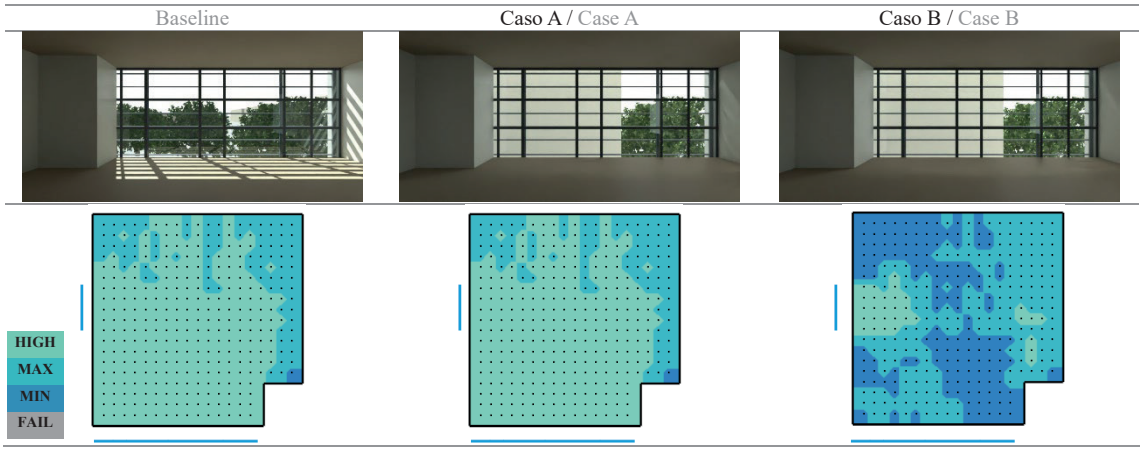


Figura 5. Impatto della costruzione di un nuovo edificio sulla vista. Figure 5. Impact of the construction of a new building on view.

Conclusions

Movable shading systems are never considered in the current calculation methodologies for the view out, since their operation is not included in the indicator of the standard, while they are considered in the calculation of the natural light condition. Possible transition scenarios of external conditions can change the calculation of view and light: a change in the context affects both aspects, while a hypothetical renovation of the building in which automatically activated blinds are added, according to the current standard, only impacts the control of natural light. Outdoor view and daylight seem to have an inverse relationship, but the actual comparison is based on annual metrics for light and timeless ones for view, so results need to be better investigated in future works.

BIBLIOGRAFIA / BIBLIOGRAPHY

Al-Birawi, S., & Adawi, A. A.-D. (2019). Privacy Criterions And Elements In Islamic Residential Architecture. *Jordanian Journal of Islamic Studies*, 403. https://doi.org/10.33985/1638-015-003-020

Aries, M. B. C., Veitch, J. A., & Newsham, Guy. R. (2010). Windows, view, and office characteristics predict physical and psychological discomfort. *Journal of Environmental Psychology*, *30*(4), 533–541. https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2009.12.004

Bodin, M., & Hartig, T. (2003). Does the outdoor environment matter for psychological restoration gained through running? *Psychology of Sport and Exercise*, *4*(2), 141–153. https://doi.org/10.1016/S1469-0292(01)00038-3

Bulut, Z., & Yilmaz, H. (2009). Determination of waterscape beauties through visual quality assessment method. *Environmental Monitoring and Assessment*, *154*(1–4), 459–468. https://doi.org/10.1007/s10661-008-0412-5

Chang, C.-Y., & Chen, P.-K. (2005). Human Response to Window Views and Indoor Plants in the Workplace. In *HORTSCIENCE* (Vol. 40, Issue 5).

Channon, B. (2023). Happy by Design: A Guide to Architecture and Mental Wellbeing. In *Happy by Design: A Guide to Architecture and Mental Wellbeing*. RIBA Publishing. https://doi.org/10.4324/9781032651897

Dartevelle, O., Bodart, M., Dartevelle, O., Sc Arch Deneyer, M. A., & Sc Arch Bodart, M. M. (2014). *PROSOLIS: a Web Tool for Thermal and Daylight Characteristics Comparison of Glazing Complexes*. https://doi.org/10.13140/2.1.1925.1522

EPA. (1989). *Report to Congress on indoor air quality. Volume 2: Assessment and control of indoor air pollution*. https://hero.epa.gov

Farley, K. M. J., & Veitch, J. A. (2001). *A room with a view: a review of the effects of windows on work and well-being*. https://doi.org/10.4224/20378971

Hartig, T., Evans, G. W., Jamner, L. D., Davis, D. S., & Gärling, T. (2003). Tracking restoration in natural and urban field settings. *Journal of Environmental Psychology*, *23*(2), 109–123. https://doi.org/10.1016/S0272-4944(02)00109-3

Hellinga, H. (2013). *Daylight and View: The Influence of Windows on the Visual Quality of Indoor Spaces*. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:131694287

Heschong, L., & Saxena, M. (2003). *Windows and Offices: A Study of Office Worker Performance and the Indoor Environment*. https://www.researchgate.net/publication/328416566

Heydaripour, O., Behmaneshnia, F., Talebian, E., & shahi, P. H. (2017). *A Survey on Privacy of Residential Life in Contemporary Apartments in Iran*. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:212509861

Kaplan, R. (1993). The role of nature in the context of the workplace. *Landscape and Urban Planning*, *26*(1–4), 193–201. https://doi.org/10.1016/0169-2046(93)90016-7

Kaplan, R. (2001). The Nature of the View from Home. *Environment and Behavior*, *33*(4), 507–542. https://doi.org/10.1177/00139160121973115

Khanie, M. S., Stoll, J., Mende, S., Wienold, J., Einhäuser, W., & Andersen, M. (2013). *Uncovering relationships between view direction patterns and glare perception in a daylit workspace*. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:17895549

Kim, J.-J., & Wineman, J. (2005). *Are Windows and Views Really Better? A Quantitative Analysis of the Economic and Psychological Value of Views*.

Knight, C., & Haslam, S. A. (2010). The relative merits of lean, enriched, and empowered offices: An experimental examination of the impact of workspace management strategies on well-being and productivity. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *16*(2), 158–172. https://doi.org/10.1037/a0019292

Lohr, V. I., Pearson-Mims, C. H., & Goodwin, G. K. (1996). Interior Plants May Improve Worker Productivity and Reduce Stress in a Windowless Environment. *Journal of Environmental Horticulture*, *14*(2), 97–100. https://doi.org/10.24266/0738-2898-14.2.97

Lottrup, L., Stigsdotter, U. K., Meilby, H., & Claudi, A. G. (2015). The Workplace Window View: A Determinant of Office Workers' Work Ability and Job Satisfaction. *Landscape Research*, *40*(1), 57–75. https://doi.org/10.1080/01426397.2013.829806

Matsuoka, R. H. (2010). Student performance and high school landscapes: Examining the links. *Landscape and Urban Planning*, *97*(4), 273–282. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.06.011

McCuskey Shepley, M. (2006). The role of positive distraction in neonatal intensive care unit settings. *Journal of Perinatology*, *26*(S3), S34–S37. https://doi.org/10.1038/sj.jp.7211584

Moore, E. O. (1981). A Prison Environment's Effect on Health Care Service Demands. *Journal of Environmental Systems*, *11*(1), 17–34. https://doi.org/10.2190/KM50-WH2K-K2D1-DM69

Parsons, R., Tassinary, L. G., Ulrich, R. S., Hebl, M. R., & Grossman-Alexander, M. (1998). The view from the road: implications for stress recovery and immunization. *Journal of Environmental Psychology*, *18*(2), 113–140. https://doi.org/10.1006/jevp.1998.0086

Rahim, Z. A. (2015). The Influence of Culture and Religion on Visual Privacy. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *170*, 537–544. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.01.055

Sasaki, S., Oe, Y., Kishimoto, N., Taniguchi, K., Yoshizawa, N., & Budoh, Y. (2023). Causal connection between psychological view and daylighting evaluation in living spaces. *CIE X050:2023 Proceedings of the 30th Session of the CIE, Ljubljana, Slovenia, September 15 – 23, 2023, Volume 1*, 1472–1479. https://doi.org/10.25039/x50.2023.PO089

Taylor, A. F., Kuo, F. E., & Sullivan, W. C. (2002). Views of nature and self-discipline: evidence from inner city children. *Journal of Environmental Psychology*, *22*(1–2), 49–63. https://doi.org/10.1006/jevp.2001.0241

Thomson, W. (1998). Eye problems and visual display terminals--the facts and the fallacies. *Ophthalmic and Physiological Optics*, *18*(2), 111–119. https://doi.org/10.1016/S0275-5408(97)00067-7

Tuaycharoen, N., & Tregenza, P. R. (2005). Discomfort glare from interesting images. *Lighting Research and Technology*, *37*(4), 329–341. https://doi.org/10.1191/1365782805li147oa

Ulrich, R. (1993). Biophilia, biophobia, and natural landscapes. *Biophilia, Biophobia, and Natural Landscapes*, 73–137.

Ulrich, R. S. (1984). View through a window may influence recovery from surgery. *Science*, *224*(4647), 420–421. https://doi.org/10.1126/science.6143402

Verderber, S. (1986). Dimensions Ofperson-Window Transactionsin the Hospital Environment. *Environment and Behavior*, *18*(4), 450–466. https://doi.org/10.1177/0013916586184002

NOMENCLATURA / NOMENCLATURE

F	Failing	VR	Visual Reflectance	sDG	spatial Disturbing Glare
m	Minimum	VT	Visual Trasmittance	UDI	Useful Daylight Illuminance
M	Medium	SF	Solar Factor	DGP	Disturbing Glare Probability
	High	sDA	spatial Daylight Autonomy		

LA ACÚSTICA DE LA ÓPERA DE SÍDNEY

THE ACOUSTICS OF THE SYDNEY OPERA HOUSE

Quiteria Angulo-Ibáñez
Investigadora del CITE. Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Profesora. Doctora en Arquitectura por la UPV. E-mail:quianib@csa.upv.es
CITE Researcher. Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València, Assistant Professor. Architect. PhD in Architecture by the UPV

Aitana Puig-Rocher
Arquitecta / Architect

Abstract

The present analysis is carried out on the Sydney Opera House, emphasising the socio-cultural, architectural and acoustic study of this representative auditorium. The main purpose of the present work is to evaluate the acoustic quality of the concert hall at the Sydney Opera House. For this purpose, the construction, architectural, conditioning and insulation conditions of the auditorium have been considered. Following this analysis, an evaluation of the acoustic performance will be made according to the architectural configuration. In this way, the acoustic functionality of the building can be seen according to its use and architectural-compositional distribution and its acoustic quality can be evaluated. And as Peter Zumthor would say, every space functions as a great instrument, it mixes sounds, amplifies them, transmits them everywhere. In this sense, architecture is the place where the relationship between musician and spectator becomes a reality, and acoustics is the tool for this. Music and architecture make time and space tangible.

Keywords
Sydney Opera House, Acoustics, Acoustic Conditioning, Acoustic design, Reverberation time

Introducción

La Ópera de Sídney es un proyecto del arquitecto danés Jørn Utzon y fue inaugurada en 1973. Para el diseño de la sala de conciertos se realizaron pruebas con modelos a escala 1/10 que revelaron problemas en la distribución del sonido en ciertas áreas, donde el sonido directo dominaba sobre las reflexiones laterales. Esto motivó modificaciones en la morfología de la sala. El diseño definitivo incluyó un techo con nervaduras irradiantes y un contorno ajustado en planta. Nuevas pruebas indicaron que los valores de Tiempo de Energía Decayente (EDT) eran superiores a los de Tiempo de Reverberación (RT), lo que corregía las deficiencias acústicas previas en la zona de la orquesta, aunque se sospechaba que valores altos de EDT podrían afectar la articulación del sonido.

El propósito principal del presente trabajo es evaluar la calidad acústica de la sala de conciertos en la Ópera de Sídney. Para ello, tras esta breve contextualización se ha proseguido a la obtención de los parámetros acústicos más determinantes que ayudarán a realizar un el análisis acústico completo de la sala.

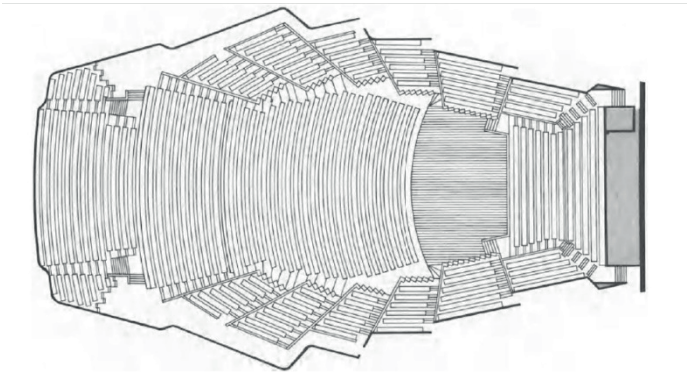


Imagen 1. Plano de planta de la sala de conciertos. Fuente: BERANEK, LEO. (1996). Concert Halls and Opera Houses
Image 1. Floor plan of the concert hall. Source: BERANEK, LEO. (1996). Concert Halls and Opera Houses

La sala de conciertos tiene una disposición interna única que sitúa la plataforma de la orquesta en la parte delantera, ocupando una cuarta parte de la sala. Su capacidad es de 2.696 asientos, con 410 en la sección trasera y 158 en dos palcos laterales, mientras que otros 10 palcos inclinados están distribuidos a cada lado, proporcionando asientos adicionales. Los datos técnicos de la sala se presentan en la tabla 1. Los parámetros que evalúan la calidad acústica han sido adquiridos utilizando el software Odeon (Odeon Room Acoustics Program versión 10.1 Licencia Campus UPV, 2023), a través de la simulación con un modelo 3D de la sala. Para ello se emplean los valores del tiempo de reverberación provenientes de fuentes bibliográficas para ajustar los materiales y sus respectivos coeficientes de absorción en el recinto y así obtener el resto de los parámetros necesarios como el BR (calidez), Br (brillo), C80 (claridad), LF80 (factor lateral). Para realizar el análisis acústico y su posterior evaluación, se han considerado las particularidades técnicas y geométricas de la sala, la materialidad utilizada, las reflexiones presentes y la calidad de visibilidad que ofrece a los espectadores tal y como se aprecia en las figuras 1 y 2. Además, se han considerado los parámetros de calidad acústica fundamentales. Todo ello con el fin de obtener una evaluación integral de la calidad sonora de la sala.

Plan Experimental

Materiales

En las paredes laterales el 33% inferior está construido con madera laminada de 1,9 cm. Las paredes de los balcones siguen el mismo diseño y material que las paredes inferiores. El techo está compuesto por una capa de madera contrachapada de 1,25 cm sobre un tablero de plástico de 2,54 cm. El toldo flotante se compone de 21 reflectores circulares de acrílico transparente con forma de sección toroidal. La altura oscila entre 8,2 y 10,7 m sobre el nivel del escenario, siendo esta última la más habitual.

Introduction

The Sydney Opera House was designed by Danish architect Jørn Utzon and inaugurated in 1973. For the design of the concert hall, tests with 1/10 scale models revealed problems with sound distribution in certain areas, where direct sound dominated over lateral reflections. This led to modifications in the morphology of the hall. The final design included a ceiling with radiating ribs and a tight contour in plan. Further testing indicated that the Early Decay Time (EDT) values were higher than the Reverberation Time (RT) values, which corrected the previous acoustic deficiencies in the orchestra area, although it was suspected that high EDT values might affect the articulation of the sound.

The main purpose of the present work is to evaluate the acoustic quality of the concert hall at the Sydney Opera House. For this aim, after this contextualization, we have proceeded to obtain the most important acoustic parameters that will help us to carry out a complete acoustic analysis of the hall. The concert hall has a unique internal layout which places the orchestra platform at the front, occupying a quarter of the hall. Its capacity is 2,696 seats, with 410 in the rear section and 158 in two side boxes, while a further 10 sloping boxes are distributed on each side, providing additional seating. The technical data of the hall are presented in table 1.

24.600 m^3	V: volumen de la sala / volume of the hall
1.362 m^2	Sa: superficie de butacas / seating area
1.563 m^2	SA: superficie acústica de la audiencia / acoustic audience area
180,7 m^2	So: superficie del escenario / stage area
1.744 m^2	ST: SA + So
2.679	N: número de asientos / number of seats
16,8 m	H: altura media de la sala / average height of the hall
33,2 m	W: anchura media de la sala / average width of the hall
31,7 m	L: longitud media de la sala / average length of the hall
44,5 m	D: distancia entre el centro del escenario y el oyente más alejado / distance between the centre of the stage and the farthest listener.

Tabla 1 Detalles técnicos de la sala de conciertos. Fuente: BERANEK, LEO. (1996). Concert Halls and Opera Houses
Table 1 Technical details of the concert hall. Source: BERANEK, LEO. (1996). Concert Halls and Opera Houses

The parameters that evaluate the acoustic quality have been acquired using the Odeon software (Odeon room acoustics program version 10.1 UPV campus license, 2023), through simulation with a 3D model of the room. The reverberation time values from bibliographic sources are used to adjust the materials and their respective absorption coefficients in the room and obtain the rest of the necessary parameters such as BR (warmth), Br (brightness), C80 (clarity), LF80 (lateral factor). In order to perform the acoustic analysis and its subsequent evaluation, the technical and geometrical particularities of the hall, the material used, the reflections present and the quality of visibility offered to the spectators have been considered, as shown in figures 1 and 2. In addition, the fundamental acoustic quality parameters have been considered. All this in such a way as to obtain a comprehensive evaluation of the sound quality of the hall.

Experimental Plan

Materials

The lower 33% of the side walls are made of 1.9 cm plywood. The balcony walls follow the same design and material as the lower walls. The roof consists of a 1.25 cm plywood layer on a 2.54 cm plastic board. The floating canopy consists of 21 circular transparent acrylic reflectors in the shape of a toroidal section. The height ranges from 8.2 to 10.7 m above stage level, the latter being the most common.

Los asientos cuentan con un respaldo de madera contrachapada moldeada de 1,9 cm, mientras que el cojín del respaldo está elaborado con poliuretano contorneado y tapizado en lana. Los suelos están compuestos por madera laminada de 3,2 cm sobre un espacio de retorno de aire de 0,75 cm. Además, no se utiliza ninguna alfombra en la sala. Para el cierre del escenario se utiliza el mismo material que en las paredes laterales. El suelo del escenario sigue la misma estructura que el resto de los suelos y su altura es de 1,27 m. Se diseñaron grandes paredes laterales que conforman los frontales de los palcos con el objetivo de que el sonido se refleje de manera temprana en al menos la mitad de la zona central de asientos. Los asientos en las secciones superiores reciben reflexiones iniciales provenientes de los fondos y los bordes del techo. A continuación, se muestran las reflexiones producidas por los antepechos de los palcos de un lado y por los tramos relevantes de una parte del techo de la sala:

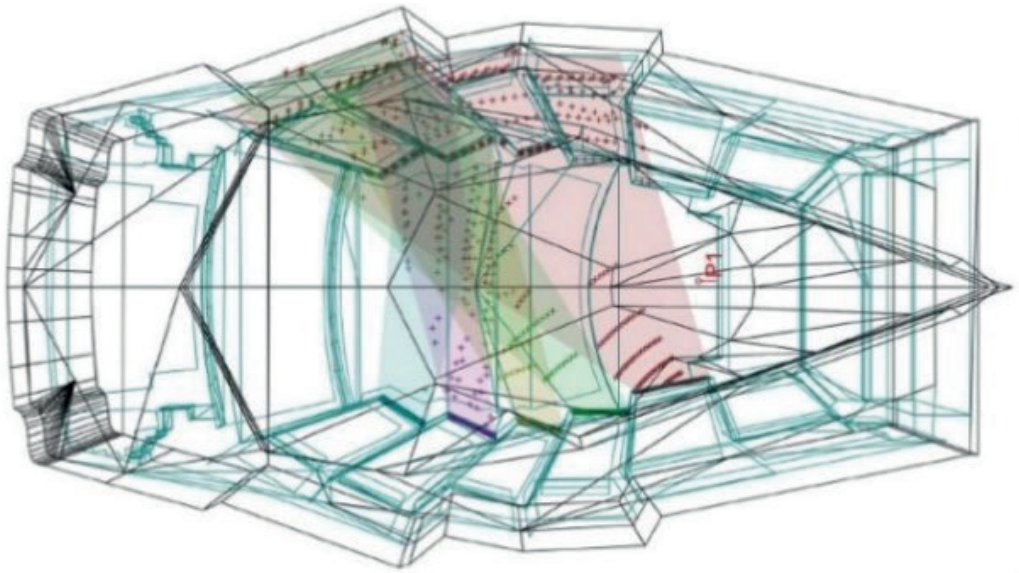


Figura 1. Reflexiones en la sala en vista cenital. Fuente: Propia

Figure 1. Sound reflections in the room in zenithal view. Source: own

Procedimiento para la obtención de los parámetros acústicos

De cara a analizar la acústica de la sala se trabajó con simulación acústica. Para tal fin, se realiza un modelo 3D del espacio que es cargado en el software especializado en acústica de salas denominado Odeon. Dicho software, al basarse en el modelo 3D y tomar en cuenta la materialidad específica de la sala, mediante simulación por trazado de rayos permite simular y evaluar la acústica en el interior, así como determinar los parámetros acústicos correspondientes a la sala en cuestión. Para ello se asignan coeficientes de absorción a las diferentes superficies utilizando los materiales previamente determinados para cada solución constructiva. Dada la indeterminación del comportamiento absorbente de las superficies del techo, se deja esta como variable para calibrar el modelo. Por lo tanto, se ajusta este factor en función del RTmid (tiempo de reverberación medio) obtenido a través de la investigación bibliográfica.

Los coeficientes de absorción utilizados para cada superficie fueron los siguientes de la Tabla 2:

Tras la asignación de los materiales se comprueba que el tiempo de reverberación medio obtenido en el modelo era similar al de la sala original (Tabla 3).

The seats have a 1.9 cm moulded plywood backrest, while the backrest cushion is made of contoured polyurethane and upholstered in wool. The floors are composed of 3.2 cm plywood over a 0.75 cm air return gap. In addition, no carpeting is used in the hall. The same material is used for the stage enclosure as for the side walls. The stage floor follows the same structure as the rest of the floors and is 1.27 m high. Large side walls that make up the fronts of the boxes are designed with the aim that the sound is reflected early in at least half of the central seating area. The seats in the upper sections receive initial reflections from the bottoms and edges of the ceiling. Below are the reflections produced by the parapets of the boxes on one side and by the relevant sections of a part of the ceiling of the room:

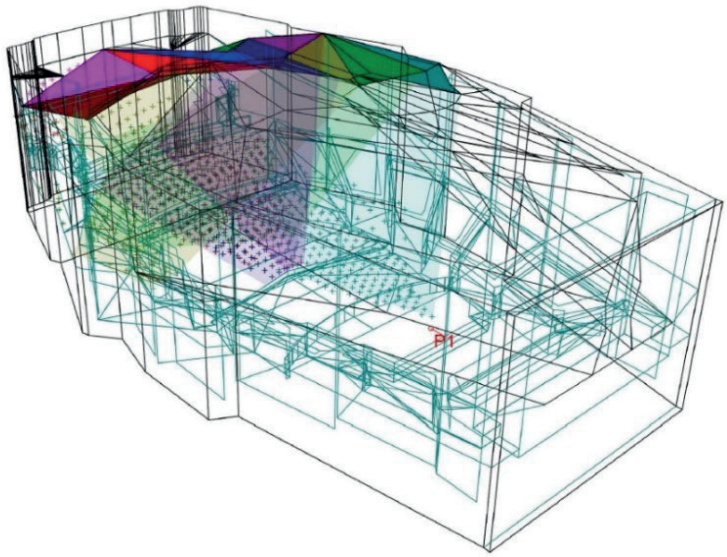


Figura 2. Reflexiones en la sala en axonometría. Fuente: Propia / Figure 2. Sound reflections in the room in axonometry.Source: own

Procedure for obtaining acoustic parameters

In order to analyse the acoustics of the room, acoustic simulation was used. For this purpose, a 3D model of the space was created and loaded into the specialized room acoustics software called Odeon. This software, based on the 3D model and considering the specific materiality of the room, by means of ray-tracing simulation, allows the acoustics inside the room to be simulated and evaluated, as well as determining the acoustic parameters corresponding to the room in question. For this purpose, absorption coefficients are assigned to the different surfaces using the materials previously determined for each construction solution. Given the indeterminacy of the absorptive behaviour of the ceiling surfaces, this is left as a variable to calibrate the model. Therefore, this factor is adjusted according to the RTmid (average reverberation time) obtained through bibliographic research. The absorption coefficients used for each surface are shown in table 2.

After assigning the materials, it was found that the average reverberation time obtained in the model was similar to that of the original room. See tables 3 and 4.

	125 Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Paredes laterales y antepechos / Side walls and parapets	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11
Paredes exteriores / External walls	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05
Suelo / Floor	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Escenario / Stage	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Butacas / Seats	0,52	0,68	0,80	0,75	0,70	0,55
Techo / Roof	0,17	0,02	0,003	0,002	0,003	0,0005

Tabla 2. Coeficientes de absorción adoptados para las superficies. Fuente: propia / Table 2. Absorption coefficients adopted for surfaces. Source: own

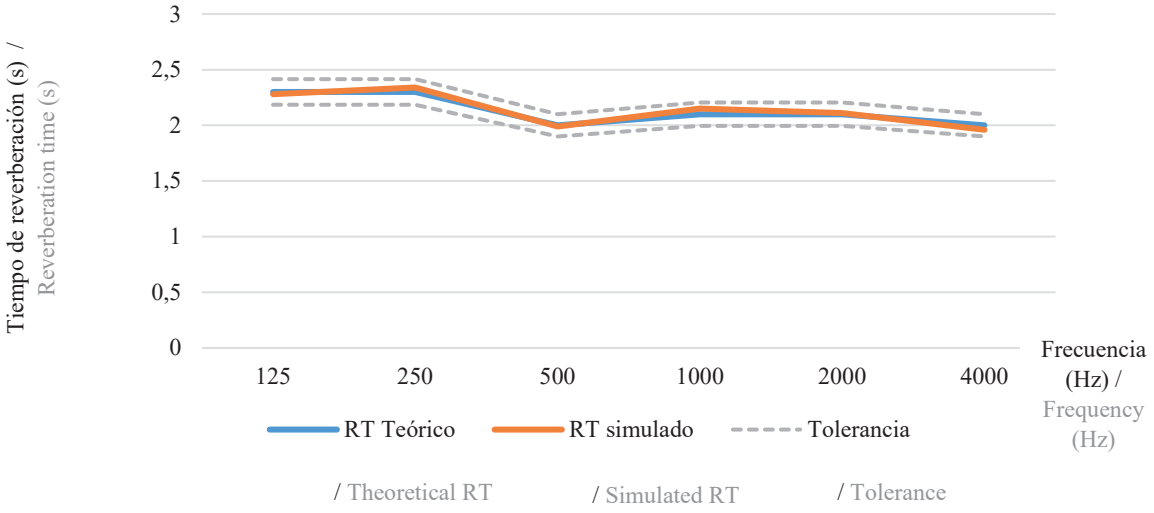


Tabla 3. Ajuste de los tiempos de reverberación. Fuente: propia / Table 3. Adjustment of reverberation times. Source: own

	125 Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
RT teórico/ Theoretical RT	2,3	2,3	2	2,1	2,1	2
RT simulado / Simulated RT	2,28	2,34	1,99	2,15	2,11	1,96

Tabla 4. Tiempos de reverberación (s) deseados y obtenidos a sala llena / Table 4. Reverberation time (s) desired and achieved at full hall

Dado que el valor del tiempo de reverberación (RT) promedio obtenido es considerablemente similar al valor original de la sala que se encuentra descrito en el libro de V.L. Jordan (1980), y se encuentra dentro del rango de tolerancia aceptado del 10%, se considerara los resultados como válidos. A partir de este punto, se procede a obtener los distintos parámetros acústicos necesarios para el análisis, así como a generar los diagramas que representan su distribución a lo largo de la sala.

Parámetros acústicos de la sala

La reverberación es el fenómeno en el cual el sonido perdura en un espacio después de que la fuente de sonido ha dejado de emitir. Su importancia radica en el hecho de que los mensajes acústicos se componen de sonidos individuales separados en el tiempo, que, al ser audibles en un recinto cerrado, cierto tiempo después de haber sido emitidos, se entremezclan con otros emitidos posteriormente. El tiempo de reverberación puede definirse como el intervalo de tiempo necesario para reducir el nivel de presión acústica en un recinto cerrado, en 60 dB, respecto al nivel estacionario.

Por otro lado, el parámetro acústico conocido como Early Decay Time (EDT) representa el tiempo necesario para que el nivel de sonido disminuya en 10 dB respecto al nivel estacionario, después de que se detiene la fuente sonora. En la siguiente tabla se muestra el EDT promedio de los receptores en las distintas frecuencias obtenido en Odeon para la sala llena (Tabla. 5).

	125 Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
EDT (s)	2,36	2,52	2,18	2,37	2,26	1,92

Tabla 5. EDT (s) a sala llena / Table 5. EDT (s) at full hall

El parámetro de claridad C_{80} en acústica se refiere se refieren al grado en que un oyente puede distinguir los sonidos. Se calcula como la relación entre el sonido directo y las primeras reflexiones que llagan en los 80 primeros ms y el resto de energía reverberada. Seguidamente se muestra una tabla con los valores promedios obtenidos del parámetro claridad C_{80} con Odeon (Tabla 6).

Given that the value of the average reverberation time (RT) obtained is considerably similar to the original value of the room described in the book by V.L. Jordan (1980), and is within the accepted tolerance range of 10%, the results are considered valid. From this point, we proceed to obtain the different acoustic parameters, as well as to generate the diagrams of their distribution in the hall.

Room acoustic parameters

Reverberation is the phenomenon in which sound lingers in a space after the sound source has stopped emitting. The reverberation time can be defined as the time interval required to reduce the sound pressure level in a closed room by 60 dB with respect to the stationary level. On the other hand, the acoustic parameter Early Decay Time (EDT) represents the time required for the sound level to decrease by 10 dB from the stationary level after the sound source is stopped. Table 5 shows the average EDT at the different frequencies obtained in Odeon for the full room. The clarity parameter C_{80} in acoustics refers to the degree to which a listener can distinguish sounds. It is calculated as the ratio between the direct sound and the first reflections arriving in the first 80 milliseconds and the remaining reverberated energy. In table 6 are shown the average values obtained for the C_{80} clarity parameter with Odeon. Lateral factor refers to the measure of sound energy reaching listeners from the lateral directions compared to the sound energy coming from all other directions during the first 80 milliseconds. A higher side factor can create a sense of spaciousness and spatiality. See formula 1 for the calculation of the lateral factor and the values obtained are given in table 7. The distribution of the different parameters in the room is shown in figures 3, 4, 5 and 6.

Results

In the Sydney Opera House concert hall, the average reverberation time (RT) is between 2 and 2.30 seconds, slightly above the recommended range of 1.80 to 2.20 seconds, which may negatively affect the clarity and separation of individual sounds. The room simulation analysis reveals low values for the clarity parameter C80, with figures between -1.60 and -2.40 dB at most frequencies, except at 4000 Hz, below the recommended range of -1 to 3 dB. These negative values suggest a loss of clarity due to high reverberation, characteristic of a 'living room', where sounds tend to mix and overlap. This affects the acoustic quality, reducing the separation and intelligibility of individual sounds in the space.

	125 Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
C_{80} (dB)	-1,60	-2,40	-2,00	-2,40	-2,00	-0,90

Tabla 6. Claridad C80 (dB) a sala llena / Table 6. Clarity C80 (dB) at full hall

On the other hand, the lateral factor (LF80), key to room acoustic quality, should exceed 0.25 in listening rooms. Although the values meet this standard at mid frequencies, at low and high frequencies the LF80 has slightly lower values, between 0.227 and 0.248, which could affect the perception of spatiality in these areas of the spectrum.

Conclusions

The following conclusions can be drawn from this analysis, which shows us the dimension of the calculated values, as well as the improvements that could be made because not all parameters are working correctly: -The reverberation time in the room is higher than the recommended value, which directly affects the acoustic clarity. This situation can have a negative impact on the sound quality of the room, as it decreases the intelligibility of sounds. The lateral energy values are slightly lower than the recommended values, suggesting a predominance of direct sound energy from the stage over the lateral, affecting the spatial perception of the sound.-The lateral energy values in the hall are slightly lower than the recommendations, indicating a prevalence of direct sound energy from the stage over lateral sound energy. This also contributes unfavourably to the perception of sound in the room.-In view of the results obtained, it can be stated that the concert hall of the Sydney Opera House has an acceptable acoustic quality, although not outstanding in comparison to other large contemporary concert halls.-This study has contributed to providing a better understanding of the acoustic conditions of the Sydney Opera House concert hall by obtaining acoustic parameters not previously available in literature sources and by providing a better understanding of the acoustics of the Sydney Opera House concert hall.

El factor lateral se refiere a la medida de la energía sonora que alcanza a los oyentes desde las direcciones laterales en comparación con la energía sonora proveniente del resto de direcciones durante los 80 primeros ms. Un factor lateral más alto puede generar una sensación de amplitud y espacialidad en la experiencia auditiva. La fórmula utilizada para el cálculo del factor lateral es:

$$LF_{80} = \frac{\sum_{t=5}^{80} E_t \cos^2(\beta_1)}{E_{0-80}}$$

E = Energía / Energy
t = Tiempo / Time
β = Constante / Constant

Fórmula 1. Factor Lateral LF80 / Formula 1. Lateral Factor LF80

Y os valores obtenidos para el factor lateral LF_{80} promedio son los mostrados en la tabla 7:

	125 Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
LF_{80}	0,227	0,239	0,258	0,258	0,248	0,233

Tabla 7. Factor lateral LF80 a sala llena /Table 7. Lateral Factor LF80 at full hall

Así es la distribución de los diferentes parámetros en la sala (Figura 3-4-5-6):

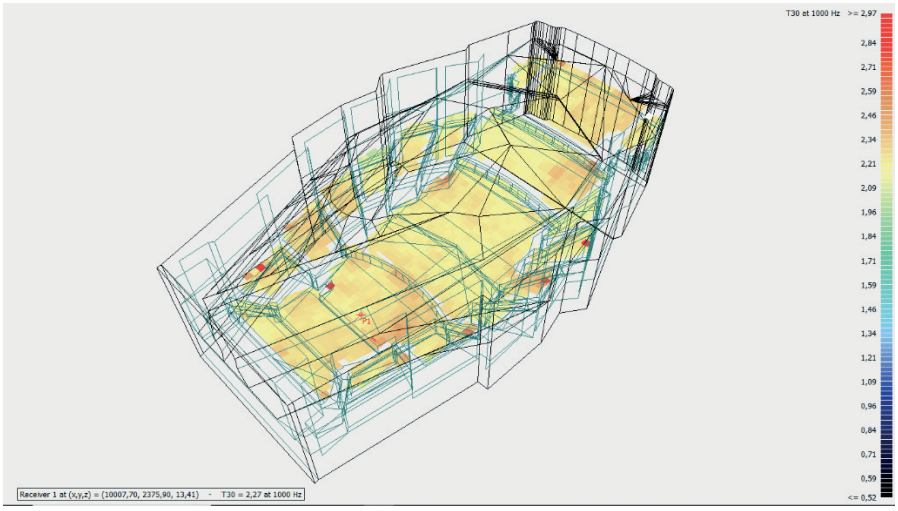


Figura 3. Distribución del RT/ Figure 3. Distribution of RT

Resultados

En la sala de conciertos de la Ópera de Sídney, el tiempo de reverberación (RT) promedio se encuentra entre 2 y 2,30 segundos, ligeramente superior al rango recomendado de 1,80 a 2,20 segundos, lo cual puede afectar negativamente la claridad y separación de los sonidos individuales.

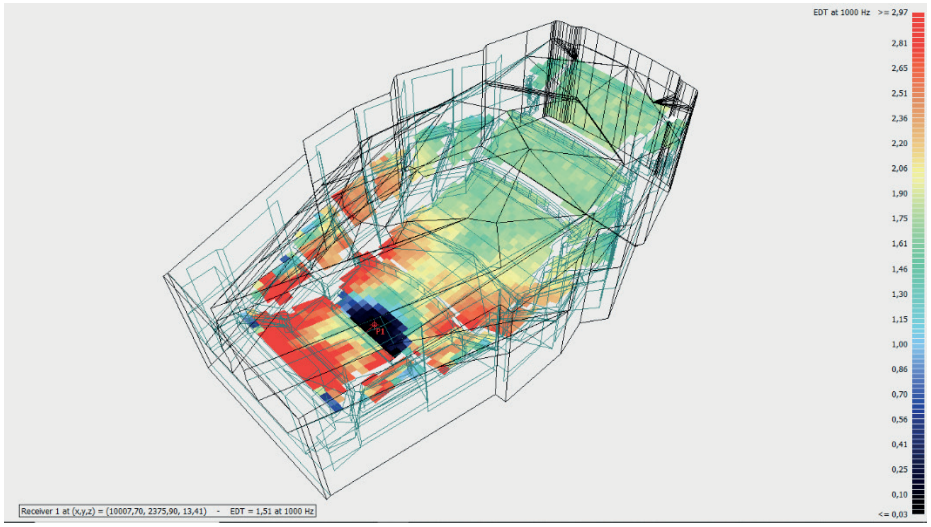


Figura 4. Distribución del RTmid/ Figure 4. Distribution of RTmid

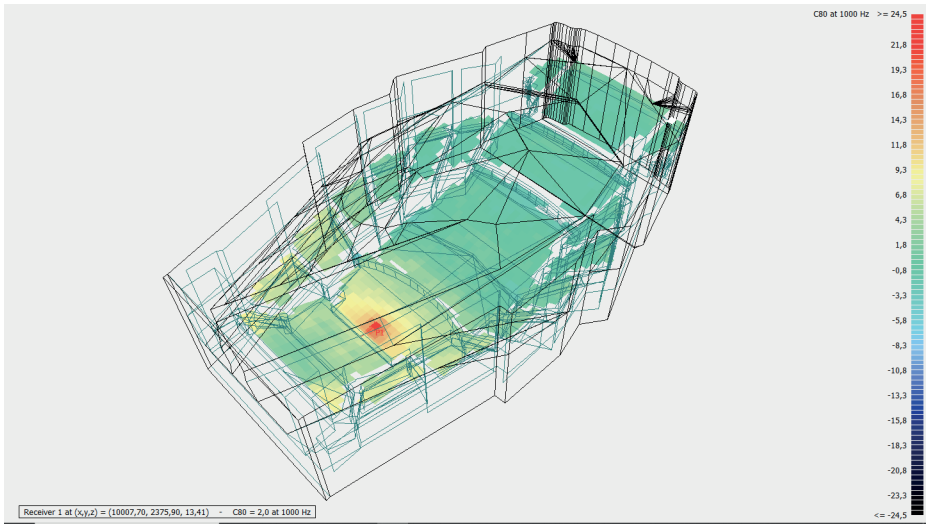


Figura 5. Distribución de C80/ Figure 5. Distribution of C80

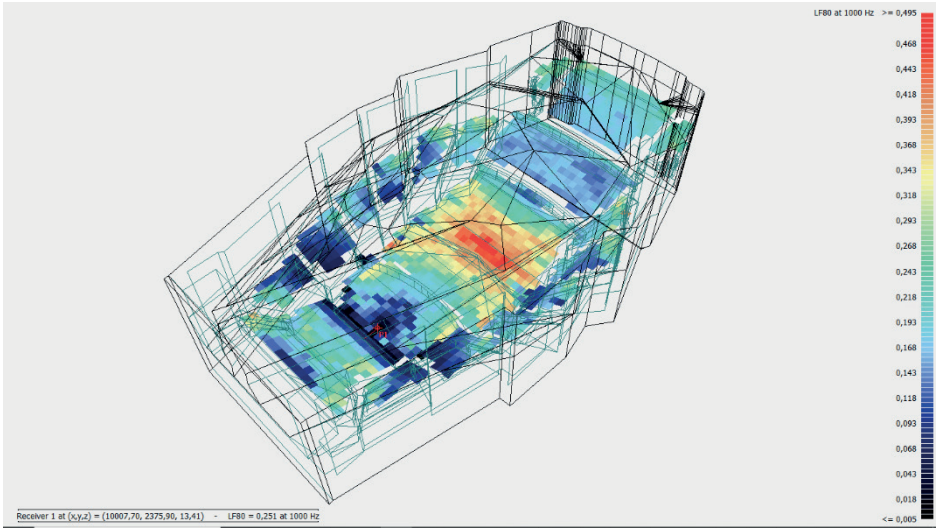


Figura 6. Distribución del LF80/ Figure 6. Distribution of LF80

El análisis de simulación de la sala revela valores bajos en el parámetro de claridad C80, con cifras entre -1,60 y -2,40 dB en la mayoría de las frecuencias, excepto en 4000 Hz, por debajo del rango recomendado de -1 a 3 dB. Estos valores negativos sugieren una pérdida de claridad debido a una alta reverberación, característica de una "sala viva", donde los sonidos tienden a mezclarse y superponerse. Esto afecta la calidad acústica, reduciendo la separación y la inteligibilidad de los sonidos individuales en el espacio. Por otro lado, el factor lateral (LF80), clave para la calidad acústica de la sala, debería superar 0,25 en salas de audición. Aunque los valores cumplen con este estándar en frecuencias medias, en las frecuencias bajas y altas el LF80 presenta valores ligeramente inferiores, entre 0,227 y 0,248, lo cual podría afectar la percepción de espacialidad en estas áreas del espectro.

Conclusiones

De este análisis se pueden extraer las siguientes conclusiones que nos hace ver la dimensión de los valores calculados, así como de las mejoras que podrían llevarse a cao porque o todos los parámetros funcionan correctamente:

-El tiempo de reverberación en la sala es superior al valor recomendado, lo que afecta directamente a la claridad acústica. Esta situación puede tener un impacto negativo en la calidad sonora de la sala, ya que disminuye la inteligibilidad de los sonidos. Los valores de energía lateral son ligeramente menores a los recomendados, lo que sugiere una predominancia de la energía sonora directa desde el escenario sobre la lateral, afectando la percepción espacial del sonido.

-Los valores de energía lateral en la sala son ligeramente inferiores a las recomendaciones, lo que indica que prevalece la energía sonora directa proveniente del escenario en lugar de la energía sonora lateral. Esto también contribuye de manera desfavorable a la percepción del sonido en el espacio.

-En vista de los resultados obtenidos, se puede afirmar que la sala de conciertos de la Ópera de Sídney presenta una calidad acústica aceptable, aunque no sobresaliente en comparación con otras grandes salas de audición contemporáneas.

-Este estudio ha contribuido a proporcionar un mayor conocimiento de las condiciones acústicas de la sala de conciertos de la Ópera de Sídney, mediante la obtención de parámetros acústicos no previamente disponibles en fuentes bibliográficas y gracias a la simulación de la sala mediante programas informáticos especializados, para una comprensión más profunda del comportamiento acústico del recinto.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- ARAU, HIGINI (1999). ABC de la acústica arquitectónica. España: CEAC.
- ARNAU AMO, JOAQUÍN (2005). Espacios para la música. España: NAUSICAA.
- BARRON, MICHAEL (1993). Auditorium acoustics and architectural design. UK: Spoon press.
- BARRON, MICHAEL. (2009). Then and now-how concert hall design of the 1960s and '70s compares with the present. University of Bath and Fleming & Barron, Bath, England.
- BERANEK, LEO (1996). Concert Halls and Opera Houses. USA: Acoustical Society of America.
- CHRISTENSEN, CLAUS LYNGE (2009). Odeon Room Acoustics Program. Dinamarca: Brüel and Kjaer.
- HALL, PETER (Noviembre 1973). The Design of the Concert Hall of the Sydney Opera House. Journal and Proceedings of the Royal Society of New South Wales, 54 - 69.
- JORDAN, VILHELM LASSEN (1980). Acoustical Design of Concert Halls. UK: Routledge.
- TAYLOR, LISA y CLARINGBOLD, DAVID (2010). Acoustics of the Sydney Opera House concert hall, Part One: The Client's Perspective. Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010.
- ZUKOWSKY, JOHN (2018). Architecture inside + out: 50 iconic buildings in detail. UK: Thames & Hudson.
- ZUNZ, JACK (Octubre 1973). The Arup Journal. Sydney Opera House, 4 - 21.

PERCEPCIÓN DEL ESPACIO PÚBLICO A TRAVÉS DE LA PUBLICIDAD EXTERIOR. EL CASO DE MADRID

PERCEPTION OF PUBLIC SPACE THROUGH OUTDOOR ADVERTISING. THE CASE OF MADRID

Quiteria Angulo-Ibáñez
Investigadora del CITE. Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Profesora. Doctora en Arquitectura por la UPV. E-mail:quianib@csa.upv.es
CITE Researcher. Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València, Assistant Professor. Architect. PhD in Architecture by the UPV

Miriam Hernández-García
Arquitecto / Building Engineer

Abstract

This paper focuses on analyzing and understanding the urban environment of Madrid by examining the impact of outdoor advertising and its influence on citizens' experiences. This research is essential, as outdoor advertising is a fundamental component of the city's urban landscape and visual identity. Its presence not only alters Madrid's aesthetics but also affects the quality of life of its residents. Understanding this influence is critical for the development of urban regulations and the design of advertising elements. The research is approached from an interdisciplinary perspective, combining insights from marketing and architecture. Methods for data collection include mapping neighborhoods with high advertising density, notably Trafalgar, Cortes, Sol, Palacio, Justicia, and Universidad. This fieldwork aims to analyze the distribution of advertising elements in key areas of Madrid and evaluate how this structure affects citizens' perceptions, all within the framework of municipal regulations. In these areas, municipal ordinances play a crucial role in determining the distribution and type of permitted advertising, impacting its integration with citizens and the urban environment. Findings highlight the importance of balancing commercial visibility with the preservation of historical heritage and urban aesthetics. This study provides a valuable foundation for future research on the relationship between outdoor advertising and urban experience.

Keywords
Outdoor Advertising, Urban Experience, Architecture, Madrid, Marketing

Introducción

La publicidad exterior es un componente esencial en la configuración de las ciudades contemporáneas, y su influencia en la experiencia urbana se ha convertido en un tema de creciente relevancia para la arquitectura y el urbanismo. En el contexto de Madrid, esta investigación sobre publicidad exterior permite comprender no solo cómo los elementos publicitarios afectan el ambiente urbano, sino también cómo se integran en él. Desde los carteles hasta las pantallas digitales, estos elementos modelan el espacio público y afectan la forma en que los ciudadanos perciben y se relacionan con su entorno. La publicidad exterior abarca desde formatos permanentes, como MUPI (módulos urbanos de publicidad),marquesinas, pantallas LED y lonas (Imagen 1), hasta intervenciones temporales y creativas, conocidas como campañas de marketing de guerrilla (Imagen 2).

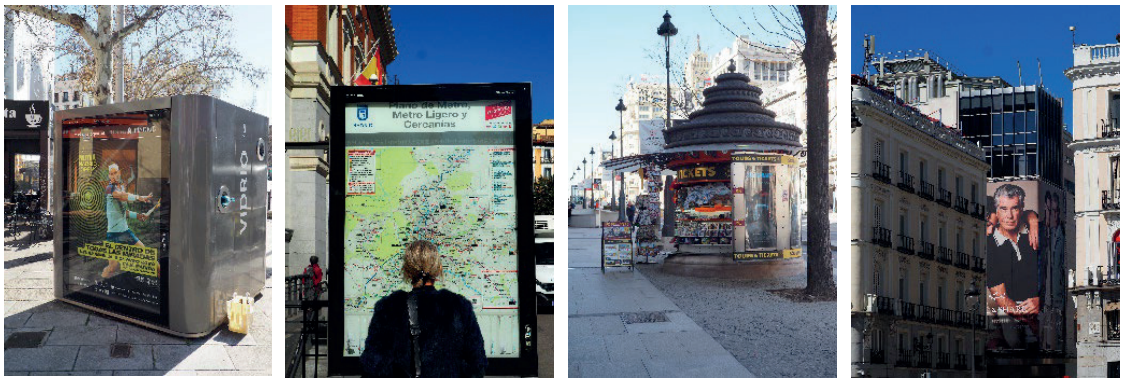


Imagen 1. Publicidad exterior: Pantalla / MUPI / Kiosco /Loma / Image 1. Outdoor advertising: Screen / MUPI / Kiosk / Banners

Las ciudades modernas están en constante transformación, y la publicidad desempeña un papel crucial en esta metamorfosis. Este trabajo propone, entonces, no solo un análisis, sino también un cuestionamiento profundo: ¿qué impacto tiene la publicidad en la identidad urbana, en el paisaje, en la economía y en el bienestar de los ciudadanos? En ciudades grandes y complejas como Madrid, estos elementos publicitarios tienen una función que va más allá de la simple promoción, ya que crean una experiencia urbana única y moldean la percepción del espacio. Ejemplos de esto se encuentran no solo en Madrid, sino también en lugares emblemáticos como Times Square en Nueva York (Imagen 3), Piccadilly Circus en Londres y Shibuya en Tokio (Imagen 4), donde la publicidad exterior se integra en el entorno, sumándose a la experiencia urbana. La metodología de este estudio se basa en un enfoque de trabajo de campo que incluye mapeos detallados de áreas con alta densidad publicitaria en Madrid. Estas zonas se delimitan a partir de los datos de alta densidad publicitaria obtenidos del Censo de Soportes de Publicidad Exterior de España, elaborado por OJD en colaboración con la Fede-Aepe. Este censo cuantifica los soportes gestionados por las principales empresas privadas, tales como Alpha Publicidad Exterior, Clear Channel, Clece OOH, Comunitac, Espacio Publicidad Exterior, Exterior Play, Exterior Plus, Global España, Gran Pantalla, IEPE, JCDecaux y VIAE. En base a esta información, se analizan los barrios de Trafalgar, Cortes, Sol, Palacio, Justicia y Universidad, evaluando la clasificación de soportes, su distribución y el coste asociado a la publicidad en cada uno de ellos. Este método no solo permite una organización sistemática de los elementos publicitarios, sino que también hace visible cómo la publicidad estructura el espacio público en términos económicos. Por otro lado, para entender esta relación entre la publicidad exterior y el espacio público hay que aborda el tema desde una perspectiva histórica, legislativa y neurocientífica, con el propósito de comprender cómo la configuración de la publicidad en el espacio público afecta la percepción de la ciudad por parte de sus habitantes.

Análisis urbano

La publicidad de Madrid, desde los primeros anuncios hasta las pantallas LED interactivas, ha ido avanzando y redefiniendo las formas en que la publicidad se manifiesta y por tanto, su alcance sobre los ciudadanos. Este desarrollo histórico muestra que la publicidad no solo es un vehículo para el comercio, sino también un agente de transformación visual y simbólica en el espacio urbano, que afecta de manera directa a los ciudadanos (Imagen 5).

Introduction

Outdoor advertising is an essential component in the shaping of contemporary cities, and its influence on urban experience has become a topic of growing significance for architecture and urban planning. In the context of Madrid, this research into outdoor advertising allows us to understand not only how advertising elements affect the urban environment but also how they integrate into it. From posters to digital screens, these elements shape public space and influence how citizens perceive and interact with their surroundings. Outdoor advertising encompasses a range of formats, from permanent installations like MUPI (urban advertising modules), bus shelters, LED screens and building wraps (Imagen 1), to temporary and creative interventions known as guerrilla marketing campaigns (Image 2).



Imagen 2. Campaña de marqueting de guerrilla en Madrid / Image 2. Guerrilla marketing campaign in Madrid



Imagen 3. Publicidad exterior de New York

Image 3. OOH in New York



Imagen **4**. Publicidad exterior de Tokio

Image **4**. OOH advertising in Tokyo

Modern cities are in a constant state of transformation, and advertising plays a pivotal role in this metamorphosis. Thus, this work proposes not only an analysis but also a profound inquiry: what impact does advertising have on urban identity, landscape, economy, and the well-being of citizens?. In large and complex cities like Madrid, these advertising elements serve a function beyond simple promotion, as they create a unique urban experience and shape perceptions of space. Examples of this phenomenon are found not only in Madrid but also in iconic locations such as Times Square in New York (Image 3), Piccadilly Circus in London, and Shibuya in Tokyo (Image 4), where outdoor advertising integrates into the environment, adding to the urban experience. The methodology of this study is based on a fieldwork approach that includes detailed mapping of areas with a high density of advertising in Madrid. These zones are delineated based on data from the Spanish Outdoor Advertising Support Census, prepared by OJD in collaboration with Fede-Aepe. This census quantifies advertising structures managed by leading private companies, including Alpha Publicidad Exterior, Clear Channel, Clece OOH, Comunitac, Espacio Publicidad Exterior, Exterior Play, Exterior Plus, Global España, Gran Pantalla, IEPE, JCDecaux, and VIAE. Based on this information, the neighborhoods of Trafalgar, Cortes, Sol, Palacio, Justicia, and Universidad are analyzed, evaluating the classification, distribution, and associated costs of advertising in each area. This method enables not only a systematic organization of advertising elements but also reveals how advertising structures public space in economic terms. Furthermore, to understand the relationship between outdoor advertising and public space, the study examines the issue from historical, legislative, and neuroscientific perspectives, aiming to comprehend how the configuration of advertising in public space influences citizens' perception of the city.

Urban analysis

Madrid's advertising landscape, from early advertisements to interactive LED screens, has continuously evolved, redefining the ways in which advertising manifests and, consequently, its impact on citizens. This historical progression reveals that advertising is not only a vehicle for commerce but also a transformative visual and symbolic agent in urban space, directly affecting citizens (Image 5). Notable examples such as the Schweppes sign on Gran Vía and the Tío Pepe sign in Puerta del Sol have become cultural icons that transcend their commercial purpose, serving as visual and cultural landmarks of Madrid. These symbols, beyond being mere commercial attractions, have become reference points that help citizens orient themselves and foster a sense of place.

Ejemplos notables como el cartel de Schweppes en la Gran Vía y el cartel de Tío Pepe en la Puerta del Sol representan íconos culturales que trascienden su función comercial para convertirse en referentes visuales y culturales de Madrid. Estos símbolos, más allá de ser meros reclamos comerciales, se han convertido en puntos de referencia que ayudan a los ciudadanos a orientarse y a crear un vínculo con el lugar.

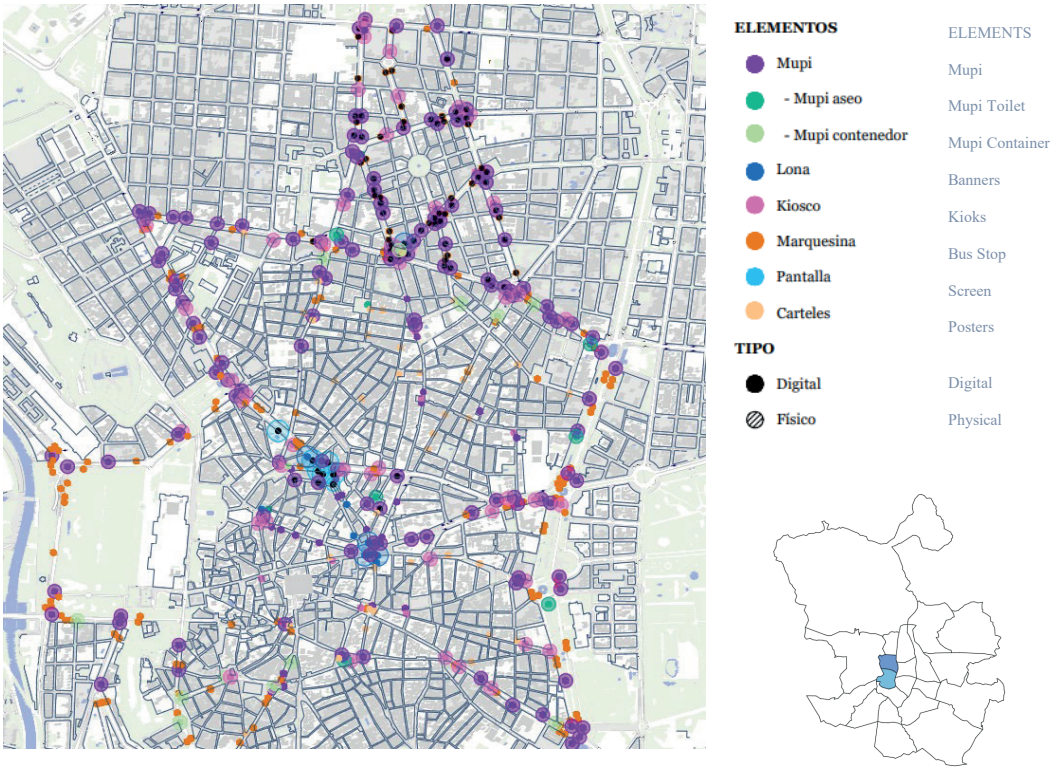


Imagen 5. Zonas de mayor densidad publicitaria en Madrid / Image 5. Areas of highest advertising density in Madrid

Este fenómeno también se ha observado en otros contextos; por ejemplo, en Las Vegas Robert Venturi y Denise Scott Brown en su libro Learning from Las Vegas analizan su contexto y estructura. Los luminosos de los casinos se han convertido en parte esencial del carácter visual de la ciudad, a tal punto que definir la experiencia de esta ciudad sin ellos resultaría casi impensable. De esta manera, la publicidad exterior desempeña un papel dual: por un lado, actúa como un elemento de comunicación de productos y servicios; por otro, puede ser un recurso cultural y un símbolo urbano. Con el avance de la tecnología, la publicidad exterior ha evolucionado y ahora emplea técnicas más sofisticadas. Los recursos digitales ofrecen una experiencia más interactiva. La era digital ha traído consigo una variedad de estrategias emergentes que son especialmente interesantes por sus formas innovadoras de captar la atención del público y modificar el espacio urbano. Estas estrategias incluyen el marqueting de guerrilla y la publicidad geolocalizada. Estos métodos representan un cambio de paradigma en la publicidad, pasando de ser elementos estáticos a dinámicos, interactivos y en muchos casos, experienciales pasando de la barrera física a la digital.

En el caso del marqueting de guerrilla (Imagen 2), esta tendencia aboga por intervenciones de bajo coste y alta creatividad en el espacio público. Este tipo de campañas es especialmente eficaz en zonas urbanas de gran tránsito y puede variar desde la colocación de estructuras temporales o el uso de plantillas y grafitis hasta performances y flash mobs. A diferencia de la publicidad tradicional, el marqueting de guerrilla busca generar una reacción instantánea y memorable en el espectador. Por ejemplo, en el Río Manzanares de Madrid se llevó a cabo una campaña contra el cambio climático que usó uso una gran ballena dentro del rio para crear una representación simbólica del impacto de la crisis ambiental, lo cual captó la atención del público y creó un espacio de reflexión. Estos formatos no solo logran comunicar mensajes de forma innovadora, sino que también provocan que el ciudadano reinterprete el entorno urbano, dándole un nuevo sentido momentáneo.

This phenomenon is also seen in other contexts; for instance, in Las Vegas, Robert Venturi and Denise Scott Brown analyzed its unique structure in their book Learning from Las Vegas. The neon signs of casinos have become an essential part of the city's visual character, to the point were defining the experience of Las Vegas without them would seem nearly unimaginable. In this way, outdoor advertising plays a dual role: on one hand, it acts as a communication channel for products and services; on the other, it serves as a cultural resource and urban symbol. With technological advancements, outdoor advertising has evolved to employ more sophisticated techniques. Digital resources offer a more interactive experience. The digital age has introduced a variety of emerging strategies that captivate public attention in innovative ways and modify urban spaces. These strategies include guerrilla marketing and geolocated advertising, representing a paradigm shift from static to dynamic, interactive, and often experiential formats that transcend physical to digital boundaries.

In the case of guerrilla marketing (Image 2), this trend advocates for low-cost, highly creative interventions in public spaces. Such campaigns are particularly effective in high-traffic urban areas and can range from temporary installations or stencils and graffiti to performances and flash mobs. Unlike traditional advertising, guerrilla marketing seeks to generate an immediate and memorable reaction from viewers. For example, in Madrid's Manzanares River, an anti-climate-change campaign featured a large whale installation in the river, creating a symbolic representation of environmental impact, capturing public attention, and fostering reflection. These formats not only communicate messages innovatively but also prompt citizens to reinterpret the urban environment, imparting a temporary new meaning to it.

Another significant technique discussed is geolocated advertising. This approach uses retargeting (Image 6), a technique that allows brands to redirect their campaigns toward consumers who have already shown interest. By utilizing online behavior data and geographic locations, retargeting enables physical advertising to interact with individual citizens' preferences. Thus, someone who has visited an online store may see a physical ad for that same brand along their commute or in a public square, reinforcing the message and integrating it with the user's experience. This approach combines the benefits of digital and outdoor advertising, allowing brands to target specific audiences with precise messages at key moments. This personalization of urban advertising is not only effective but also raises important questions about privacy, as the use of personal data to influence public spaces remains a controversial and evolving issue.

This approach results in campaigns that can capture public attention at the exact moment people pass through specific locations, transforming the urban environment into a network of strategic points of sale. In Madrid, some urban advertising modules (MUPIs) and bus shelters have already implemented QR codes that, when scanned, display promotions or additional information adapted to the location or time of day. This technique enhances interaction between citizens and advertising, turning viewers from passive observers into active participants in a personalized experience shaped by the space they traverse.

Throughout this process of integration, implementation is not always harmonious. The proliferation of digital advertising presents complex legislative challenges. While digital screens and large-scale formats add dynamism and modernity, they can also visually saturate the environment, potentially leading to visual pollution that degrades aesthetic quality and the public space experience. This raises the question of how advanced advertising technologies, though fascinating, should be managed with a high degree of responsibility, considering the psychological implications of constant exposure to intense visual stimuli.

Madrid's current regulations, which are continuously updated to keep pace with urban transformation, play an important role by attempting to balance the need for commercial visibility with the protection of visual and architectural heritage. The Regulation of Outdoor Advertising, updated in 2018, governs the dimensions and placement of ads, establishing guidelines on aesthetics and content to help preserve the character of the city amid commercial pressures. Urban regulations confront outdoor advertising as both an expression of the urban economy and a potential threat to the integrity of urban spaces (Table 1).

Otra técnica relevante mencionada es la publicidad geolocalizada. Esta publicidad utiliza el retargueting (Imagen 6), una técnica permite a las marcas redirigir sus campañas hacia consumidores que ya han mostrado interés en ellas. Utilizando datos de comportamiento en línea y ubicaciones geográficas. El retargeting permite que la publicidad física interactúe con las preferencias individuales de los ciudadanos. Así, alguien que ha visitado una tienda en línea podría ver un anuncio físico de esa misma marca en el trayecto hacia su hogar o en una plaza pública, lo que refuerza el mensaje y lo integra con la experiencia del usuario. Este enfoque combina los beneficios de la publicidad digital y exterior, permitiendo a las marcas dirigirse a audiencias específicas con mensajes precisos en momentos clave. Esta personalización de la publicidad en el espacio urbano no solo es eficaz, sino que también plantea preguntas importantes sobre privacidad, pues el uso de datos personales para influir en los espacios públicos todavía es un tema controvertido y en evolución.

Todo esto se traduce en campañas que pueden captar la atención del público en el momento exacto en que pasan por determinados lugares, convirtiendo el entorno urbano en una red de puntos de venta estratégicos. En Madrid, algunos mupis y marquesinas ya han implementado códigos QR que, al escanearlos, muestran promociones o información adicional adaptada a la ubicación o la hora del día. Esta técnica aumenta la interacción entre el ciudadano y la publicidad, haciendo que el espectador pase de ser un observador pasivo a un participante activo en una experiencia personalizada y condicionada por el espacio que transites.

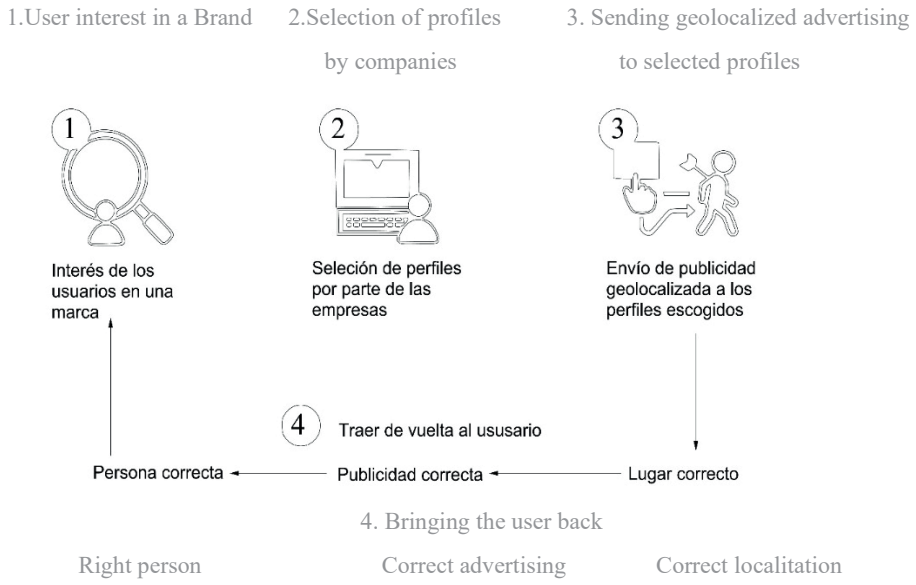


Imagen 6. Retargueting / Image 6. Retargueting

Dentro de todo este proceso de integración, la manera de realizarlo no siempre es armoniosa. La proliferación de la publicidad digital plantea desafíos complejos en términos legislativos. Las pantallas digitales y los formatos de gran escala, si bien añaden dinamismo y modernidad, también pueden saturar visualmente el entorno y generar una contaminación visual que degradar la calidad estética y la experiencia dentro de los espacios públicos. Esto trae como reflexión la manera en la que se introducen estas tecnologías avanzadas en publicidad exterior, aunque fascinante, debe ser gestionada con un alto grado de responsabilidad y con atención a las implicaciones psicológicas de la exposición constante a estímulos visuales intensos. La normativa vigente en Madrid, que se encuentra en constante actualización para adaptarse a la transformación urbana, juega un papel importante, intenta crear un balance entre la necesidad de visibilidad comercial y la protección del patrimonio visual y arquitectónico. La Ordenanza Reguladora de la Publicidad Exterior, actualizada en 2018, regula las dimensiones y ubicaciones de los anuncios, establece pautas sobre la estética y de contenido, buscando así preservar el carácter de la ciudad frente a la presión comercial. La normativa urbana se enfrenta, por un lado, a la forma de publicidad exterior como expresión de la economía urbana y por otro lado, a la amenaza de amenazar de desvirtuar los espacios urbanos (Tabla 1).

Tabla resumen de la normativa en Madrid / Summary table of regulations in Madrid

Aspecto normativo / Regulatory aspect	**Descripción** / Description
Zonas protegidas / Protected areas	La publicidad está prohibida en bienes de interés cultural, parques históricos y ciertas zonas patrimoniales. En casos excepcionales, se permite con autorizaciones que respeten la estética del área / Advertising is prohibited in assets of cultural interest, historical parks and certain heritage areas. In exceptional cases, it is allowed with authorizations that respect the aesthetics of the area.
Letreros en azoteas / Rooftop signs	Los rótulos en azoteas están permitidos en la última planta del edificio, con una altura máxima del 10% de la altura del edificio y hasta un máximo de 5,5 metros. Deben estar centrados y no ocultar detalles arquitectónicos / Rooftop signs are permitted on the top floor of the building, with a maximum height of 10% of the building height and up to a maximum of 5.5 meters. They should be centered and not hide architectural details.
Pantallas digitales / Digital screens	Limitadas a 30 m² en tamaño; no se permiten en edificios históricos o áreas patrimoniales. Rotación mínima de contenido cada 7 segundos para evitar distracciones y saturación visual / Limited to 30 m² in size; They are not allowed in historic buildings or heritage areas. Minimum content rotation every 7 seconds to avoid distractions and visual saturation.
Publicidad en andamios / Scaffolding advertising	Las lonas deben cubrir el andamio y la fachada del edificio durante las renovaciones. En edificios de interés cultural, la lona debe replicar la apariencia original del edificio y destinar solo un 40% a publicidad / Tarps must cover the scaffolding and building façade during renovations. In buildings of cultural interest, the canvas must replicate the original appearance of the building and allocate only 40% to advertising.
Campañas temporales / Temporary campaigns	Autorizadas en ubicaciones específicas con duración máxima de 3 días. Pueden incluir instalaciones artísticas o actividades de marketing de guerrilla en zonas concurridas, siempre que cuenten con el permiso de ocupación temporal / Authorized in specific locations with a maximum duration of 3 days. They can include artistic installations or guerrilla marketing activities in crowded areas, as long as they have a temporary occupancy permit.
Uso de sonido / Use of sound	Autorizadas en ubicaciones específicas con duración máxima de 3 días. Pueden incluir instalaciones artísticas o actividades de marketing de guerrilla en zonas concurridas, siempre que cuenten con el permiso de ocupación temporal / Sound in advertising is restricted. May be authorized for special events with an acoustic impact report demonstrating acceptable noise levels.
Publicidad mobiliario / Furniture advertising	Se permite publicidad en quioscos y mobiliario urbano (mupis, marquesinas), con limitaciones de tamaño, contenido y proporción para no interferir con la circulación peatonal / Advertising is allowed on kiosks and street furniture (mupis, canopies), with limitations on size, content and proportion so as not to interfere with pedestrian circulation.

Tabla 1. Normativa / Table 1. Regulations

The integration of new forms of advertising into public space raises a fundamental dilemma: how can cities preserve their visual identity in an era of constant commercial expansion? Outdoor advertising, particularly in digital and dynamic formats, has proven to be highly effective in capturing public attention and altering the urban environment. However, it also carries risks of visual pollution and the potential loss of cultural identity. In a city like Madrid, which combines a rich historical heritage with vibrant modernity, this issue is especially relevant. The introduction of new technologies and formats calls for regulation that allows outdoor advertising to evolve without compromising the city's essence or its sense of place. Beyond the emerging digital advertising identified in this study, new perspectives are opening up for integrating advertising into public space. These formats not only target consumers directly but can also redefine public spaces as venues for ephemeral and memorable experiences. This trend reflects a growing interest in making advertising a participatory and dynamic medium that revitalizes public space. With this body of information, a critique arises of the increasing digitalization of advertising, which intensifies visibility and psychological impact on citizens. The introduction of LED screens and interactive panels reshapes citizens' relationships with urban space, transforming transit areas into visual consumption spaces. This phenomenon raises questions about the effects of advertising on psychological well-being and collective perceptions of space.

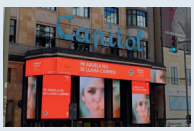
PANTALLA / SCREEN			1
CARACTERÍSTICAS / CHARACTERISTICS			IMAGEN / IMAGE
Descripción/ Description La Plaza de Callao en Madrid y la calle Gran Vía, cuenta con una serie de pantallas LED digitales que se utilizan para mostrar anuncios. Estas pantallas están ubicadas estratégicamente en lugares visibles para captar la atención de peatones y conductores que pasan por la zona. / LED screens used for displaying advertisements. These screens are strategically located in highly visible spots to capture the attention of pedestrians and drivers passing through the area.			 
Tamaño/ Size	600 x 500 cm	2144 x1664 px	
Frecuencia cambio /Change	1 min		
Productos/ Products	Cultural/ Cultural		
Movimiento /Movement	No/No	Si/Yes	
Formato	Papel/Paper	Digital/Digital	
Propietarios/ Owner	Callao City Lights		
LOCALIZACIÓN			
Nombre de la vía/ Street	Paza de Callao/ Gran Vía		
Vías de visibilidad / Visibility	Peatonal y tráfico rodado		
Tamaño de la vía/ Size	34 m		
Visibilidad/ Visibility	Baja	Media	Alta
Precio: soporte+alquiler por unidad/ Price	10 000-30 000€		

Tabla 2. Ficha de las características de las pantallas / Table 2. Screen characteristics

MUPI/MUPI			2
CARACTERÍSTICAS/ CHARACTERISTICS			IMAGEN/ IMAGE
Descripción/ Description Los MUPIS estructura vertical, con una o dos caras publicitarias. Equipados con iluminación interna para mejorar la visibilidad de los carteles. Suelen estar en vías urbanas de gran tráfico peatonal y estaciones de metro. / MUPIs (Urban Furniture for Public Information) vertical structure with one or two advertising faces. They are equipped with internal lighting to enhance the visibility of the posters at night. They are located in high-traffic urban areas and metro stations.			
Tamaño/ Size	1,2 x 1,75 m	4966 x 3401 px	
Frecuencia cambio /Change	Semanal/ Mensual ó 15 seg Weekly/Monthly		
Productos/ Products	Comercial /Comercial		
Movimiento /Movement	No/No	Si/Yes	
Formato	Impresión/Print	Digital/Digital	
Propietarios/ Owner	Ayto./ JCDecaux /Clear Channel		
LOCALIZACIÓN			
Nombre de la vía/ Street	Glorieta de Bilbao		
Vías de visibilidad / Visibility	Peatonal		
Tamaño de la vía/ Size	3,5 m		
Visibilidad/ Visibility	Baja	Media	Alta
Precio: soporte+alquiler por unidad/ Price	500-600 €		

Tabla 3. Ficha de las características de los MUPIS / Table 3. MUPI characteristics

La integración de las nuevas formas de publicidad en el espacio público plantea un dilema fundamental: ¿cómo preservar la identidad visual de las ciudades en una era de constante expansión comercial? La publicidad exterior, especialmente en formato digital y dinámico, ha demostrado tener un gran poder para captar la atención del público y modificar el ambiente urbano. Sin embargo, también conlleva riesgos de contaminación visual y de pérdida de identidad cultural. En una ciudad como Madrid, que combina un rico patrimonio histórico con una modernidad vibrante, esta cuestión es especialmente relevante. La introducción de nuevas tecnologías y formatos requiere una regulación que permita a la publicidad exterior evolucionar sin sacrificar la esencia de la ciudad ni su sentido de pertenencia. Además de la publicidad digital emergente identificada en este estudio, abren nuevas perspectivas para integrar la publicidad en el espacio público. Estas modalidades no solo se dirigen al consumidor de manera directa, sino que pueden redefinir espacios públicos como escenarios de experiencias efímeras y memorables. Esta tendencia refleja un interés creciente en hacer de la publicidad un medio participativo y dinámico que revitalice el espacio público. Con toda esta información recogida se plantea ahora, una crítica a la creciente tendencia de digitalización de la publicidad, que intensifica la visibilidad y el impacto psicológico en el ciudadano. La introducción de pantallas LED y paneles interactivos modifica la relación del ciudadano con el espacio urbano, transformando áreas de tránsito en espacios de consumo visual. Este fenómeno plantea interrogantes sobre los efectos de la publicidad en el bienestar psicológico y en la percepción colectiva del espacio. La exposición constante a estímulos visuales de alta intensidad, a través de técnicas como el retargeting y el marqueting geolocalizado, puede llegar a saturar el paisaje urbano y condicionar las zonas por las que se mueven los ciudadanos dentro de la ciudad.

La publicidad exterior no es solo una herramienta de marqueting, sino también una expresión del estado cultural y económico de una sociedad. A medida que las ciudades continúan creciendo y adaptándose a las nuevas tendencias digitales, la publicidad exterior deberá encontrar formas de coexistir con el entorno urbano, respetando su historia y contribuyendo de manera positiva a la experiencia de quienes habitan y visitan estos espacios.

MARQUESINA/BUS STOP			3
CARACTERÍSTICAS / CHARACTERISTICS			IMAGEN / IMAGE
Descripción/ Description			
Los paneles de las marquesinas de autobus pueden estar en la parte trasera de la marquesina, exterior lateral o interior lateral. Los anuncios pueden ser impresos en carteles estáticos o, en algunos casos, en paneles digitales que muestran videos cortos. / Advertising panels can be positioned on the back of the shelter, on the exterior side, or the interior side. The advertisements may consist of printed static posters or, in some cases, digital panels displaying short videos.			
Tamaño/ Size	1,2 x 1,8 m	1920 x 1080 px	
Frecuencia cambio /Change	Semanal/ Mensual ó 15 seg /Weekly/Monthly		
Productos/ Products	Cultural, belleza, comercio		
Movimiento /Movement	No/No	Si/Yes	
Formato	Impresión/Print	Digital/Digital	
Propietarios/ Owner	Ayto./ JCDecaux /Clear Channel		
LOCALIZACIÓN			
Nombre de la vía/ Street	Plaza de cibles		
Vías de visibilidad / Visibility	Peatonal y tráfico rodado		
Tamaño de la vía/ Size	50-100 m		
Visibilidad/ Visibility	Baja	Media	Alta
Precio: soporte+alquiler por unidad/ Price	500-600 €		

Tabla 4. Ficha de las características de las marquesinas / Table 4. Bus stop characteristics

QUIOSCO/KIOKS			4
CARACTERÍSTICAS / CHARACTERISTICS			IMAGEN / IMAGE
Descripción/ Description			
Los quioscos en Madrid son pequeñas estructuras ubicadas en áreas urbanas concurridas, como plazas, parques y calles principales. Además de vender productos estas estructuras publicitan productos en su exterior, el formato es papel y en algunos casos pueden repartir folletos en su interior. / Kiosks in Madrid are small structures located in busy urban areas such as squares, parks, and main streets. In addition to selling products, these structures advertise goods on their exteriors, typically using paper formats. In some cases, they may also distribute leaflets inside.			
Tamaño/ Size	1 x 1,5 m	No procede	
Frecuencia cambio /Change	Semanal/ Mensual/Weekly/Monthly		
Productos/ Products	Cultural/ Cultural		
Movimiento /Movement	No/No	Si/Yes	
Formato	Impresión/Print	Digital/Digital	
Propietarios/ Owner	JCDecaux /Clear Channel		
LOCALIZACIÓN			
Nombre de la vía/ Street	Glorieta de Bilbao		
Vías de visibilidad / Visibility	Peatonal		
Tamaño de la vía/ Size	43 m		
Visibilidad/ Visibility	Baja	Media	Alta
Precio: soporte+alquiler por unidad/ Price	500-600 €		

Tabla 5. Ficha de las características de los quioscos / Table 5. Kiosks characteristics

Constant exposure to high-intensity visual stimuli, through techniques such as retargeting and geolocated marketing, risks oversaturating the urban landscape and influencing the areas through which citizens navigate the city. Outdoor advertising is not merely a marketing tool but also an expression of a society's cultural and economic state. As cities continue to grow and adapt to new digital trends, outdoor advertising will need to find ways to coexist with the urban environment, respecting its history and contributing positively to the experience of those who live in and visit these spaces.

Conclusions

- Based on this analysis, it is important to highlight the role of outdoor advertising and the visual balance that must be established in the urban environment. Various advertising formats convey specific messages that, aside from reflecting certain values, are controlled and regulated by standards. Additionally, the space occupied by these advertisements has been subject to regulation, a result of agreements between private companies that manage the advertising structures and the city council. The latter, through public tenders, grants these companies the concession of public land, which in turn generates variable economic impacts depending on the location of the structure within the city.
- Moreover, the placement of these advertising spaces plays a fundamental role in shaping perceptions of the city. Considered as "spaces of opportunity," these advertising areas have historically evolved alongside society, adapting to changes and trends to reach a more interactive level of digitalization. Beyond digitalization, the advertising formats have advanced by incorporating techniques such as retargeting, transcending physical boundaries to engage with the digital sphere. Through geolocated advertising, these formats utilize publicly available user data, impacting various devices and personalizing the experience of each individual based on their location.
- Consequently, a clear influence on citizen behavior is observed, which can vary depending on the area of the city in which an individual is situated.
- Finally, this research emphasizes that the true challenge for modern cities is not to eliminate advertising from public space but rather to integrate it in a coherent and respectful manner. When thoughtfully designed and properly regulated, outdoor advertising can add urban dynamism and enrich the cultural identity of a city. Without conscious regulation and a thorough consideration of the role of advertising in urban life, visual saturation could degrade the character of cities, transforming them into mere consumption venues rather than meaningful and livable spaces.

Conclusiones

- A partir de este análisis, es importante destacar el papel de la publicidad exterior y el equilibrio visual que debe generarse en el entorno urbano. Los distintos soportes publicitarios transmiten mensajes específicos que, además de estar relacionados con ciertos valores, están controlados y regulados por normativas. Asimismo, el espacio que ocupa esta publicidad ha sido objeto de regulación, resultado de acuerdos entre empresas privadas encargadas de la gestión de los soportes y el ayuntamiento. Este último, mediante concursos públicos, otorga la concesión de suelo público a dichas empresas, lo que a su vez genera un impacto económico variable, dependiendo de la ubicación del soporte en la ciudad.
- Por otra parte, el lugar en el que se ceden estos espacios juega un papel fundamental, ya que contribuye a que la percepción de la ciudad sea diferente. Estos espacios publicitarios, considerados como "espacios de oportunidad", han evolucionado históricamente de la mano de la sociedad, adaptándose a cambios y tendencias hasta alcanzar un nivel de digitalización más interactivo. Además de esta digitalización, los soportes han progresado al incorporar técnicas como el retargeting, que trascienden lo físico y alcanzan el ámbito digital. Mediante la publicidad geolocalizada, estos soportes aprovechan la información pública de los usuarios, incidiendo en distintos dispositivos y personalizando la experiencia de cada persona en función de su ubicación.
- Como consecuencia de estos factores, se observa una clara influencia en el comportamiento ciudadano, que puede variar según el punto de la ciudad en el que se encuentre el individuo.
- Finalmente, esta investigación subraya que el verdadero desafío para las ciudades modernas no consiste en eliminar la publicidad del espacio público, sino en integrarla de manera coherente y respetuosa. La publicidad exterior, cuando está diseñada y regulada adecuadamente, puede aportar dinamismo urbano y enriquecer la identidad cultural de la ciudad. Sin una regulación consciente y una reflexión sobre el papel de la publicidad en la vida urbana, la saturación visual podría degradar el carácter de las ciudades, transformándolas en meros escenarios de consumo en lugar de espacios habitables y significativos.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- Baladrón Pazos AJ, Martínez Pastor E, Pacheco Rueda M. Publicidad y ciudad: la comunicación publicitaria y lo urbano, perspectivas y aportaciones. Comunicación Social: Sevilla y Zamora; 2007. ISBN 978-84-96082-52-6. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=457251
- del Real Westphal P. El Mobiliario Urbano como Objeto de Uso Público: implicaciones para su diseño. Disponible en: https://iluminet.com/newpress/wp-content/uploads/2020/05/El_Mobiliario_Urbano_como_Objeto_de_Uso.pdf
- Eguizábal Maza R. Historia de la publicidad. Madrid: Eresma & Celeste Ediciones; 1998.
- Estudio de Ifoadex. Inversión publicitaria en España (2022). Disponible en: https://www.infoadex.es/home/resumen-estudios-infoadex/
- Instituto de Innovación de ESIC. Tendencias en Publicidad 2024. Disponible en: https://icemd.esic.edu/knowledge/articulos/mega-tendenciasen-publicidad-para-2024/
- Moreno Cardenal L. Publicidad en España. Resumen para clase de historia, Universidad de Valladolid. Disponible en: https://www5.uva.es/guia_docente/uploads/2013/458/42847/1/Documento91.pdf
- Ordenanza Reguladora de la Publicidad Exterior (modificación 2018). Disponible en: https://transparencia.madrid.es/portales/transparencia/es/Buscador/Ordenanza-Reguladora-de-la-Publicidad-Exterior-modificacion-2018-/?vgnextfmt=default&vgnextoid=c22fa1205300b510VgnVCM2000001f4a900aRCRD&vgnextchannel=44d8508929a56510VgnVCM1000008a4a900aRCRD
- Venturi R, Scott Brown D, Izenour S. Aprendiendo de las Vegas. Barcelona: Gustavo Gili; 2011.

MONITORIZACIÓN TÉRMICA E INCIDENCIA DE LAS OLAS DE CALOR SOBRE LAS MEDIDAS DE DESCARBONIZACIÓN Y LAS SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA TEMPORALES EN EL BARRIO DE EL GRAO, CASTELLÓN. PROYECTO DIVAIRCITY

THERMAL MONITORING AND HEATWAVE INCIDENCE OF TEMPORAL DECARBONIZATION MEASURES AND NATURE BASED SOLUTIONS IN EL GRAO NEIGHBORHOOD, CASTELLON. DIVAIRCITY PROJECT

Amparo León-Vinet
Máster en Ingeniería en Tecnologías Industriales por la Universitat Politècnica de València. Instituto de Ingeniería Energética de la UPV. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Email: amleovi@etsii.upv.es

Elisa Peñalvo-López
PhD. por la Universitat Politècnica de València. Instituto de Ingeniería Energética de la UPV. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Email: elpealpe@upvnet.upv.es

Vicente León-Martínez
PhD. por la Universitat Politècnica de València. Instituto de Ingeniería Energética de la UPV. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Email: vleon@die.upv.es

Iván Valencia-Salazar
PhD. por la Universitat Politècnica de València. Instituto de Ingeniería Energética de la UPV. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Email: ivalencias@die.upv.es

Abstract

One of the best-known effects of climate change is the global increase in temperatures around the globe, which affects mainly children and the elderly due to their higher sensitivity to temperature changes. This paper observes the difference in thermal related indicators before and after the temporary intervention in the city of Castellón de la Plana, a pilot city of the H2020 DivAirCity project. The temporary intervention includes Nature-Based Solutions (NBS), as well as decarbonization measures, that range from potters to the elimination of parking spots to deter traffic in the area.

This study shows that although the changes in thermal data are minor due to the few changes made during the temporary intervention, it is expected major changes after the implementation of the permanent interventions. A wider period of time is necessary to fully comprehend the effects of the intervention.

Keywords

Thermal analysis, Heatwave, Energy Efficiency, Carbon Neutral Cities, Climate change, Air Quality, Social Diversity, NBS, European Union (EU), EU Project, H2020, Horizon 2020

Introducción

El cambio climático es la alteración del clima y las temperaturas de la Tierra que afecta a los ecosistemas y origina cambios que directa o indirectamente son producidos por la actividad humana. Los países de la UE se han comprometido jurídicamente con la lucha contra el cambio climático mediante el cambio a una economía climáticamente neutra con cero emisiones netas de gases de efecto invernadero de aquí a 2050, poniéndose en marcha el Pacto Verde Europeo. España, miembro de la UE desde 1986, también se encuentra comprometida con este objetivo.

Las medidas que pueden tomarse van desde la creación de sombraje mediante zonas verdes hasta la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero mediante la descarbonización de los barrios. La infraestructura verde urbana puede reducir las necesidades de refrigeración y calefacción mediante el sombreado y la evapotranspiración (Cheng, Cheung y Chu, 2010), con un potencial de reducción del 10% de la carga de refrigeración debido a la presencia de zonas verdes en las inmediaciones (Yu y Hien, 2006).

Los efectos de las altas temperaturas sobre la salud son múltiples y pueden oscilar desde ligeras molestias hasta comprometer la vida. Estos efectos se ven influenciados por un alto grado de humedad, la ausencia de viento, la presencia de ciertos contaminantes atmosféricos, y el hecho de vivir en un ambiente muy urbanizado el cual produce el efecto conocido como «isla de calor». Las altas temperaturas afectan más a los niños y los ancianos, que suelen ser más sensibles a los cambios de temperatura. El proyecto H2020 DivAirCity tiene en cuenta estas diferencias y facilita la implementación de NBS y medidas de descarbonización con el fin de lograr resultados a largo plazo que den lugar a comunidades urbanas más ecológicas, sostenibles, inclusivas y saludables.

Los datos termográficos presentes en este artículo son los de una de las cinco ciudades piloto del proyecto H2020 DivAirCity, Castellón de la Plana. Esta ciudad cuenta con una amplia cantidad de sensores situados en el barrio marítimo del El Grao instalados durante el proyecto (Airly) o cuya existencia era previa al mismo (GVA y AEMet).



Imagen 1. Intervención temporal en una de las zonas de intervención Castellón.
Image 1. Temporary intervention in one of Castellon's intervention areas

En el área de intervención se han realizado de forma temporal medidas NBS como son la instalación de maceteros provisionales, junto con medidas de descarbonización tales como la eliminación de plazas de aparcamiento para reducir el incentivo de tráfico por la calle donde se realiza la intervención. Las medidas temporales llevan instaladas desde mayo 2024. La intervención permanente tiene previsto mejorar y hacer definitivas las acciones realizadas en la intervención temporal, con fecha de finalización principios de 2025.

Objetivos

El objetivo de este artículo es realizar una evaluación térmica para demostrar el potencial de las NBS para mejorar los parámetros térmicos, incluso en intervenciones de carácter temporal.

Introduction

Climate change is the alteration of Earth's climate and temperatures affecting ecosystems and resulting in changes that are directly or indirectly caused by human activity. EU countries are legally committed to fighting climate change by shifting to a climate-neutral economy with net-zero greenhouse gas emissions by 2050, launching the European Green Deal. Spain, member of the EU since 1986, is also committed to this goal.

Measures that can be taken range from creating shade through green spaces to reducing greenhouse gas emissions by decarbonizing neighborhoods. Green urban infrastructure can reduce the cooling and heating requirements via shading and evapotranspiration (Cheng, Cheung, & Chu, 2010), with a potential of a 10% decrease in the cooling load due to the presence of the green area in the vicinity (Yu & Hien, 2006).

The health effects of high temperatures are multiple and can range from mildly uncomfortable to life-threatening. These effects are influenced by high humidity, the absence of wind, the presence of certain atmospheric pollutants, and living in a highly urban environment which produces the so-called 'heat island' effect. High temperatures have a greater impact on children and the elderly, who tend to be more sensitive to temperature changes. The H2020 DivAirCity project takes these differences into account and facilitates the implementation of NBS and decarbonization measures in order to achieve long-term results that lead to greener, more sustainable, inclusive and healthier urban communities.

The thermographic data presented in this paper is from one of the five pilot cities of the H2020 DivAirCity project, Castellón de la Plana. This city has a large number of sensors located in the El Grao seaside neighborhood either installed during the project duration (Airly) or whose existence was prior to the project (GVA and AEMet).



Imagen 2. Borrador de la intervención permanente de una de las zonas de intervención Castellón.
Image 2. Draft of the permanent intervention of one of Castellon's intervention areas

In the intervention area, temporary NBS measures have been carried out, such as the installation of temporary planters, together with decarbonization measures such as the elimination of parking spots to reduce the traffic along the street where the intervention is being carried out. The temporary measures have been in place since May 2024. The permanent intervention, which is expected to improve and make definitive the actions carried out in the temporary intervention, is expected to be completed by the beginning of 2025.

Objectives

The aim of this paper is to carry out a thermal assessment to demonstrate the potential of NBS to improve the thermal parameter, even with temporary interventions.

Metodología

Para poder monitorizar el efecto térmico y sobre las olas de calor de las intervenciones temporales, se han tenido en cuenta los siguientes datos.

Incidencia de las olas de calor

Una ola de calor es un periodo de días consecutivos con temperaturas cálidas en el que tanto la duración del periodo como la temperatura máxima son importantes. En este documento, se define una ola de calor cuando se produce al menos dos de las siguientes situaciones:

- Si la temperatura máxima diaria del periodo de tiempo considerado es superior al percentil 90 de dicho periodo.
- Si la temperatura mínima diaria del periodo de tiempo considerado es superior al percentil 90 de dicho periodo.
- Si la temperatura media diaria (DMT) del periodo de tiempo considerado es superior al percentil 95 de ese periodo.
- Si el Factor de Exceso de Calor (EHF) es positivo. Se puede encontrar más información sobre el EHF en el artículo de John R. Nairn and Robert J. B. Fawcett (2015).

Debido a esta definición, los rangos de temperatura que definen una ola de calor dependen de las mediciones previas de la temperatura de la zona y sus correspondientes percentiles, ajustándose así a las temperaturas habituales de cada zona y país, y en cada rango temporal.

Índice universal de clima térmico (UTCI)

El índice universal de clima térmico (UTCI) proporciona un valor unidimensional que refleja la reacción fisiológica humana al entorno térmico exterior multidimensional (Bröde et al., 2012). Según esta métrica, entre +9 y +26 ºC se considera que no hay estrés térmico, mientras que cualquier valor por encima o por debajo genera estrés por calor o frío, respectivamente. Se puede observar mejor en la Tabla 1.

Utilizando la «Climate CHIP analysis tools heat stress calculator» se estima el UTCI por hora en el año 2023 y 2024, empleando una aproximación de la temperatura del globo.

Efecto isla de calor urbana (UHI)

El efecto isla de calor urbana (UHI) se refiere a una zona urbana que es significativamente más cálida que las zonas rurales o no desarrolladas que la rodean.

Se ha comparado la temperatura media del barrio de El Grao a través de los sensores instalados por Airly y los previamente existentes de la GVA, con la temperatura de una zona rural cercana (AEMet – Atzeneta del Maestrat) durante el verano de 2023 y 2024.

Otros datos de interés

El valor medio mensual de la temperatura máxima diaria es la media de las temperaturas máximas diarias observadas durante un periodo de tiempo específico, ya sea para un año o un periodo de años.

El valor medio mensual de la temperatura mínima diaria es la media de las temperaturas mínimas diarias observadas durante un periodo de tiempo específico, ya sea para un año o un periodo de años. Este indicador se emplea para analizar el patrón de temperaturas nocturnas.

La temperatura diurna máxima es el valor máximo de las temperaturas durante el día durante un periodo de días. Debido a las limitaciones de los sensores, ésta es tomada de las temperaturas horarias.

Resultados

Los efectos de la intervención temporal sobre la temperatura de la zona de intervención se muestran en los siguientes apartados.

Methodology

In order to monitor the thermal and heatwave effects of the temporary interventions, the following data has been considered.

Heatwave incidence

A heatwave is a period of consecutive days with hot temperatures where both period length and peak temperature are important. In this paper, a heatwave is defined when at least two of these events occur:

- If the daily maximum temperature of the considered period of time is greater than the 90th percentile of that period.
- If the daily minimum temperature of the considered period of time is greater than the 90th percentile of that period.
- Daily Medium Temperature (DMT) of the considered period of time is greater than the 95th percentile of that period.
- If the Excess Heat Factor (EHF) is positive. More information on the EHF can be found in John R. Nairn and Robert J. B. Fawcett paper (2015).

Due to this definition, the temperature ranges that define a heatwave are established by previous temperature measurements of the area and their corresponding percentiles, thus adjusting them to the usual temperatures of each area and in each time range.

Universal Thermal Climate Index (UTCI)

The Universal Thermal Climate Index (UTCI) provides a one-dimensional value that reflects the human physiological reaction to the multi-dimensional outdoor thermal environment (Bröde et al., 2012). According to this metric, between +9 and +26 ºC it is considered that there is no thermal stress, while any values above or below it generates heat and cold stress, respectively. This information can be observed in Table 1.

Tabla 1 Escala UTCI y grado de confort (fuente: Blazejczyk et al. 2014)
Table 1 UTCI scale and the degree of comfort (source: Blazejczyk et al. 2014)

UTCI (ºC)	UTCI > 46	38 < UTCI < 46	32 < UTCI < 38	26 < UTCI < 32	9 < UTCI < 26	0 < UTCI < 9	-13 < UTCI < 0	-27 < UTCI < -13	-40 < UTCI < -27	UTCI < -40
Stress category	Extreme heat stress	Very strong heat stress	Strong heat stress	Strong heat stress	No thermal stress	Slight cold stress	Moderate cold stress	Strong cold stress	Very strong cold stress	Extreme cold stress

Using the "Climate CHIP analysis tools heat stress calculator" it is estimated the UTCI per hour in Year 2023 and Year 2024, with a globe temperature approximation.

Urban Heat Island (UHI)

The Urban Heat Island (UHI) effect denotes an urban area that is significantly warmer than its rural or undeveloped surrounding areas.

The average temperature of El Grao neighborhood using Airly's and GVA sensors, has been compared with the temperature of a nearby rural area (AEMet – Atzeneta del Maestrat) during the summer of 2023 and 2024.

Other data of significance

The monthly mean value of daily maximum temperature is the mean of the daily maximum temperatures observed during specific time period, either for a specific year or over a specific period of years.

The monthly mean value of daily minimum temperature is the mean of the daily minimum temperatures observed during specific time period, either for a specific year or over a specific period of years. This indicator is used to analyse the pattern of night-time temperatures.

The maximum daytime temperature is the maximum value of a day temperature for a period of days. Due to the limitations of the sensors, it is based on the hourly temperature.

Incidencia de las olas de calor

Para presentar los datos en un diseño más visual, el número de olas de calor se puede encontrar en un formato tipo calendario. Los datos mostrados en la Imagen 3 son los del sensor 13499 de Airly.

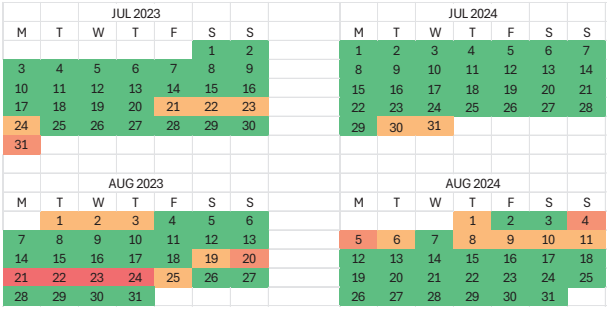


Imagen 3. Calendario de datos de ola de calor de Castellón años 2023 y 2024. Cuanto más rojo, mayor número de índices indican ola de calor, mientras que verde indica ausencia de ola de calor.

Image 3. Castellon calendar heatwave data years 2023 and 2024. The redder the day is, the more indices indicate a heatwave, while green means no heatwave that day.

Índice universal de clima térmico (UTCI)

Analizando los datos del UTCI, se puede observar que el barrio de El Grao presenta días con estrés térmico moderado durante los meses de verano, en la franja horaria de las 14 horas hasta las 19 horas. En los días más calurosos, el estrés térmico moderado puede prolongarse hasta las 21 horas.

A finales del mes de julio es cuando los datos empiezan a cruzar el umbral de estrés térmico moderado con más frecuencia, mientras que a finales de agosto vuelven al rango de ausencia de estrés térmico. Además, el verano del año 2024 muestra un rango más amplio del valor UTCI durante el mismo día, haciendo que los cambios noche-día sean más extremos (Imagen 4)

De las horas medidas, en 2023 un 12.66% de las horas se encuentran en el rango de estrés térmico moderado, mientras que en 2024 este valor aumenta hasta el 13.91%.

Efecto isla de calor urbana (UHI)

Se han comparado los datos de temperatura media en el barrio de El Grao usando sensores de Airly y de la GVA, y los datos de temperatura de un área rural cercana (Atzeneta del Maestrat, AEMet). De los datos obtenidos, se puede concluir que, aunque la temperatura del área de intervención es más estable debido a la influencia del mar, la temperatura en el área rural es más baja.

Otros datos de interés

Como se puede observar en la Tabla 2, las temperaturas han sido por lo general más bajas tras la realización de la intervención temporal. La excepción puede encontrarse durante los valores mínimos en agosto, cuyas noches han sido más cálidas en comparación con el año anterior. Comparando los datos con otros sensores de la ciudad, se puede observar que este cambio de temperatura se aplica a todo Castellón y no solamente a la zona de intervención.

Con respecto a la temperatura máxima diurna, se puede apreciar un incremento brusco de temperatura a finales de junio de 2024. Aunque los datos de 2023 tienen valores de temperatura medios más altos, los picos de temperatura son más marcados durante el año 2024.

Conclusiones

- Se pueden observar efectos ligeramente positivos tanto en la bajada de las temperaturas medias máximas como en el número de olas de calor. Sin embargo, éstos pueden haber sido debidos por elementos externos ajenos al proyecto.
- La falta de sensores del mismo tipo extendidos por la ciudad, pueblos y áreas cercanas puede afectar a los datos reduciendo su precisión.
- Es necesario un mayor rango de tiempo para que se puedan reflejar los cambios provocados por las intervenciones.
- Se espera que las medidas a realizar en la intervención permanente tengan un mayor efecto sobre la situación térmica del barrio.

Results

The effects of the temporary intervention on the temperature of the intervention area are shown in the following sections.

Heatwave incidence

To present the data in a more visual design, the number of heatwaves can be found in a calendar format. The data shown in Image 3 is from Airly sensor ID 13499.

Universal Thermal Climate Index (UTCI)

Analysing the UTCI data, El Grao neighborhood presents days with moderate heat stress in the summer months from 2 p.m. to 7 p.m. In some hotter days it can last until 9 p.m.

At the end of the month of July is when data starts crossing the moderate heat stress threshold, while by the end of August goes to the no heat stress range. Year 2024 summer shows a wider range of UTCI value during the same day, making the daily heat stress changes more extreme (Image 4).

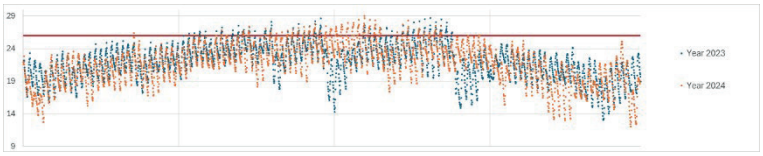


Imagen 4. Comparación horaria del UTCI de junio, julio, agosto y septiembre en 2023 y 2024 en el barrio de El Grao (Castellón)
Image 4. UTCI hourly comparison of June, July, August and September in 2023 and 2024 in El Grao neighborhood (Castellon)

Out of the hours measured, in 2023 12.66% of those hours are in the moderate heat stress threshold, while for 2024 this value increases to 13.91%.

Universal Heat Island (UHI)

Average temperature in El Grao neighborhood via Airly and GVA sensors, and temperature of a nearby rural area (Atzeneta del Maestrat) has been compared. From the data extracted, it can be concluded that, although the intervention area temperature is more stable due to the sea influence, the temperature of the rural area is lower.

Other data of significance

As can be observed in Table 2, temperatures have been generally lower after the temporary intervention implementation compared to the pre-intervention situation. However, during the minimum values in August, those nights have been warmer compared to the previous year. Comparing the data with other sensors in the city indicates that this temperature change applies to the whole of Castellón and not only to the intervention area.

Tabla 2 Valor medio de la temperatura máxima y mínima diaria de Castellón (ºC). Sensor 13499
Table 2 Castellon's monthly mean value of daily max and min temperature (ºC). Sensor 13499

Temperature	June 2023(ºC)	July 2023(ºC)	August 2023(ºC)	Sept. 2023(ºC)	June 2024(ºC)	July 2024(ºC)	August 2024(ºC)	Sept. 2024(ºC)
Maximum	28.08	30.23	31.19	27.71	26.59	29.96	31.12	26.92
Minimum	20.81	23.94	23.44	20.51	19.62	22.92	23.98	19.66

Regarding the maximum daytime temperature, a sharp temperature increase can be observed at the end of June 2024. Although 2023 data have higher mean temperature values, the highest temperature peaks are visible in 2024 data.

Conclusions

- Slightly positive effects can be observed both in the lowering of average maximum temperatures and in the number of heatwaves. However, these may have been due to external elements outside the project.
- The lack of sensors of the same type spread throughout the city, towns, and surrounding rural areas may affect the data by reducing its accuracy.
- A longer time range is needed to reflect the changes caused by the intervention.

- It is expected that the measures to be carried out in the permanent intervention will have a greater impact on the thermal condition of the neighborhood.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado dentro del marco del proyecto de investigación "*The power of diversity and social inclusión as a mean for reducing air pollution and achieving green urban nexus in climate neutral cities' — 'DivAirCity" (Referencia: 101003799)* del Programa Marco H2020 de la Unión Europea.

Acknowledgment

This work has been carried out within the framework of the research project "*The power of diversity and social inclusion as a mean for reducing air pollution and achieving green urban nexus in climate neutral cities*' — *'DivAirCity*" (*Contract Ref: 101003799*) of the European Union's H2020 Framework Program.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

Manos Unidas webpage (https://www.manosunidas.org/).

Council of the European Union (https://www.consilium.europa.eu/en/policies/climate-change/)

Madrid Salud website (https://madridsalud.es/efectos-en-salud-del-calor-extremo/)

Cheng, C.Y., Cheung, K.K., & Chu, L.M. (2010). Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. Building and Environment, 45, 1779-1787.

Yu, C. and Hien, W.N. (2006) Thermal Benefits of City Parks. Energy and Buildings, 38, 105-120. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.04.003.

European Commision (2021). Evaluating the impact of Nature-Based Solutions. Appendix of Methods.

Nairn JR, Fawcett RJ. The excess heat factor: a metric for heatwave intensity and its use in classifying heatwave severity. Int J Environ Res Public Health. 2014 Dec 23;12(1):227-53. doi: 10.3390/ijerph120100227. PMID: 25546282; PMCID: PMC4306859.

Universal Thermal Climate Index webpage (https://utci.org/).

Climate Change Heat Impact and Prevention webpage (https://www.climatechip.org/).

Bröde, Peter & Fiala, Dusan & Blazejczyk, Krzysztof & Holmér, Ingvar & Jendritzky, Gerd & Kampmann, Bernhard & Tinz, Birger & Havenith, George. (2012). Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). International journal of biometeorology. 56. 481-94. 10.1007/s00484-011-0454-1.

Błażejczyk K, Kuchcik M, Błażejczyk A, Milewski P, Szmyd J (2014)Assessment of urban thermal stress by UTCI—experimental andmodelling studies: example from Poland. Die Erde, Vol. 145 1–2/2014: 16–33, 10.12854/erde-145-3.

ANALISIS DEL IMPACTO ENERGÉTICO DE UN TECHO VERDE EN UN EDIFICIO DE AULAS DEL INSTITUTO TECNOLOGICO DE BOCA DEL RIO

GREEN ROOF ENERGY IMPACT ANALYSIS ON A CLASSROOM BUILDING AT THE TECHNOLOGICAL INSTITUTE OF BOCA DEL RIO

José-Juan Huesca-López
Doctorante del programa de Doctorado en Ciencias Ambientales en el Dpto. de Estudios de Posgrado e Investigación; Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Boca del Río; Carretera Veracruz-Córdoba Km.12 C.P.94290. Boca del Río, Ver., México. Maestro en Eficiencia Energética y Energías Renovables por el Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Veracruz. E-mail: d24990009@bdelrio.tecnm.mx
Doctoral candidate in the Environmental Sciences program at the Department of Graduate Studies and Research; National Technological Institute of Mexico, Technological Institute of Boca del Rio; Veracruz-Córdoba Highway Km.12, C.P.94290. Boca del Rio, Veracruz, Mexico. Master in Energy Efficiency and Renewable Energies from the National Technological Institute of Mexico, Technological Institute of Veracruz. E-mail: d24990009@bdelrio.tecnm.mx

Iván Valencia-Salazar
PhD. por la Universitat Politècnica de València. Instituto de Ingeniería Energética de la UPV. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Email: ivalencias@die.upv.es

Elisa Peñalvo-López
PhD. por la Universitat Politècnica de València. Instituto de Ingeniería Energética de la UPV. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Email: elpealpe@upvnet.upv.es

Juan-David Garay-Marín
PhD. por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Laboratorio de Calidad del Aire y Energía del TecNM-Instituto Tecnológico de Boca del Río, Carretera Veracruz-Córdoba Km.12 C.P.94290. Veracruz, México. Email: juangaray@bdelrio.tecnm.mx,ORCID ID: 0000-0002-2823-6985, Teléfono: 229 6905010

Fabiola Lango-Reynoso
PhD en Oceanologia biologíca por la Universite de Bretagne Occidentale, Brest, Francia. Profesor del Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Boca del Río, Carretera Veracruz-Córdoba Km.12 C.P.94290. Veracruz, México. Email: fabiolalango@bdelrio.tecnm.mx,ORCID ID: 0000-0001-8359-434X, Teléfono: 229 6905010

Abstract

The undeniable climate change has created the need to seek options to mitigate it. To reverse the effects of overheating, we must reduce the global temperature by 1.5°C below pre-industrial levels. One of the options to achieve this is to reduce CO_2 emissions. In most countries, electricity generation significantly contributes to CO_2 emissions; therefore, reducing its consumption helps achieve the goal.

The National Technological Institute of Mexico has an energy policy that seeks to make efficient use of electricity and is also interested in using nature-based solutions (NBS). The installation of green roofs in its classrooms will adequately address both interests.

The purpose of this work is to quantify the potential energy savings derived from the installation of a green roof in a building of the National Technological Institute of Mexico, Boca del Rio Institute of Technology, Veracruz, Mexico, through a simulation in the TRNSYS software.

The simulation demonstrated a temperature reduction inside the classrooms of around 15°C, as well as a decrease in energy consumption, representing an annual saving of 14.915,94 kWh, costing EUR 1.065,42. Additionally, an annual reduction of 6,53 tCO_2 in terms of electricity generation was quantified.

Keywords
Green roof energy analysis, Passive cooling, Reducing cooling power consumption, Building energy efficiency, Nature based solutions (NBS), TRNSYS, DivAirCity.

Introducción

El innegable **cambio climático** que afecta a toda la humanidad ha creado la necesidad de buscar opciones para mitigarlo. Está claro lo que se debe hacer, el acuerdo de parís de 2015 estableció que para el 2030 debemos **disminuir la temperatura global en 1.5°C** por debajo del nivel preindustrial para revertir los efectos del sobrecalentamiento que agudizan los fenómenos meteorológicos. Existen diversos campos desde los cuales se puede contribuir al logro de esta meta, uno de ellos es la **disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero**, de entre los cuales el CO_2 es el más abundante. **El proyecto DivAirCity** plantea la solución de este problema mediante el reconocimiento y aceptación de las diferencias entre los diferentes grupos humanos en las ciudades y los convierte en los actores principales para combatir la contaminación del aire y el cambio climático mediante la implementación de **Soluciones Basadas en la Naturaleza** (NBS). En la mayoría de los países, **más de la mitad de las emisiones de CO_2 provienen de la generación de energía eléctrica**, por lo que hacer un uso eficiente de esta implica una reducción de energía eléctrica y por lo tanto una reducción en la generación de CO_2. El aumento en la temperatura global ha creado en los usuarios de edificios y viviendas la necesidad de utilizar **equipos de aire acondicionado** para tener un nivel de confort adecuado. Normalmente, estos equipos **representan más del 50% del consumo de energía eléctrica** del edificio o vivienda, por lo cual, encontrar maneras en las cuales se pueda disminuir su consumo de energía eléctrica, contribuirá a los esfuerzos para revertir los efectos del cambio climático. La **instalación de techos verdes en edificios y viviendas** es una solución basada en la naturaleza que a dado buenos resultados ya que además de **disminuir el consumo de energía eléctrica de equipos de aire acondicionado**, los techos verdes tienen otros beneficios ambientales como el control de escorrentías, disminución del efecto de isla de calor, mejora del microclima y mejora del paisaje entre otros. **El Tecnológico Nacional de México** tiene una política energética en la que busca hacer **uso eficiente de la energía eléctrica**, además está interesado en **utilizar soluciones basadas en la naturaleza**, la instalación de techos verdes en sus aulas atenderá adecuadamente ambos intereses.

La finalidad del presente trabajo es cuantificar los ahorros energéticos potenciales derivados de la instalación de un techo verde en un edificio del Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Boca del Río, Veracruz, México, mediante una simulación en el software TRNSYS para realizar una propuesta de ahorro energético escalable a los más de 200 planteles que conforman el Tecnológico Nacional de México.

Los techos verdes se pueden definir como una cubierta vegetal viva que crece en un sustrato adecuado para su desarrollo el cual se encuentra depositado sobre el techo de edificaciones convencionales ya sean viviendas o edificios. Pueden ser **Extensivos**, con un grosor de hasta 15 cm y un peso entre 110 y 140 kg/m^2, **Semi-intensivos**, que tienen de 15 a 30 cm de grosor y un peso de hasta 250 kg/m^2, **Intensivos** cuyo grosor es mayor a los 30cm y su peso es de más de 250 kg/m^2 y **Modulares** que consisten en crecer la capa vegetal sobre el sustrato dentro de un recipiente. A excepción del modular, la instalación de un techo verde requiere proteger el material constructivo del techo con diversos tratamientos y capas, y aunque existen diversas opciones para instalar un techo verde, desde las comerciales con tecnología de punta hasta las caseras diseñadas por el usuario final, habitualmente en cualquier instalación de techo verde se tiene una capa impermeabilizante para proteger el techo de la humedad, seguida de una capa que protege de las raíces de la vegetación, sobre esta se instala una capa para drenaje, y finalmente, se coloca el sustrato donde crecerá la vegetación.

Existen diversas **finalidades para instalar un techo verde**, sin embargo, siempre habrá una finalidad principal, pero, sin importar cual sea, la instalación de un techo verde aportará diversos beneficios en los aspectos ambiental, económico y social. Los estudios realizados sobre techos verdes han demostrado que son una excelente opción para controlar las escorrentías, contribuyen a la disminución del efecto de isla de calor presente en las grandes ciudades, son fuente de oxígeno, mejoran el paisaje y el microclima a su alrededor, proveen aislamiento térmico a la edificación, estos, por mencionar solo algunos de los beneficios estudiados.

La **importancia del ahorro energético** derivado del aislamiento térmico que se obtiene con un techo verde, el cual se desea cuantificar en este trabajo, reside en el ahorro de energía eléctrica consumida por los equipos de aire acondicionado y la disminución en la emisión de gases de efecto invernadero como el CO_2 al momento de generar la energía eléctrica.

Introduction

The undeniable **climate change** affecting all of humanity has created the need to seek options to mitigate it. It is clear what needs to be done; the Paris Agreement of 2015 established that by 2030 we must **reduce global temperature by 1.5°C** below pre-industrial levels to reverse the effects of overheating that exacerbate meteorological phenomena. There are various fields from which this goal can be contributed to, one of them being the **reduction of greenhouse gas emissions**, among which CO_2 is the most abundant. **The DivAirCity project** proposes the solution to this problem through the recognition and acceptance of differences among different human groups in cities, making them the main actors in combating air pollution and climate change through the implementation of **Nature-Based Solutions** (NBS). In most countries, m**ore than half of CO_2 emissions come from electricity generation**, so making efficient use of it implies a reduction in electricity consumption and therefore a reduction in CO_2 generation. The increase in global temperature has created the need for building and home users to use **air conditioning equipment** to achieve an adequate level of comfort. Normally, these devices **represent more than 50% of the electricity consumption** of the building or home, so finding ways to reduce their electricity consumption will contribute to efforts to reverse the effects of climate change. The **installation of green roofs in buildings and homes** is a nature-based solution that has yielded good results, as in addition to **reducing the electricity consumption of air conditioning equipment**, green roofs have other environmental benefits such as runoff control, reduction of the heat island effect, improvement of the microclimate, and enhancement of the landscape, among others. **The National Technological Institute of Mexico** has an energy policy that seeks to make **efficient use of electricity** and is also interested in **using nature-based solutions**. The installation of green roofs in its classrooms will adequately address both interests.

The goal of this work is to quantify the potential energy savings derived from the installation of a green roof in a building of the National Technological Institute of Mexico, Boca del Rio Institute of Technology, Veracruz, Mexico, through a simulation in the TRNSYS software to make an energy-saving proposal scalable to the more than 200 campuses that make up the National Technological Institute of Mexico.

Green roofs can be defined as living vegetative covers that grow in a suitable substrate for their development, which are deposited on the roof of conventional buildings, whether homes or buildings. They can be **Extensive**, with a thickness of up to 15 cm and a weight between 110 and 140 kg/m², **Semi-intensive**, with a thickness of 15 to 30 cm and a weight of up to 250 kg/m², **Intensive** with a thickness greater than 30 cm and a weight of more than 250 kg/m², and **Modular**, which consists of growing the vegetative layer on the substrate within a container. Except for the modular type, the installation of a green roof requires protecting the roof's construction material with various treatments and layers. Although there are various options for installing a green roof, from commercial ones with cutting-edge technology to homemade ones designed by the end user, typically, any green roof installation includes a waterproofing layer to protect the roof from moisture, followed by a layer that protects against the roots of the vegetation. On top of this, a drainage layer is installed, and finally, the substrate where the vegetation will grow is placed.

There are various **purposes for installing a green roof**; however, there will always be a primary purpose. Regardless of what it is, the installation of a green roof will provide various benefits in environmental, economic, and social aspects. Studies conducted on green roofs have shown that they are an excellent option for controlling runoff, contributing to the reduction of the heat island effect present in large cities, being a source of oxygen, improving the landscape and microclimate around them, and providing thermal insulation to the building, to mention just a few of the benefits studied.

The **importance of energy savings** derived from the thermal insulation obtained with a green roof, which is intended to be quantified in this work, lies in the savings of electrical energy consumed by air conditioning equipment and the reduction in the emission of greenhouse gases such as CO_2 when generating electrical energy.

Lo anterior se demuestra en diversos **trabajos realizados en las últimas décadas** en los que mediante mediciones físicas y simulaciones se han obtenido temperaturas que no superan los 30°C [1], temperaturas promedio de 25.7°C [2], disminución de la temperatura de hasta 30°C [3] [4], 21°C [5], reducción de 40% en la energía de enfriamiento [6], disminución de la irradiancia solar entre 81.22% y 90.52% [7], ahorro de energía de los equipos de aire acondicionado de 28,000 kWh [8] por mencionar algunos resultados.

Diseño experimental

Se utilizará el **software comercial TRNSYS** para correr una simulación calibrada con los datos climatológicos históricos de la zona de estudio y los materiales del techo verde propuesto. La simulación se ejecutará por un periodo de 8760 horas (1 año) considerando 2 escenarios, el edificio con y sin techo verde, esto permitirá evaluar el comportamiento energético en ambos casos y determinar el ahorro derivado de la utilización de un techo verde.

El **área de estudio** se localiza al interior del Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Boca del Rio, se trata de un edificio de aulas de una planta (Edificio L) con sistema constructivo típico de los edificios escolares en México cuyo techo es plano y de concreto con un grosor entre 9 y 11 cm y una superficie de 560m^2 (Imagen 1).

El **diseño propuesto del techo verde** toma en consideración que el edificio cuenta ya con una capa impermeabilizante de tipo asfáltica de entre 0.4 y 0.5 mm y sobre esta se instala la capa de drenaje de 4 a 5 cm construida con botellas PET aplastadas, sobre esta una membrana textil que funciona como filtro y retiene el sustrato, el sustrato que consiste en una mezcla de tepezil (75%) y sustrato para suculentas (25%) y finalmente como cubierta vegetal se considera el pasto inglés (Imagen 2).



Imagen 1. Área de estudio, Edificio L
Image 1. Study area, Building L

Resultados

Se corrió la simulación con TRNSYS para un periodo de 8760 horas previsto y se obtuvieron 2 grupos de 3 gráficas de las misas variables, un grupo corresponde a la simulación sin techo verde, mientras que el otro corresponde a la simulación con techo verde, entre las gráficas de cada grupo, 2 son gráficas de temperatura exterior y del techo, una interna y otra externa y la gráfica restante es de ganancia de energía del techo y enfriamiento. Las imágenes 3 a 8 muestran estas gráficas.

De manera general y a simple vista, se observa disminución en la temperatura y la energía en las gráficas de la simulación con techo verde, lo que implica una disminución en el consumo de energía por parte de los equipos de aire acondicionado. **De manera particular**, al observar el comportamiento de la temperatura exterior (imágenes 3 y 4), se observan fluctuaciones de hasta 40°C en la simulación sin techo verde contra 10°C con techo verde, esto implica que el techo verde disminuye las fluctuaciones de temperatura aproximadamente 30°C, esto a su vez mejora el microclima en el entorno del techo verde. **Con respeto a las temperaturas internas** (imágenes 5 y 6) cabe destacar que la temperatura del techo no supera los 30°C en la simulación con techo verde contra 45°C sin techo verde, además la temperatura interior tiene menos fluctuaciones, alrededor de 5°C

El consumo anual de energía para la simulación sin techo verde es de 47.480,61 kWh (142.441,83 kWh térmicos), lo que representa un costo de EUR 3.391,47 y un total de emisiones de 20,80 tCO2 por concepto de generación de energía eléctrica. Para el caso de la simulación con techo verde, el consumo anual de energía es de 32.564,67 kWh (97.694,00 kWh térmicos), con un costo de EUR 2.326,04 y 14,26 tCO_2 de emisiones. De lo anterior se obtiene que la instalación del techo verde significa un ahorro de 14.915 kWh (44.747,83 kWh térmicos), EUR 1.065,42 y 6,53 tCO_2 en emisiones.

The above is demonstrated in various works carried out in recent decades, in which physical measurements and simulations have obtained temperatures that do not exceed 30°C [1], average temperatures of 25.7°C [2], temperature reductions of up to 30°C [3] [4], 21°C [5], a 40% reduction in cooling energy [6], a decrease in solar irradiance between 81.22% and 90.52% [7], and energy savings of air conditioning equipment of 28,000 kWh [8], to mention some results.

Experimental set-up

The **commercial software TRNSYS** will be used to run a simulation calibrated with historical climatological data from the study area and the materials of the proposed green roof. The simulation will be executed for a period of 8760 hours (1 year) considering two scenarios: the building with and without a green roof. This will allow for the evaluation of energy performance in both cases and the determination of the savings derived from the use of a green roof.

The **study area** is located within the National Technological Institute of Mexico, Technological Institute of Boca del Rio. It is a single floor classroom building (Building L) with a typical construction system of school buildings in Mexico, featuring a flat concrete roof with a thickness between 9 and 11 cm and an area of 560m² (Image 1).

The **proposed design of the green roof** considers that the building already has an asphalt waterproofing layer between 0.4 and 0.5 mm, and on top of this, a drainage layer of 4 to 5 cm made of crushed PET bottles is installed. Above this, a textile membrane that functions as a filter and retains the substrate is placed. The substrate consists of a mixture of pumice (75%) and succulent substrate (25%), and finally, the vegetative cover is Kentucky bluegrass (Image 2).

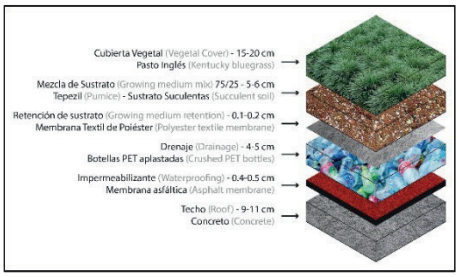


Imagen 2. Diseño propuesto del techo verde
Image 2. Proposed design of the green roof

Results

The simulation was run with TRNSYS for the planned period of 8760 hours, and two groups of three graphs of the same variables were obtained. One group corresponds to the simulation without a green roof, while the other corresponds to the simulation with a green roof. Among the graphs in each group, two are graphs of external and roof temperatures, one internal and one external, and the remaining graph is of roof energy gain and cooling. Images 3 to 8 show these graphs.

In general, and at first glance, a decrease in temperature and energy is observed in the graphs of the simulation with a green roof, which implies a reduction in energy consumption by air conditioning equipment. **When observing** the behavior of the external temperature (images 3 and 4), fluctuations of up to 40°C are observed in the simulation without a green roof compared to 10°C with a green roof. This implies that the green roof reduces temperature fluctuations by approximately 30°C, which in turn improves the microclimate around the green roof. **Regarding internal temperatures** (images 5 and 6), it is noteworthy that the roof temperature does not exceed 30°C in the simulation with a green roof compared to 45°C without a green roof. Additionally, the interior temperature has fewer fluctuations, around 5°C.

The simulated annual energy consumption without a green roof is 47.480,61 kWh (142.441,83 thermal kWh), which represents a cost of EUR 3.391,47 and total emissions as 20,80 tCO_2 due to electricity generation. On the other hand, the simulation with a green roof show that the annual energy consumption is 32.564,67 kWh (97.694,00 thermal kWh), with a cost of EUR 2.326,04 and emissions of about 14,26 tCO_2. From this, it is concluded that the installation of

the green roof results in savings of 14.915 kWh (44.747,83 thermal kWh), EUR 1.065,42, and 6,53 tCO_2 in emissions.

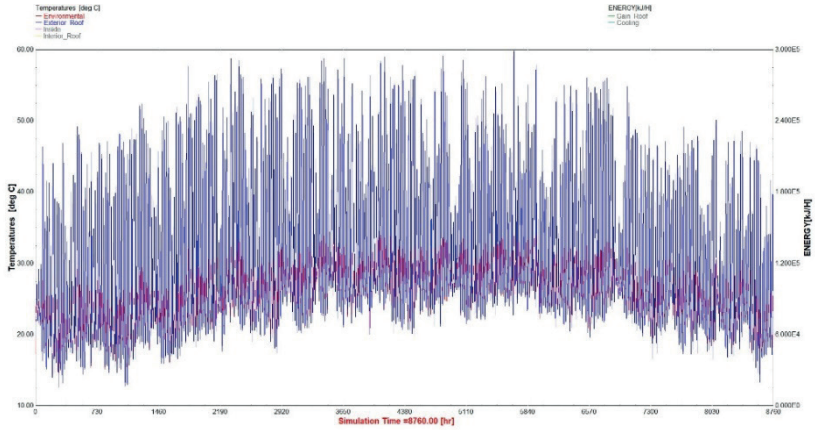


Imagen 3. Temperaturas exteriores: ambiental y techo, simulación sin techo verde

Image 3. Exterior Temperatures: Ambient and Roof, Simulation without Green Roof

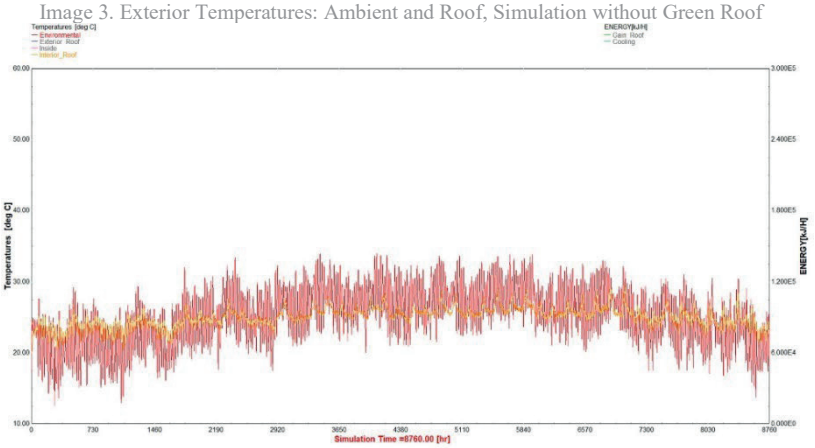


Imagen 4. Temperaturas exteriores: ambiental y techo, simulación con techo verde

Image 4. Exterior Temperatures: Ambient and Roof, Simulation with Green Roof

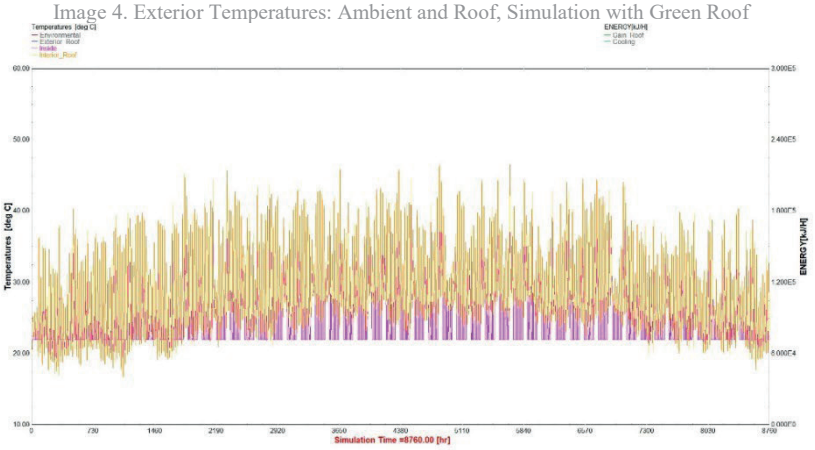


Imagen 5. Temperaturas interiores: ambiental y techo, simulación sin techo verde

Image 5. Interior Temperatures: Ambient and Roof, Simulation without Green Roof

Conclusiones

La simulación demuestra que con la instalación de un techo verde en el edificio L del Instituto Tecnológico de Boca del Río, se lograría una disminución de la temperatura al interior de las aulas de alrededor de 15°C

Las gráficas de energía muestran igualmente una disminución en los consumos energéticos con fines de enfriamiento, lo cual se refleja en una disminución en el consumo de energía eléctrica por parte de los equipos de aire acondicionado, la cual representa un ahorro anual de 14.915,94 kWh cuyo costo es de EUR 1.065,42.

La disminución en el consumo de energía eléctrica para este caso de estudio representa una disminución anual de 6,53 tCO_2 por concepto de generación de energía eléctrica.

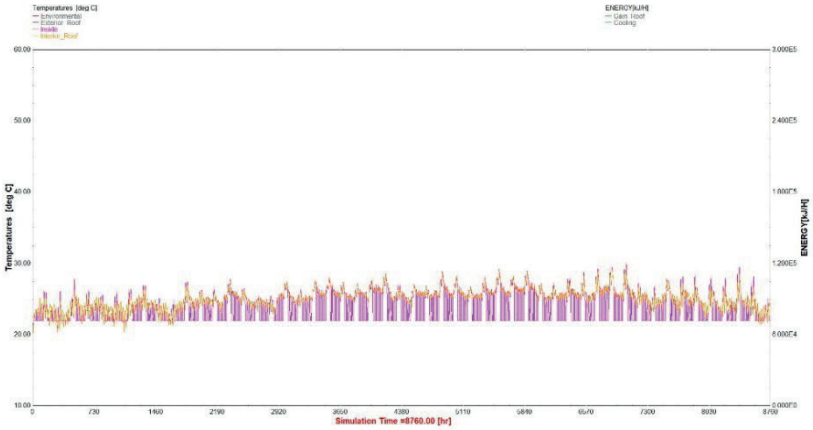


Imagen 6. Temperaturas interiores: ambiental y techo, simulación con techo verde
Image 6. Interior Temperatures: Ambient and Roof, Simulation with Green Roof

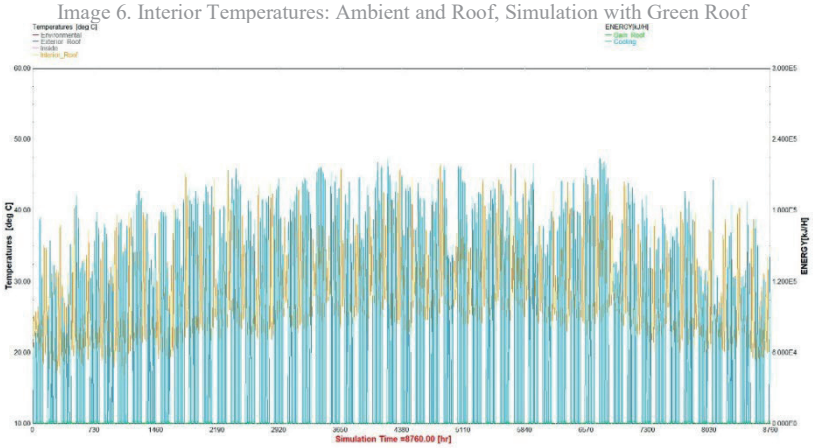


Imagen 7. Energía: Ganancia del techo y enfriamiento, simulación sin techo verde
Image 7. Energy: Roof Gain and Cooling, Simulation without Green Roof

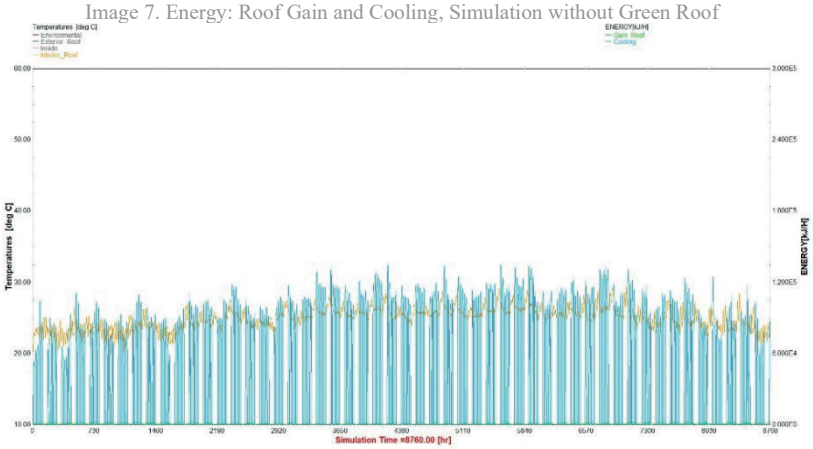


Imagen 8. Energía: Ganancia del techo y enfriamiento, simulación con techo verde
Image 8. Energy: Roof Gain and Cooling, Simulation with Green Roof

Conclusions

The simulation demonstrates that with the installation of a green roof in Building L of the Technological Institute of Boca del Rio, a temperature reduction of around 15°C inside the classrooms would be achieved.

The energy graphs also show a decrease in energy consumption for cooling purposes, which is reflected in a reduction in the electrical energy consumption by air conditioning equipment, representing an annual saving of 14.915,94 kWh, costing EUR 1.065,42.

The reduction in electrical energy consumption for this case study represents an annual decrease of 6,53 tCO_2 in terms of electricity generation.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado dentro del marco del proyecto de investigación "The power of diversity and social inclusión as a mean for reducing air pollution and achieving green urban nexus in climate neutral cities" — 'DivAirCity" (Referencia: 101003799) del Programa Marco H2020 de la Unión Europea.

Acknowledgment

This work has been carried out within the framework of the research project "The power of diversity and social inclusion as a mean for reducing air pollution and achieving green urban nexus in climate neutral cities" — "DivAirCity" (Contract Ref: 101003799) of the European Union's H2020 Framework Program.

Bibliografía (Bibliography)

[1] A. Niachou, K. Papakonstantinou, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis y G. Mihalakakou, «Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance,» *Energy and Buildings,* vol. 33, nº 7, pp. 719-729, 9 2001.

[2] R. Kumar y S. C. Kaushik, «Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings,» *Building and Environment,* vol. 40, nº 11, pp. 1505-1511, 11 2005.

[3] S. C. M. Hui, D. R. Sam y C. M. Hui, «Benefits and potential applications of green roof systems in Hong Kong,» 2006.

[4] S. E. Ouldboukhitine, R. Belarbi, I. Jaffal y A. Trabelsi, «Assessment of green roof thermal behavior: A coupled heat and mass transfer model,» *Building and Environment,* vol. 46, nº 12, pp. 2624-2631, 12 2011.

[5] J. Sonne, «Evaluating Green Roof Energy Performance,» *ASHRAEJournal,* vol. 48, pp. 59-61, 2006.

[6] A. Spala, H. S. Bagiorgas, M. N. Assimakopoulos, J. Kalavrouziotis, D. Matthopoulos y G. Mihalakakou, «On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece,» *Renewable Energy,* vol. 33, nº 1, pp. 173-177, 1 2008.

[7] R. Fioretti, A. Palla, L. G. Lanza y P. Principi, «Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate,» *Building and Environment,* vol. 45, nº 8, pp. 1890-1904, 8 2010.

[8] C. Y. Jim y L. L. Peng, «Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof,» *Urban Forestry & Urban Greening,* vol. 11, nº 1, pp. 73-85, 1 2012.

[9] S. S. Moody y D. J. Sailor, «Development and application of a building energy performance metric for green roof systems,» *Energy and Buildings,* vol. 60, pp. 262-269, 5 2013.

[10] . United Nations Industrial Development Organization, «Climate action,» [En línea]. Available: https://www.unido.org/our-priorities/climate-action.

[11] . United Nations Framework Convention on Climate Change, «The Paris Agreement,» [En línea]. Available: https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement.

[12] . United Nations, «Support Sustainable Development and Climate Action,» [En línea]. Available: https://www.un.org/en/our-work/support-sustainable-development-and-climate-action.

[13] . Tecnológico Nacional de México, «Sistema de Gestion de la Energía (SGEn),» [En línea]. Available: https://www.tecnm.mx/?vista=Sistema_Energia.

[14] A. L. Pisello, C. Piselli y F. Cotana, «Thermal-physics and energy performance of an innovative green roof system: The Cool-Green Roof,» *Solar Energy,* vol. 116, pp. 337-356, 6 2015.

[15] . Grow Green Project, «NBS Business Models search engine - GrowGreen,» [En línea]. Available: https://growgreenproject.eu/nbs-business-models-search-engine/.

[16] . DivAirCity Project, «Welcome to DivAirCity H2020,» [En línea]. Available: https://divaircity.eu/.

[17] S. Cascone, F. Catania, A. Gagliano y G. Sciuto, «A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings,» *Building and Environment,* vol. 136, pp. 227-239, 5 2018.

[18] P. Bevilacqua, D. Mazzeo, R. Bruno y N. Arcuri, «Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area,» *Energy and Buildings,* vol. 122, pp. 63-79, 6 2016.

EVALUACIÓN DE PROPUESTAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL EDIFICIO M DEL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO CAMPUS BOCA DEL RÍO EN BOCA DEL RÍO, VERACRUZ

EVALUATION OF ENERGY EFFICIENCY PROPOSALS IN BUILDING M OF THE TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO, BOCA DEL RÍO CAMPUS, IN BOCA DEL RÍO, VERACRUZ

Ignacio-Zenón-Carmona-Uscanga
Master student of Sciences in Environmental Engineering. Air Quality and Energy Laboratory of *the Instituto Tecnológico de Boca del Río, TecNM. Veracruz-Córdoba Highway Km.12, Z.C.94290 Boca del Río, Veracruz. Mechanical Engineer by the Instituto Tecnológico de Boca del Río, TecNM. E-mail: m23990004@bdelrio.tecnm.mx*

Iván-Valencia-Salazar
Ph.D. by the Universitat Politècnica de València. Institute of Energy Engineering of the UPV. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, Spain. Email: ivalencias@die.upv.es

Elisa-Peñalvo-López
Ph.D. By the Universitat Politècnica de València. Institute of Energy Engineering of the UPV. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, Spain. Email: elpealpe@upvnet.upv.es

Juan-David-Garay-Marín
Ph.D. by the Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Air Quality and Energy Laboratory of the *Instituto Tecnológico de Boca del Río, TecNM*. Veracruz-Córdoba Highway Km.12 C.P.94290. Veracruz, México. *Telephone:+52 2296905010 ext. 1090*
ORCID ID: 0000-0002-2823-6985 Email: juangaray@bdelrio.tecnm.mx

Fabiola-Lango-Reynoso
Ph.D. by the Oceanology Biology at the Universite de Bretagne Occidental de France. Division of Graduate Studies and Research. *Instituto Tecnológico de Boca del Río, TecNM*. Veracruz-Córdoba Highway Km.12 C.P.94290. Veracruz, México. *ORCID ID:* 0000-0001-8359-434X *Email:* fabiolalango@bdelrio.tecnm.mx

Abstract

In Mexico, the increasing use of electrical energy in educational institutions, particularly in warm and humid regions, highlights the need for improvements in energy efficiency. Air conditioning systems represent one of the largest energy consumers in these settings. Additionally, factors such as ventilation and the materials used in classroom construction significantly influence indoor temperatures and the thermal comfort of students and teachers, directly affecting the energy consumption of air conditioning units.

This paper evaluates the feasibility and impact of various energy efficiency proposals for Building M of the Tecnológico Nacional de México, Campus Boca del Río, Veracruz. One of the most significant strategies shows us how important it is to implement a ventilation system after being assessed through simulations conducted in TRNSYS software. The findings demonstrate a significant reduction in energy consumption, improved thermal comfort, and a decreased environmental impact through reduced carbon emissions. This work underscores the importance of implementing energy efficiency strategies in educational buildings located in warm-humid climates, offering a replicable methodology for similar institutions.

Keywords
Energy Efficiency, Ventilation System, Thermal Comfort, Energy Consumption, TRNSYS

Introducción

La eficiencia energética, es definida como el uso óptimo de la energía para proporcionar los mismos servicios con un menor consumo (CONUEE, 2023). En México, la optimización energética se ha vuelto un tema central para mitigar los efectos del cambio climático y reducir los costos operativos por la generación de la energía eléctrica. El incremento del consumo de energía eléctrica en instituciones educativas, particularmente en zonas cálidas y húmedas, ha resaltado en la necesidad de mejoras en eficiencia energética. Diversas investigaciones han tenido como objetivos principales de estudio a la eficiencia energética y el confort térmico en los espacios de trabajo como oficinas e instituciones educativas, debido a su impacto en el bienestar de los usuarios, el consumo energético y la descarbonización de las edificaciones.

Por ejemplo, Torres (2010) reflexionó sobre el confort térmico en oficinas, en su estudio en la Universidad Nacional de San Juan, desarrolló un modelo para optimizar los sistemas de climatización mediante estrategias que lograron una reducción significativa del consumo, proponiendo soluciones más sostenibles para estos entornos. Otro estudio importante lo realizó Rodríguez (2018), utilizando redes de estaciones meteorológicas y el método TPS para la interpolación, integró los datos en simulaciones térmicas realizadas con el software TRNSYS, evaluando la demanda térmica de los edificios seleccionados. Valencia-Salazar et al. (2021) analizaron el impacto de la ventilación en aulas académicas sobre la temperatura, el confort estudiantil y el consumo de aire acondicionado, evaluando su efecto en el Tecnológico Nacional de México Campus Veracruz, considerando condiciones climáticas locales y consumos eléctricos antes y durante la pandemia de COVID-19. Sus simulaciones térmicas, permitieron analizar diferentes escenarios de ventilación y su relación con el consumo energético. Estos estudios subrayan la importancia de integrar estrategias de optimización energética y confort térmico en el diseño y gestión de edificaciones, destacando el uso de herramientas como TRNSYS para modelar y simular escenarios eficientes. Factores como la ventilación, afectan la temperatura ambiente de las aulas y el confort térmico de estudiantes y maestros, influyendo también directamente en el consumo energético de los equipos de aire acondicionado.

En este trabajo se evalúa la factibilidad e impacto de algunas estrategias propuestas para mejorar la eficiencia energética en el Edificio M del Tecnológico Nacional de México, Campus Boca del Río, Veracruz, en donde se remarca la importancia de implementar un sistema de ventilación de acuerdo a la guía de referencia en ventilación de confort de la norma mexicana vigente, generando simulaciones realizadas en el software TRNSYS. Los resultados demuestran una reducción significativa en el consumo de energía, un mayor confort térmico y un menor impacto ambiental a través de la reducción de las emisiones de carbono.

Norma Oficial Mexicana

La Norma Oficial Mexicana NOM-001-STPS-2008, (Secretaría del Trabajo y Previsión Social, 2008) Edificios, locales, instalaciones y áreas en los centros de trabajo-Condiciones de seguridad, en su guía de referencia I ventilación de confort, reconoce los importantes beneficios que tiene la ventilación para la salud de los trabajadores y usuarios. La guía no es de cumplimiento obligatorio, pero complementa la comprensión de la norma. La ventilación mecánica controlada reemplaza la natural descontrolada, garantizando calidad de aire mediante sistemas de extracción, conductos y tomas que aseguran una renovación uniforme. Esta guía se limita a realizar las siguientes recomendaciones observadas en la Tabla 1:

Introduction

Energy efficiency is defined as the optimal use of energy to provide the same services while consuming less (CONUEE, 2023). In Mexico, energy optimization has emerged as a key strategy to mitigate climate change effects and reduce operational costs associated with electricity generation. The increasing energy demand in educational institutions, particularly in warm and humid regions, highlights the pressing need for improved energy efficiency. Numerous studies have focused on energy efficiency and thermal comfort in workspaces such as offices and educational institutions due to their significant impact on user well-being, energy consumption, and building decarbonization.

For example, Torres (2010) examined thermal comfort in office spaces at the Universidad Nacional de San Juan, his research developed a model for optimizing air conditioning systems, achieving a significant reduction in energy consumption through sustainable strategies. Another big research was made by Rodriguez (2018) who investigated interpolation techniques by leveraging networks of meteorological stations and the Thin Plate Spline (TPS) interpolation method, these data were integrated into thermal simulations conducted with the TRNSYS software to evaluate the thermal demand of selected buildings. Valencia-Salazar et al. (2021) studied the effects of ventilation in academic classrooms on indoor temperature, student comfort, and air conditioning energy use, focusing on the Tecnológico Nacional de México campus Veracruz under local climatic conditions and energy consumption patterns before and during the COVID-19 pandemic. Their thermal simulations enabled the assessment of different ventilation scenarios and their relationship to energy use. These studies underscore the importance of incorporating energy optimization strategies and thermal comfort measures into the design and management of buildings, with tools such as TRNSYS playing a pivotal role in modeling and simulating efficient scenarios. Some factors such as ventilation affect ambient temperature of the rooms and the thermal comfort of students and teachers, also directly influencing air conditioning units energy consumption.

In this paper, the feasibility and impact of proposed strategies to improve energy efficiency in Building M of the Tecnológico Nacional de México, Boca del Río Veracruz Campus, are evaluated emphasizing the importance of implementing a ventilation system aligned with the comfort ventilation reference guide from the current Mexican standard. Simulations conducted using the TRNSYS software demonstrate a significant reduction in energy consumption, enhanced thermal comfort, and a lower environmental impact through reduced carbon emissions.

Official Mexican Standard

The Official Mexican Standard NOM-001-STPS-2008 (Secretariat of Labor and Social Welfare, 2008), Buildings, Premises, Installations, and Areas in Workplaces - Safety Conditions, in its Reference Guide I on Comfort Ventilation, acknowledges the significant benefits of ventilation for the health of workers and users. This guide is not mandatory but complements the understanding of the standard Controlled mechanical ventilation replaces uncontrolled natural ventilation, ensuring air quality through extraction systems, ducts, and air intakes that provide uniform air renewal. The guide makes the following recommendations, summarized in Table 1:

Tabla 1. Recomendaciones de la guía de referencia en ventilación de confort, NOM-001-STPS-2008
Table 1. Recommendations from the comfort ventilation reference guide, NOM-001-STPS-2008

Consideraciones a tomar / Considerations to be taken	**Recomendaciones / Recommendations**
Humedad relativa / Relative Humidity	entre 20% y 60% / between 20% y 60%
Temperatura del aire (épocas de frio) / Air Temperature (cold seasons)	22°C ± 2°C
Temperatura del aire (épocas calurosas) / Air Temperature (warm seasons)	24.5°C ± 1.5°C
Velocidad media del aire (épocas de frio) / Average Air Velocity (cold seasons)	no exceder de 0.15 m/s / not exceeding 0.15 m/s
Velocidad media del aire (épocas calurosas) / Average Air Velocity (warm seasons)	no exceder de 0.25 m/s / not exceeding 0.25 m/s
Renovaciones de aire / Air Changes	≥ 5 renovaciones por hora / ≥ 5 air changes per hour

Materiales y Métodos

Caso de Estudio

La intensidad energética de los campus universitarios presenta una amplia variabilidad, algunos campus tienen una baja intensidad energética, atribuida al uso mínimo o nulo de equipos de aire acondicionado en aulas y laboratorios. En contraste, otros campus experimentan un incremento en su consumo energético debido a las altas temperaturas ambientales (Valencia-Salazar et al., 2021). Para este caso de estudio se ha seleccionado una de las 254 instituciones del Tecnológico Nacional de México (TecNM), siendo el Campus Boca del Río, en Veracruz, el cual consta de una plantilla de alumnos de alrededor de 2500 alumnos (Tecnológico Nacional de México, 2024). Este campus se encuentra en la zona costera del Golfo de México, la zona tiene un clima cálido-húmedo. La temperatura media anual es de 25.23°C, con régimen de lluvias en verano y poca oscilación térmica. En lo que se refiere al viento, se cuenta con un abundante recurso, el cual presenta una marcada estacionalidad, los máximo valores se presentan de noviembre a abril (CONAGUA 2024).

Se ha tomado el Edificio M para la evaluación de las propuestas de mejora en eficiencia energética, primordialmente, el instalar un sistema de ventilación. El edificio consta de un área de 386m^2, (48.25 m L x 8 m A), con una estructura base construida de cemento, dividida por 16 muros de cada lado con sus respectivas trabes, su losa es de 10 cm. Cuenta con 6 salones de clase (M1-M6), 2 cubículos para maestros (M7-M8) y 1 laboratorio de Investigación en Biotecnología Acuícola (LIBA). El horario de trabajo en las aulas es de 7 a 21 horas de lunes a viernes. Imágenes 1,2 y 3.



Imagen 1. Edificio M en el TecNM Campus Boca del Río. / Image 1 . Building M at TecNM Campus Boca del Río



Imagen 2. Representación Gráfica lateral del Edificio M en el TecNM Campus Boca del Río, realizada en Sketchup / Image 2 . Lateral graphic representation of the Building M at TecNM Campus Boca del Río, made in Sketchup

Consumo eléctrico con ventilación

Para evaluar el impacto de la ventilación en el consumo de energía eléctrica del campus se tomarán en cuenta la guia de referencia de la NOM-001-STPS-2008 incluyendo las 5 ronavaciones de aire por hora, simulando 4 diferentes escenarios, partiendo del escenario base. Para el análisis de cada uno de los escenarios se emplea el programa de cómputo Trnsys 18, con un modelo de edificio de 386m^2 , una altura de 2,90m, potencias de refrigeración de 36,000 Btu´s en salones y laboratorios y 24,000 Btu´s en los cubiculos de los maestros.

Materials and Methods

Case Study

The energy intensity of university campuses presents wide variability, since some campuses have low energy intensity, attributed to minimal or no use of air conditioning equipment in classrooms and laboratories. In contrast, other campuses experience an increase in their energy consumption due to high ambient temperatures (Valencia-Salazar et al., 2021). For this case study, one of the 254 institutions of the National Technology of Mexico (TecNM) has been selected, This Institution is the Boca del Río, Veracruz Campus, which is the Boca del Río Campus, in Veracruz, which consists of a student body of around 2,500 students (Tecnológico Nacional de México, 2024). This campus is located in the coastal area of the Gulf of Mexico, the area has a warm-humid climate. The average annual temperature is 25.23°C, with rain in summer and little thermal variation. Regarding wind, there is an abundant resource, which presents a marked seasonality, the maximum values occur from November to April (CONAGUA 2024).

The building M covers an area of 386 m² (48.25 m length × 8 m width) and is constructed with a cement-based structure. It is divided by 16 walls on each side, supported by beams that sustain a 10 cm thick slab. The facility includes six classrooms (M1–M6), two faculty offices (M7–M8), and one Biotechnology Aquaculture Research Laboratory (LIBA) by its Spanish acronym. Working hours in the classrooms are from 7 a.m. to 9 p.m., Monday to Friday. Images 1,2 & 3.

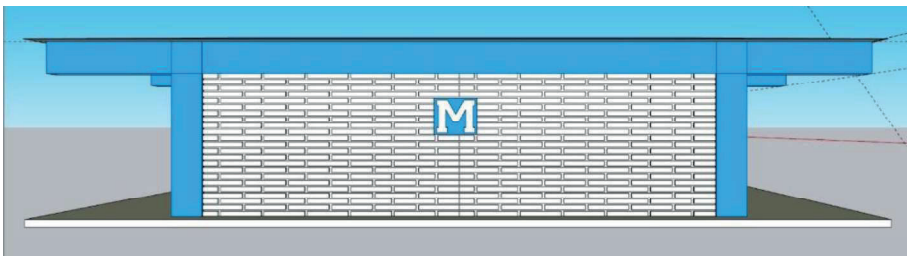


Imagen 3. Representación Gráfica frontal del Edificio M en el TecNM Campus Boca del Río, realizada en Sketchup /
Image 2 . Front graphic representation of the Building M at TecNM Campus Boca del Río, made in Sketchup

Electrical consumption with ventilation

To evaluate the impact of ventilation on the campus's electrical energy consumption, the reference guide of NOM-001-STPS-2008 will be taken into account, including the 5 air rotations per hour, simulating 4 different scenarios, starting from the base scenario. For the analysis of each of the scenarios, the Trnsys 18 computer program is used, with a building model of 386m2, a height of 2.90m, cooling powers of 36,000 Btu's in rooms and laboratories and 24,000 Btu's in teachers' cubicles.

Escenario base. Estado actual sin ventilación a 22°C

Como escenario base se considera en el modelo, 22 grados de temperatura de consigna, no existe ventilación y hay una infiltración reducida a 0.1/h . La evolución de la temperatura en el interior del aula y el consumo eléctrico del equipo de aire acondicionado se muestra en la Imagen 4 y la Tabla 2.

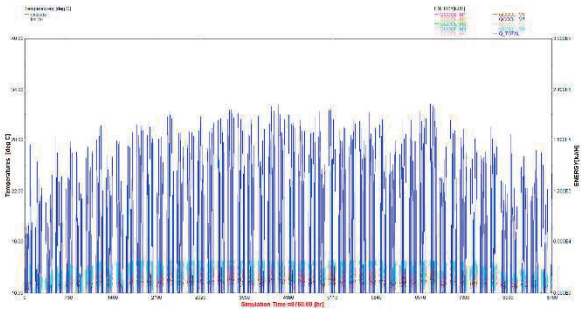


Imagen 4. Evolución anual de la temperatura y del consumo eléctrico en el aula en escenario base. Fuente: Elaboración propia. / Image 4. Evolution of temperature and electricity consumption in the classroom in base scenario. Source: Own elaboration

Tabla 2. Consumo energético, emisiones tCO_2 y costes anuales simulados desde el escenario base
Table 2. Annual Energy consumption, tCO_2 emissions and costs simulated from the base scenario

ESCENARIO BASE INICIAL ACTUAL 22°C Sin Ventilación / INITIAL BASE SCENARIO 22°C Without Ventilation	
MWh eléctricos / Electric MWh	47.48
tCO_2	20.80
Coste / Cost (K€)	3.25

En este escenario base se observa que el equipo de aire acondicionado es capaz de mantener la temperatura de consigna a lo largo del año. Teniendo un consumo anual de electricidad en el aire acondicionado de 47.48 MWh equivalente a una emisión de 20.8 tCO2.

Escenario 1. Con ventilación mecánica y 5 renovaciones por hora a 22°C

Como primer escenario se considera en el modelo 22 grados de temperatura de consigna, un sistema de ventilación con 5 renovaciones de aire por hora . La evolución de la temperatura en el interior del aula y el consumo eléctrico del equipo de aire acondicionado se muestra en la Imagen 5 y la Tabla 3.

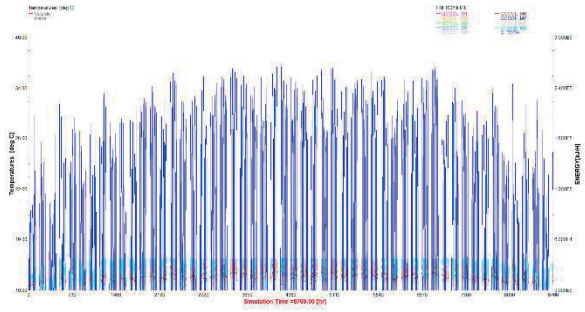


Imagen 5. Evolución anual de la temperatura y del consumo eléctrico en el aula en escenario 1. Fuente: Elaboración propia./ Image 5. Evolution of temperature and electricity consumption in the classroom in scenario 1. Source: Own elaboration

Tabla 3. Consumo energético, emisiones tCO_2 y costes anuales proyectados por la simulación generada para el escenario 1
Table 3. Annual Energy consumption, tCO2 emissions and costs projected by the simulation generated for scenario 1

ESCENARIO 1 a 22°C Con ventilación y 5 renovaciones/hr. / SCENARIO 1 at 22°C With ventilation and 5 air renewals/hr	
MWh eléctricos / Electric MWh	58.96
tCO_2	25.80
Coste / Cost (K€)	4.04

En el escenario 1 se observa que el consumo eléctrico es particularmente mayor respecto al escenario base. El consumo anual de electricidad en el aire acondicionado de 58.96 MWh equivalente a una emisión de 25.8 tCO_2.

Base scenario. Current state without ventilation at 22°C

As a base scenario, the model considers 22 degrees set temperature, there is no ventilation and there is infiltration reduced to 0.1/h. The evolution of the temperature inside the classroom and the electrical consumption of the air conditioning equipment is shown in Image 4 and Table 2.

In this base scenario it is observed that the air conditioning equipment is capable of maintaining the set temperature throughout the year. Having an annual electricity consumption in the air conditioning of 47.48 MWh equivalent to an emission of 20.8 tCO2.

Scenario 1. With mechanical ventilation and 5 air renewals per hour at 22°C

As a first scenario, the model considers 22 degrees set temperature, a ventilation system with 5 air changes per hour. The evolution of the temperature inside the classroom and the electrical consumption of the air conditioning equipment is shown in Image 5 and Table 3.

In scenario 1 it is observed that electricity consumption is particularly higher compared to the base scenario. The annual electricity consumption in the air conditioning of 58.96 MWh is equivalent to an emission of 25.8 tCO_2.

Scenario 2. No ventilation at 26°C

As a base scenario, the model considers 26 degrees of set temperature, there is no ventilation and there is infiltration reduced to 0.1/h. The evolution of the temperature inside the classroom and the electrical consumption of the air conditioning equipment is shown in Image 6 and Table 4.

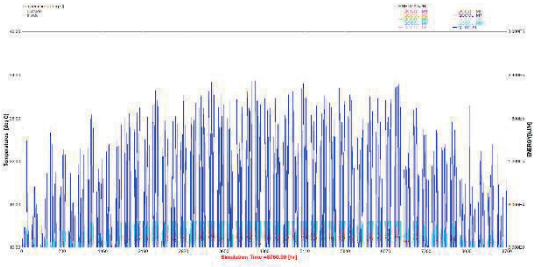


Imagen 6. Evolución anual de la temperatura y del consumo eléctrico en el aula en escenario 2. Fuente: Elaboración propia. / Image 6. Annual Evolution of temperature and electricity consumption in the classroom in scenario 2. Source: Own elaboration

Tabla 4. Consumo energético, emisiones tCO_2 y costes anuales proyectados por la simulación generada para el escenario 2
Table 4. Annual Energy consumption, tCO2 emissions and costs projected by the simulation generated for scenario 2

ESCENARIO 2 a 26°C Sin Ventilación / SCENARIO 2 at 26°C Without Ventilation	
MWh eléctricos / Electric MWh	34.69
tCO_2	15.00
Coste / Cost (K€)	2.38

In scenario 2 we can notice that electricity consumption is considerably lower compared to the base scenario. The annual electricity consumption in the air conditioning of 34.69 MWh is equivalent to an emission of 15 tCO_2.

Scenario 3. with mechanical ventilation and 5 air renewals per hour at 26° C

As a fourth scenario, the model considers 26 degrees set temperature, a ventilation system with 5 air changes per hour. The evolution of the temperature inside the classroom and the electrical consumption of the air conditioning equipment is shown in Image 7 and Table 5.

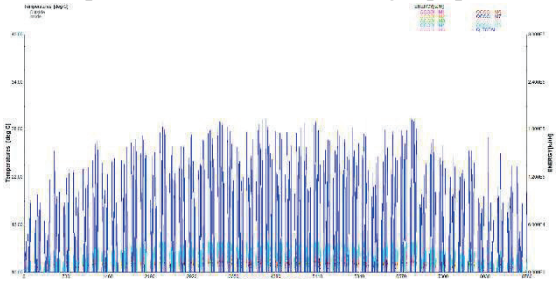


Imagen 7. Evolución anual de la temperatura y del consumo eléctrico en el aula en escenario 3. Fuente: Elaboración propia./ Image 7. Evolution of temperature and electricity consumption in the classroom in scenario 3. Source: Own elaboration

Tabla 5. Consumo energético, emisiones tCO_2 y costes anuales proyectados por la simulación generada para el escenario 3
Table 5. Annual Energy consumption, tCO2 emissions and costs projected by the simulation generated for scenario 3

ESCENARIO 3 a 26°C Con ventilación y 5 renovaciones/hr. / SCENARIO 3 at 26°C With ventilation and 5 air renewals/hr	
MWh eléctricos / Electric MWh	36.66
tCO_2	16.00
Coste / Cost (K€)	2.51

In scenario 3 it is observed that electricity consumption is slightly less compared to the base scenario. The annual electricity consumption in the air conditioning of 36.66 MWh and emissions of 16 tCO_2.

Escenario 2. Sin ventilación a 26°C
Como escenario base se considera en el modelo, 26 grados de temperatura de consigna, no existe ventilación y hay una infiltración reducida a 0.1/h . La evolución de la temperatura en el interior del aula y el consumo eléctrico del equipo de aire acondicionado se muestra en la Imagen 6 y la Tabla 4. En el escenario 2 podemos notar que el consumo eléctrico es considerablemente menor respecto al escenario base. El consumo anual de electricidad en el aire acondicionado de 34.69 MWh equivalente a una emisión de 15 tCO_2.

Escenario 3. con ventilación mecánica y 5 renovaciones por hora a 26° C
Como cuarto escenario se considera en el modelo, 26 grados de temperatura de consigna, un sistema de ventilación con 5 renovaciones de aire por hora . La evolución de la temperatura en el interior del aula y el consumo eléctrico del equipo de aire acondicionado se muestra en la Imagen 7 y la Tabla 5. En el escenario 3 se observa que el consumo eléctrico es ligeramente menor respecto al escenario base. El consumo anual de electricidad en el aire acondicionado de 36.66 MWh equivalente a una emisión de 16 tCO_2.

Resultados / Results

La Tabla 6 muestra las variaciones anuales en el consumo de electricidad, las emisiones emitadas y el ahorro económico en la factura de consumo eléctrico.

Table 6 shows the annual variations in electricity consumption, emissions emitted and economic savings on the electricity consumption bill.

Tabla 6. Ahorro energético, económico y ambiental en los escenarios simulados en comparación con el escenario base
Table 6. Energy, economic and environmental savings in the simulated scenarios compared to the base scenario

Ahorros / Savings	Escenario base / Base Scenario	Escenario 1 / Scenario 1	Escenario 2 / Scenario 2	Escenario 3 / Scenario 3
MWh	47.48	11.48	-34.69	-36.66
tCO_2	20.8	5	-15	-16
Factura / Bill (€)	3,251	786	-875	-741

Considerando las comparaciones de los 3 escenarios simulados con el escenario base, vemos que el Escenario 1 refleja un incremento tanto en el consumo de energía como en las emisiones de tCO_2, en lugar de ahorros, lo que lleva a un aumento en los costos de facturación. Desde una perspectiva de ahorro, el escenario 3 en la mejor opción, ya que nos proporciona resultados energéticos y ahorros económicos incluida la reducción de emisionesde tCO_2, con un mayor confort térmico a los ocupantes tomando en cuenta la recomendación de la norma NOM-001-STPS-2008 y reduciendo así las emisiones de carbono generados por el consumo eléctrico de las unidades de aire acondicionado.

Considering the comparisons of the 3 simulated scenarios with the base scenario, we see that Scenario 1 reflects an increase in both energy consumption and tCO2 emissions, instead of savings, leading to an increase in billing costs . From a savings perspective, scenario 3 is the best option, since it provides us with energy results and economic savings, including the reduction of emissions. tCO_2, with greater thermal comfort for the occupants taking into account the recommendation of the NOM-001-STPS-2008 standard and thus reducing the carbon emissions generated by the electrical consumption of the air conditioning units.

Conclusiones / Conclusions

En el TecNM campus Boca del Río, se plantean desafíos importantes en términos de una adecuada ventilación interior de las aulas. El consumo de energía generado por el uso de unidades de aire acondicionado es alto en el campus y la instalación de un sistema de ventilación mecánico con extractores proporcionará la reducción de costes energéticos y el confort necesario.

At the TecNM Boca del Río campus, important challenges arise in terms of adequate interior ventilation of the classrooms. The energy consumption generated by the use of air conditioning units is high on campus and the installation of a mechanical ventilation system with extractors will provide the reduction of energy costs and the necessary comfort.

Agradecimientos
Este trabajo ha sido realizado dentro del marco del proyecto de investigación "Energy Transition Audits towards Decarbonization' — 'EnTRAINER" (Referencia: LIFE21-CET-AUDITS EnTRAINER/101076424) del Programa LIFE de la Unión Europea.

Acknowledgment
This work has been carried out within the framework of the research project "Energy Transition Audits towards Decarbonization' — 'EnTRAINER" (Contract Ref: LIFE21-CET-AUDITS EnTRAINER/101076424) of the European Union's LIFE Framework Program.

BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

- SENER. (2024). Informe de actividades de la CONUEE 2023. Disponible en página web: https://www.gob.mx/conuee/documentos/informe-de-actividades-de-la-conuee-2023
- CONAGUA. (2024). Comisión Nacional del Agua Estaciones Meteorológicas Automáticas. Disponible en página web: https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s
- Escrivá-Escrivá, G., Álvarez-Bel, C., & Valencia-Salazar, I. (2010). Method for modelling space conditioning aggregated daily load curves: Application to a university building. Energy and Buildings. 42(8), 1275-1282. Disponible en Página web: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778810000514
- Peñalvo-López, E., Escrivá-Escrivá, G., & Álvarez-Bel, C. (2011). Nuevos índices para evaluar la eficiencia energética de los edificios en su fase de uso. Energía y Edificación, 43(2-3), 476-484. Disponible en página web: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.10.012
- Rodríguez, J. M. A. (2018). Análisis de la eficiencia energética en edificación mediante técnicas de simulación térmica de edificios e interpolación avanzada de datos meteorológicos (Doctoral dissertation, Universidade de Vigo). Disponible en página web: https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=150518
- Secretaría del Trabajo y Previsión Social. (2008). NOM-001-STPS-2008 Edificios, locales, instalaciones y áreas en los centros de trabajo-Condiciones de seguridad. Disponible en página web: https://asinom.stps.gob.mx/upload/noms/Nom-001.pdf
- SEMARNAT. (2024, 2 29). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional 2019. Disponible en págida web: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/896217/aviso_fesen_2023.pdf
- TecNM. (s. f.-b). TECNM | Tecnológico Nacional de México. TecNM. (2024). Breve historia de los Institutos Tecnológicos. Disponible en página web: https://www.tecnm.mx/?vista=Historia#:~:text=El%20Tecnol%C3%B3gico%20Nacional%20de%20M%C3%A9xico%20est%C3%A1%20constituido%20por%20254%20instituciones,Investigaci%C3%B3n%20y%20Docencia%20en%20Educaci%C3%B3n
- TecNM. (s. f.). TECNM | Instituto Tecnológico de Boca del Río. (2024).TecNM. Informe de rendición de cuentas 2023, P. 81. Disponible en página web: https://bdelrio.tecnm.mx/transparencia/IRC/IRC_2023.pdf
- Torres, J.L. (2010). Climatización considerando el ahorro de energía y confort térmico de las personas en ambientes dedicados a tareas de oficina. Universidad Tecnológica Nacional. Santa Fe, Argentina.
- Torres-Ramírez, B. (2019). La participación de México en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Foro Internacional, 59(3-4), 1179–1219. https://doi.org/10.24201/fi.v59i3-4.2656
- Valencia-Salazar, I., Peñalvo-López, E., Montañana-Romeu, J., & León-Martínez, V. (2021). El COVID-19, la normativa de ventilación y su impacto ambiental en las universidades en México. In Book of abstracts. I international conference sustainable construction and demolition (pp. 71-82). Área de Innovación y Desarrollo, SL. Disponible en página web: https://riunet.upv.es/handle/10251/190680

CORRELAZIONE TRA CERTIFICAZIONE LEED ED EDIFICI A BASSA EMISSIONE DI CO_2e - INDICAZIONI PER UNA PROGETTAZIONE VICINA A NZC (NEAR ZERO CARBON)

CORRELATION BETWEEN LEED CERTIFICATION AND LOW CO_2e - EMISSION BUILDINGS INDICATIONS FOR NEARLY NZC (NEAR ZERO CARBON) DESIGN

Ida Severino
Dott. Ing. Edile-Architettura laureata presso la facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Salerno-Italia.
Email: ida-92@libero.it
Dr. Ing. Edile-Architecture graduated from the Faculty of Engineering, University of Salerno-Italy. Email: ida-92@libero.it

Giacomo Di Ruocco
Associate Professor in Technical Architecture and Construction Site Organization in the Department of Civil Engineering at the University of Salerno – Italy. PhD in Structural Engineering and Building and Urban Renovation. Member of the Doctoral Board in Structural Engineering, Architecture and Historical, Architectural and Landscape Heritage. E-mail: gdiruocco@unisa.it

Professore Associato di Architettura Tecnica e Organizzazione di Cantiere presso il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Salerno – Italia. Dottore di Ricerca in Ingegneria Strutturale e Edilizia, Ristrutturazione Urbana. Membro del Consiglio di Dottorato in Ingegneria delle Strutture, Architettura e Patrimonio Storico, Architettonico e Paesaggistico. Email: gdiruocco@unisa.it

Abstract
Life Cycle Assessment (LCA) is a versatile tool that can be applied in a variety of sectors, most notably in the context of sustainable building certification programmes such as LEED® (Leadership in Energy and Environmental Design). Over time, these certification schemes have evolved, incorporating innovations in the market to refine the criteria and broaden their impact.

The aim of this study is to demonstrate how the carbon emissions generated during the different phases of a building's life cycle can be effectively reduced through simulations performed using specific software, such as One Click LCA. Specifically, the LCA tool was used to evaluate the environmental performance of the "Engineering Laboratories - Spin-offs and Consortia" building (Building L7), located on the Fisciano University campus, which obtained LEED PLATINUM certification in 2015. The objective was to investigate how an example of excellent design could further improve its environmental performance through the use of advanced tools.

The analyses showed that design choices, particularly those related to the materials used, have a significant impact on achieving LEED certification. These results also provide valuable insights for the design of future buildings. More careful selection of materials and other design strategies can improve energy performance and minimise environmental impact, creating a replicable model for sustainable construction.

Today, the LEED system places increasing emphasis on integrating LCA tools into decision-making processes, promoting market transformation and improving the quality of environmental data. When used correctly, software such as One Click LCA can simplify the implementation of Near Zero Carbon Buildings (NZC) and contribute to a more sustainable built environment.

Keywords
LCA, LEED, NZC, One Click LCA, Emission building.

Introduction

The new approach to building design based on the circular economy can be applied and developed through Life Cycle Assessment (LCA). A building generates environmental impacts throughout its life cycle, and this methodology allows us to analyse and calculate the embodied carbon at each stage, from raw material extraction to demolition and material reuse. The results obtained through LCA are essential for identifying critical points of emissions and finding alternative solutions to reduce the environmental impact at each stage of the building's lifecycle.

In our study, we focused particularly on the Materials and Resources section of the LEED project checklist, as the simulation carried out with the software we used showed that the highest emissions come from phase A1-A3, the pre-production of raw materials.

This analysis highlights the need to develop a methodology that helps designers select the most appropriate materials to reduce the overall environmental impact of a building, while improving its score in various certification protocols.

For the case study, we used the One Click LCA software, which integrates data from almost all available Environmental Product Declaration (EPD) platforms worldwide. Where site-specific EPDs are not available, the software provides average values specific to the country of analysis or, alternatively, generic data.

Materials selection has been guided by this software, which allows the comparison of multiple design options within the same project. This approach makes it possible to generate more sustainable alternatives by simply replacing materials with those with better environmental characteristics, with the aim of minimising residual emissions. Finally, we proposed some strategies to offset the remaining emissions, with the aim of achieving the ambitious target of Near Zero Carbon (NZC).

Method

The integration of Life Cycle Assessment (LCA) into sustainability assessment systems is a relatively new topic and still underexplored in the scientific literature. A comparison of the implementation of LCA in major certification systems such as LEED, DGNB and Green Globes reveals significant methodological differences, particularly in terms of objectives, scope of analysis and reference periods. Furthermore, the uptake of LCA within these certification systems remains limited due to the challenges of standardisation and the complexity of integrating it consistently across different protocols.

In the case of the project we analysed, which was classified as LEED Platinum, it is important to note that at the time of its design (completed in December 2015), only a small number of buildings held this certification, as LEED Italy was still in its infancy (launched in 2006). As a result, the integration of the LCA methodology was not a standard practice at that time.

Our methodological approach is divided into five phases, as outlined below:

$$W = A^{[-\%]} + B^{[-\%]} + C^{[-\%]} + D^{[-\%]} + E^{[-\%]}$$

W = Optimal modelling obtained by applying all four phases of the model.

A = Initial phase in which some of the materials used have been replaced with virgin materials that release fewer kg of CO2e in their production chain, while maintaining the same technical characteristics as the initial project.

B = In this phase, the existing materials have been replaced, where possible, by materials produced with the highest possible amount of recycled or reused raw materials.

C = The energy profile has been modified to bring it into line with the latest profile.

D = Finally, the use of more durable materials has been hypothesised, influencing phase B4-B5, which concerns the replacement or renovation of building components.

E = Compensation of the remaining tariff.

Applicazione del Software One Click LCA

Nel nostro caso, il progetto iniziale era già ottimizzato dal punto di vista della progettazione edilizia e dell'utilizzo di innovazioni impiantistiche, aspetti che non abbiamo preso in considerazione nel nostro studio.

La procedura di analisi inizia con la configurazione del progetto e la definizione della sua localizzazione, seguita dalla creazione del design all'interno del progetto stesso, durante la quale vengono impostati i parametri per il ciclo di vita dell'edificio.

Fase 1: Inserimento dei Materiali da Costruzione (Fasi A1-A3). Per ciascun materiale utilizzato nel progetto, sono state selezionate le EPD (Dichiarazioni Ambientali di Prodotto) più verosimili e disponibili, basandoci sulle normative italiane, che non obbligano la presenza di EPD per i materiali impiegati nella costruzione di un edificio. Laddove non disponibili, sono stati utilizzati dati di impatto ambientale derivanti da fonti generali.

Fase 2: Consumo di energia (Fase B6). È stato inserito un valore annuale di consumo energetico, che è stato poi moltiplicato per il periodo di calcolo (generalmente 60 anni). Lo stesso approccio è stato applicato al consumo di acqua (Fase B7). Tuttavia, nel nostro caso, il consumo idrico non è stato considerato rilevante ai fini della valutazione, quindi non è stato incluso.

Fase 3: Operazioni di cantiere (Fase A5). Per questa fase, è stato possibile utilizzare uno scenario di impatto medio delle operazioni di cantiere, definito in base alla superficie lorda edificabile dell'edificio analizzato.

Fase 4: Periodo di calcolo. È stato definito un periodo di vita utile dell'edificio, normalmente stimato in 60 anni, che costituisce il periodo di riferimento per l'analisi LCA.

Fase 5: Emissioni e rimozioni. In questa fase, avremmo dovuto considerare eventuali perdite di refrigerante, carbonizzazione e prelievi di carbonio dalla vegetazione. Tuttavia, nel caso studio in esame, non erano disponibili dati pertinenti, quindi questi aspetti sono stati esclusi dall'analisi.

Infine, è stata considerata l'area edificabile.

Una volta completato l'inserimento di tutte le informazioni richieste dal software, è stato possibile visualizzare i risultati, che riflettono il contributo dell'edificio in ciascuna delle categorie di impatto analizzate. Di seguito sono riportati i grafici restituiti dal software in relazione allo stato di fatto.

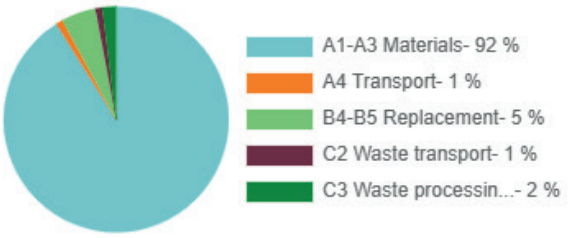


Figura 1 Carbonio incorporato per fase del ciclo di vita dello stato di fatto

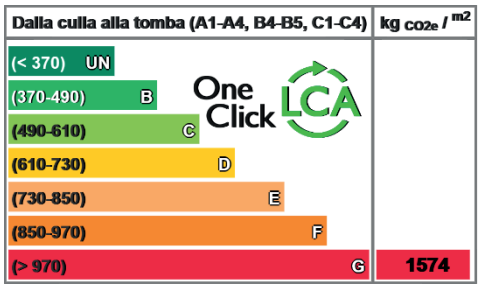


Figura 2 Punto di riferimento del carbonio incorporato in Italia per tutte le tipologie edilizie 2023 relativo allo stato di fatto

I valori vengono calcolati per un periodo predefinito di 60 anni, al fine di garantire che i risultati possano essere confrontati con quelli del benchmark, un'analisi comparativa che mette a confronto il carbonio incorporato di migliaia di edifici che hanno utilizzato One Click LCA.

Il range di valutazione è suddiviso in sette bande, equamente distribuite: la media dei risultati rientra nella fascia "D", mentre gli estremi inferiore e superiore dell'intervallo sono rispettivamente rappresentati dalle fasce "A" e "G". Nel nostro caso, sono stati utilizzati benchmark specifici per l'Italia.

Grazie a una nuova funzionalità del software, è possibile ottenere un modello semplificato del progetto in 3D, che mostra in modo chiaro quanto ciascuna componente dell'edificio contribuisce alle emissioni totali.

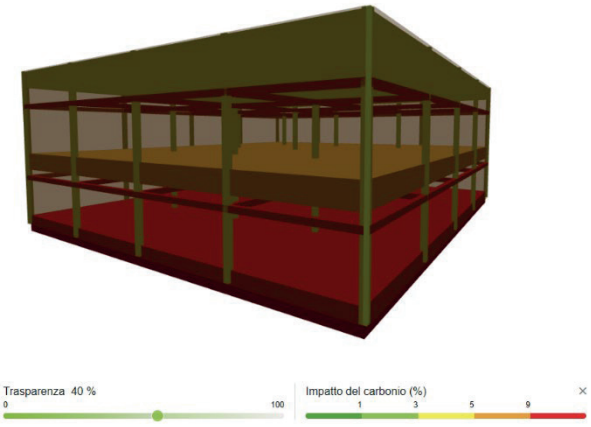


Figura 3 Modellazione dello Stato di fatto dell'edificio L7 tramite Carbon Designer 3D

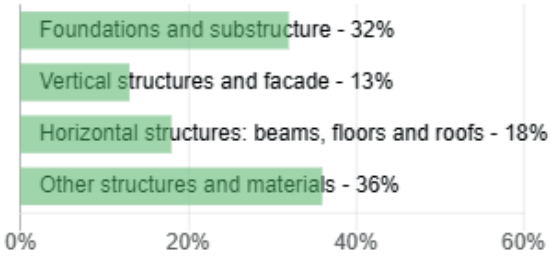


Figura 4 Emissioni in percentuali suddivise per componenti edilizie relative allo stato di fatto

Tramite questo strumento possiamo ottenere una restituzione visiva delle componenti del progetto che risentono maggiormente dell'impatto e decidere su quali elementi intervenire con maggiore intensità.

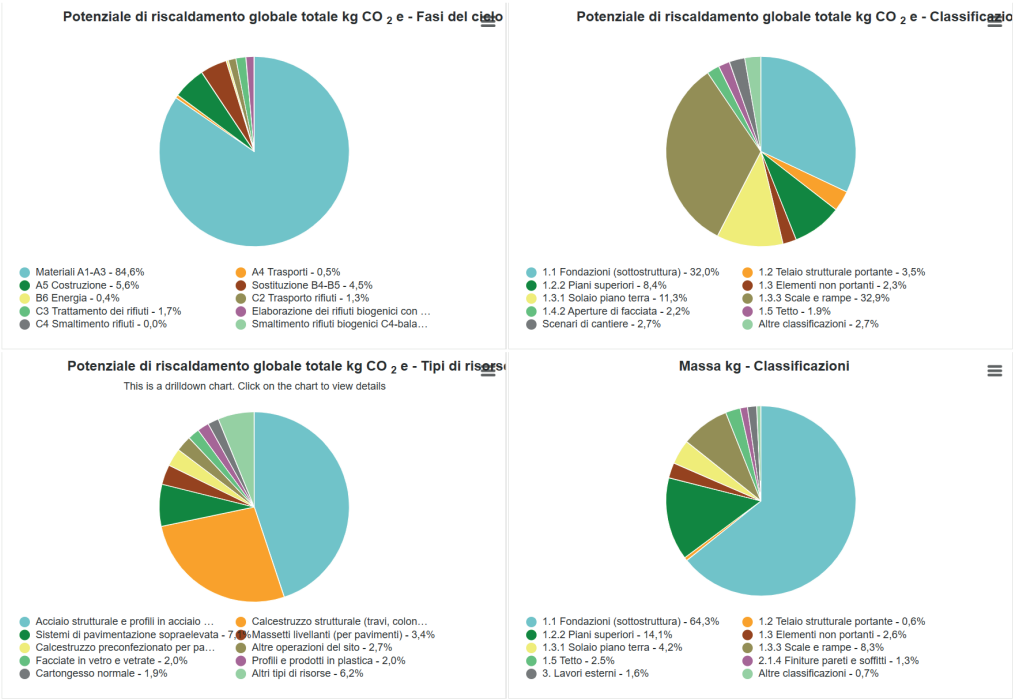


Figura 5 Screen del software One Click LCA dove vengono riportati i valori del ciclo di vita del potenziale riscaldamento globale totale

Application of the One Click LCA Software

In our case, the initial design was already optimized from the perspective of architectural design and the use of innovative building systems, aspects that were not considered in our study.

The analysis procedure begins with the configuration of the project and the definition of its location, followed by the creation of the design within the project, during which the life cycle parameters of the building are set.

Phase 1: Input of Construction Materials (Phases A1-A3). For each material used in the project, the most accurate and available Environmental Product Declarations (EPD) were selected, based on Italian regulations, which do not require the presence of EPDs for materials used in building construction. Where EPDs were not available, environmental impact data from general sources were used.

Phase 2: Energy Consumption (Phase B6). An annual energy consumption value was input, which was then multiplied by the calculation period (usually 60 years). The same approach was applied to water consumption (Phase B7). However, in our case, water consumption was not considered relevant for the assessment, so it was excluded.

Phase 3: Construction Operations (Phase A5). For this phase, an average impact scenario for construction operations was used, defined based on the gross building area of the analyzed building.

Phase 4: Calculation Period. The building's expected service life was defined, normally estimated at 60 years, which constitutes the reference period for the LCA analysis.

Phase 5: Emissions and Removals. In this phase, we should have considered potential refrigerant losses, carbonation, and carbon removals from vegetation. However, in the case study examined, no relevant data were available, so these aspects were excluded from the analysis.

Finally, the building area was considered.

Once all the required information was entered into the software, it was possible to view the results, which reflect the building's contribution in each of the analyzed impact categories. Below are the graphs provided by the software, showing the current status.

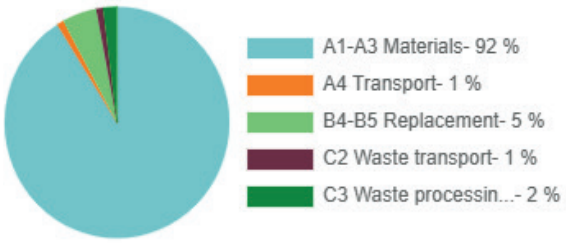


Figure 1 Embodied carbon by phase of the state life cycle

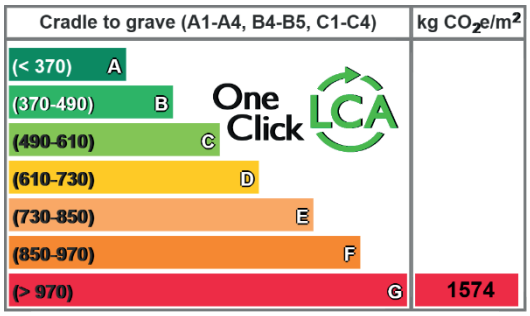


Figure 2 Embodied carbon baseline in Italy for all building types 2023 relative to the actual state

The values are calculated for a predefined period of 60 years to ensure that the results can be compared with those of the benchmark, a comparative analysis that compares the embodied carbon of thousands of buildings using One Click LCA.

The assessment range is divided into seven equally spaced bands: the average of the results falls into band 'D', while the lower and upper extremes of the range are bands 'A' and 'G' respectively. In our case, specific benchmarks for Italy were used.

Thanks to a new software feature, it is possible to obtain a simplified 3D model of the project, which clearly shows how much each building component contributes to the total emissions.

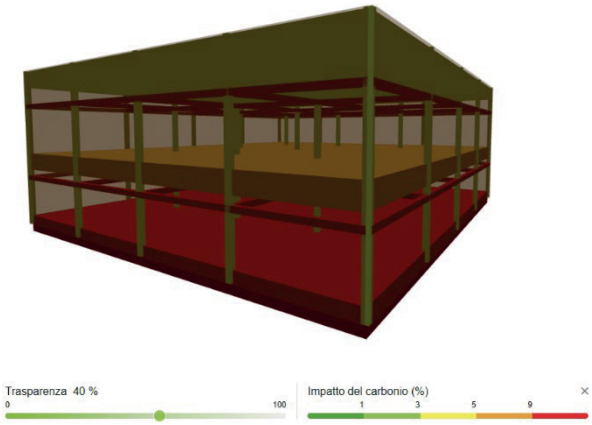


Figure 3 State-of-the-art modelling of the L7 building using Carbon Designer 3D

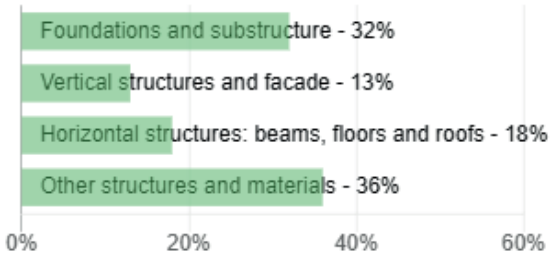


Figure 4 Emissions in percentages broken down by building components relative to the state of affairs

With this tool we can get a visual representation of the project components most affected by the impact and decide which elements to intervene on most intensively.

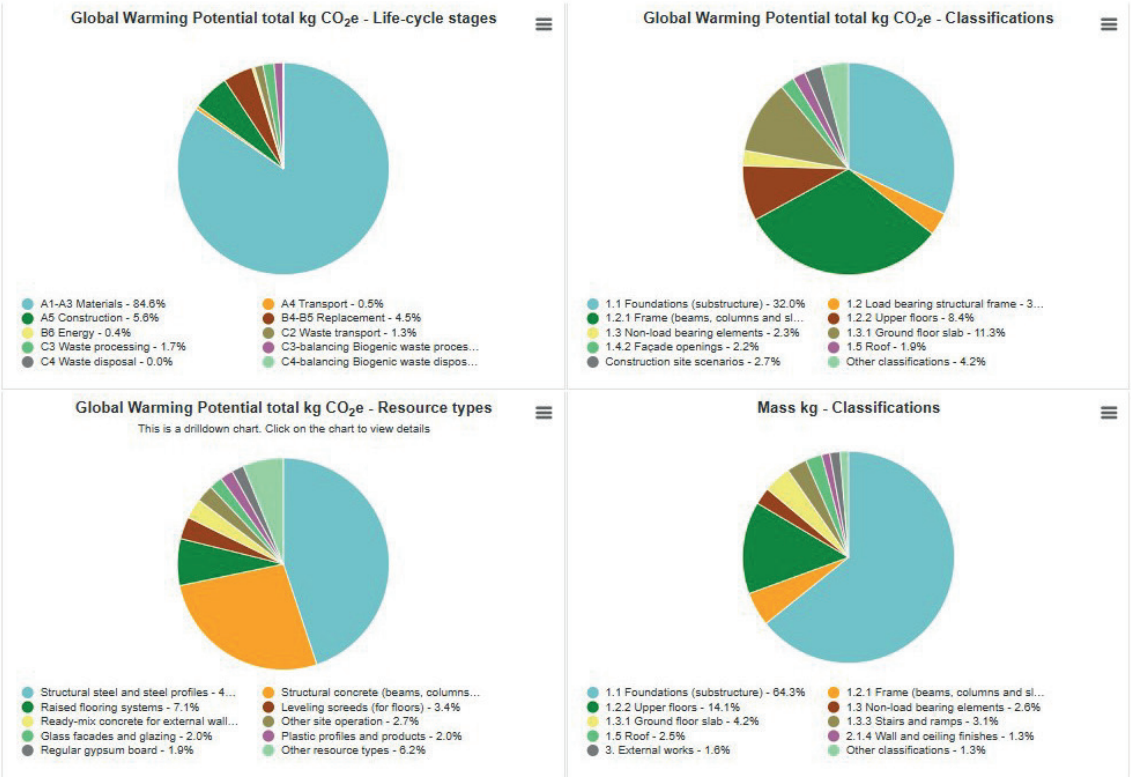


Figure 5 Screen of the One Click LCA software where the life cycle values of the total global warming potential

Risultati dell'applicazione del metodo

Osservando la differenza tra lo stato attuale e il risultato dell'applicazione del metodo, possiamo apprezzarne l'impatto visivo sulla scelta guidata dei materiali tramite l'utilizzo del software per la riduzione dell'impatto ambientale globale.

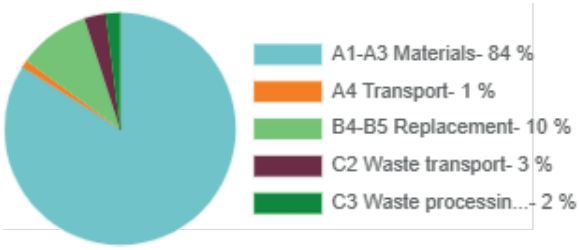


Figura 6 Carbonio incorporato per fasi del ciclo di vita per il modello ottimizzato

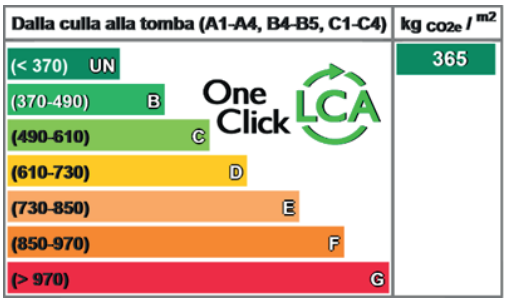


Figura 7 Punto di riferimento del carbonio incorporato in Italia per tutte le tipologie edilizie 2023 per il modello ottimizzato

Modello	Valori di CO2e (kg)	Percentuali di riduzione
Stato di fatto	2 303 012	
Fase A: Materiali vergini con minori emissioni in fase di produzione	1 5030 183	-33,60%
Fase B: Materiali prodotti con materie prime riciclate	623 121	-59,30%
Fase C: Modifica del profilo energetico	623 879	(+) 0,1%
Fase D: Materiali più durevoli	545 953	-12,50%
Riduzione data dalle scelte differenti dei materiali guidati dal software		-76,29%

Tab. 1 Tabella Riassuntiva dei risultati ottenuti dall'applicazione del metodo

Livello di valutazione del ciclo di vita – Tutte le categorie di impatto

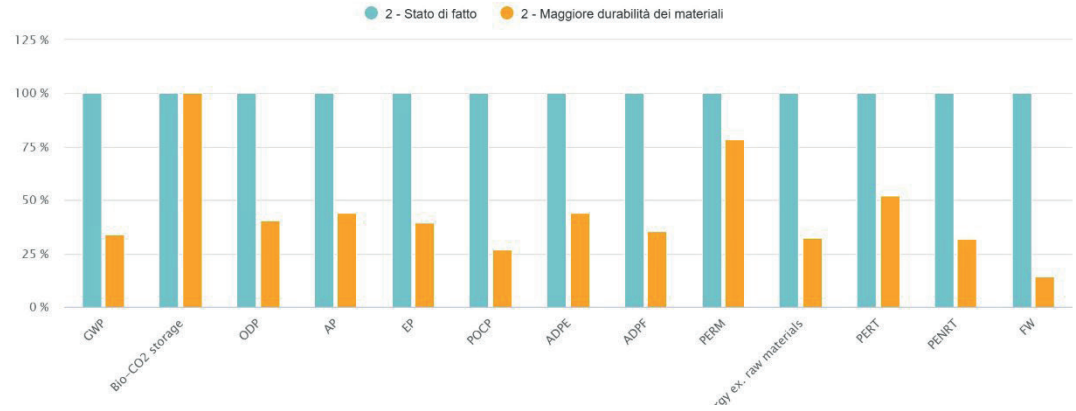


Figura 2 Software One Click LCA: comparazione dello Stato finale al risultato dell'applicazione del modello

Dall'applicazione delle prime quattro fasi della modellazione, abbiamo ottenuto un'aliquota residua di 546 tonnellate di CO_2e. Pertanto, possiamo considerare diverse opzioni per compensare queste emissioni e raggiungere il nostro obiettivo di Near Zero Carbon (NZC).

Tra le possibili soluzioni, una potrebbe essere l'uso del legno, un materiale naturalmente sequestratore di CO_2. Tuttavia, per ottenere risultati significativi, le modifiche dovrebbero essere integrate fin dalla fase di progettazione dell'edificio.

Un'altra strategia utile potrebbe essere l'introduzione di vegetazione. Tutte le piante, attraverso il processo di fotosintesi, assorbono una certa quantità di CO_2 e rilasciano ossigeno. Alcune specie, però, sono particolarmente efficienti nel catturare anidride carbonica rispetto ad altre, e il loro inserimento potrebbe contribuire significativamente alla riduzione delle emissioni residue.

Results of Method Application

By comparing the current state with the results of applying the method, we can clearly observe the visual impact of the guided material selection process through the use of software aimed at reducing the overall environmental impact.

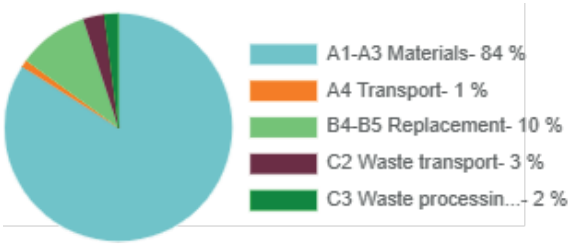


Figure 6 Embodied carbon by life cycle stages for the optimised model

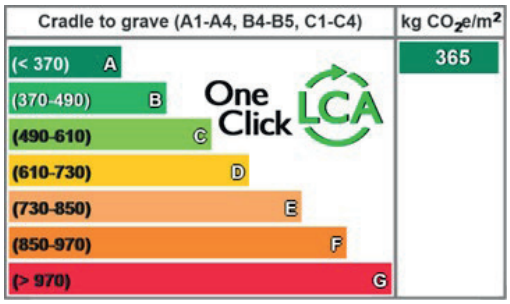


Figure 7 Embodied carbon benchmark in Italy for all building types 2023 for the optimised model

Model	Values of CO2e (kg)	Reduction percentages
State of fact	2 303 012	
Phase A: Virgin materials with lower production emissions	1 5030 183	-33,60%
Phase B: Materials produced from recycled raw materials	623 121	-59,30%
Phase C: Changing the energy profile	623 879	(+) 0,1%
Phase D: More durable materials	545 953	-12,50%
Reduction due to different software-driven material choices		-76,29%

Tab. 1 Summary table of results obtained from the application of the method

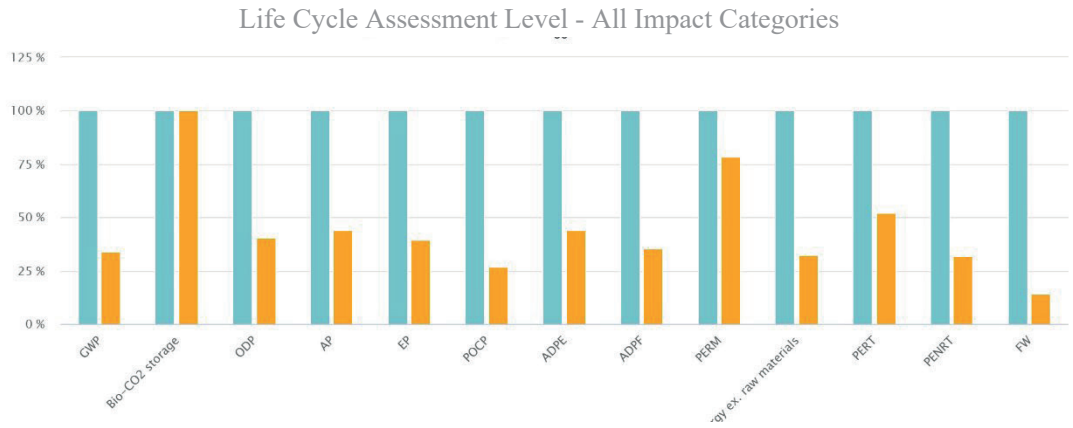


Figure 2 One Click LCA Software: Comparison of End-State to Model Application Result

From the application of the first four modelling steps, we obtained a residual rate of 546 tonnes CO_2e. Therefore, we can consider several options to offset these emissions and achieve our Near Zero Carbon (NZC) goal.

Among possible solutions, one could be the use of wood, a naturally CO_2 sequestering material. However, in order to achieve significant results, changes would have to be incorporated right from the design phase of the building.

Another useful strategy could be the introduction of vegetation. All plants, through the process of photosynthesis, absorb a certain amount of CO_2 and release oxygen. Some species, however, are particularly efficient at capturing carbon dioxide than others, and their inclusion could contribute significantly to reducing residual emissions.

Conclusioni e prospettive future

La metodologia applicata e l'utilizzo del software One Click LCA ci ha permesso:

- Confrontare facilmente materiali diversi per lo stesso edificio
- Verificare quanto l'utilizzo di materiali riciclati o riutilizzati influisce sulle emissioni globali dell'edificio
- Constatare l'importanza della durabilità nella scelta dei materiali
- Evidenziare come le metodologie vanno tarate in funzione delle innovazioni tecnologiche e dei nuovi materiali.

L'analisi svolta rimane tuttavia un modello poiché, pur rimanendo, per quanto è possibile, fedeli alla realtà, mancavano delle informazioni che hanno influenzato il calcolo del software. La mancanza delle EPD specifiche, per la loro importanza sull'intera analisi del ciclo vita ne pregiudica l'accuratezza. Bisogna sottolineare la facilità d'uso, l'accessibilità e la flessibilità del software, che, se utilizzato in tutte le sue potenzialità, può essere un elemento di aiuto fondamentale alla progettazione sostenibile.
Infine, ancora poco spazio è stato dato alla progettazione nata allo scopo del riutilizzo. Nel quadro normativo vigente si dà ampio spazio al conteggio delle emissioni di carbonio dei materiali utilizzati, il riutilizzo di materiali permette di ridurre notevolmente le emissioni date dalla produzione, ma non c'è modo di conteggiare il risparmio che si otterrà nei futuri progetti per l'utilizzo dei materiali ricavati dall'edificio che si sta progettando, pur essendo presente nei CAM (criteri ambientali minimi) molte prescrizioni al riguardo.

Conclusions and future prospects

The methodology applied and the use of the One Click LCA software allowed us to

- Easily compare different materials for the same building
- Verify how the use of recycled or reused materials affects the building's overall emissions
- Establish the importance of durability in the choice of materials
- Highlight how methodologies need to be calibrated according to technological innovations and new materials.

However, the analysis carried out remains a model since, while remaining true to reality as far as possible, it lacked information that influenced the software's calculation. The lack of specific EPDs, due to their importance on the entire life cycle analysis, impairs its accuracy. It is worth emphasising the ease of use, accessibility and flexibility of the software, which, if used to its full potential, can be a fundamental aid to sustainable design.

Finally, little space has yet been given to design for re-use. In the current regulatory framework, ample space is given to counting the carbon emissions of the materials used, the reuse of materials makes it possible to considerably reduce the emissions given by production, but there is no way to count the savings that will be obtained in future projects for the use of the materials obtained from the building being designed, even though there are many prescriptions in this regard in the CAM (minimum environmental criteria).

ARCHITETTURA CARBON NEUTRAL: METODO LCA "DALLA CULLA ALLA CULLA" PER LA PROGETTAZIONE A "ZERO EMISSIONI" DEGLI EDIFICI IN LEGNO.

CARBON NEUTRAL ARCHITECTURE: LCA METHOD "FROM THE CRADLE TO THE CRADLE" FOR THE "ZERO EMISSIONS" DESIGN OF TIMBER BUILDINGS.

Ludovica Amorelli

Dott.ssa in ingegneria edile architettura presso l'Università degli studi di Salerno, Via Giovanni Paolo II, 132, 84084 Fisciano SA – Italy. Email ludoam95@gmail.com

Doctor of architectural engineering at the University of Salerno, Via Giovanni Paolo II, 132, 84084 Fisciano SA – Italy. Email ludoam95@gmail.com

Giacomo Di Ruocco

Professore Associato in Architettura Tecnica e Organizzazione di Cantiere presso il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Salerno – Italia. Dottorato di ricerca in Ingegneria Strutturale e Riqualificazione Edilizia e Urbana. Membro del Collegio dei Dottorati in Ingegneria Strutturale, Architettura e Beni Storici, Architettonici e Paesaggistici. E-mail: gdiruocco@unisa.it

Associate Professor in Technical Architecture and Construction Site Organization in the Department of Civil Engineering at the University of Salerno – Italy. PhD in Structural Engineering and Building and Urban Renovation. Member of the Doctoral Board in Structural Engineering, Architecture and Historical, Architectural and Landscape Heritage. E-mail: gdiruocco@unisa.it

Abstract

The research aims to investigate the potential of using wood in the construction industry, a natural and renewable raw material, whose main property is CO2 storage, as it consists of half carbon: one m3 of wood absorbs about one ton of CO2. Therefore, if wood is used as a building material or wood product, the carbon remains absorbed for the entire life of the product.

A first phase will be addressed relating to practical work in which a methodology structured according to the LCA approach (UNI EN 15978:2011) will be outlined, with particular reference to the C2C phase (from Cradle to Cradle), with the aim of eliminating emissions from buildings with a predominantly timber construction system. A model will therefore be developed that provides, with respect to an initial data, appropriate strategic actions for the reduction of the quantity of emissions, estimated by incidence of "carbon credit" for each phase of the life cycle.

The methodological approach outlined in the first phase will be applied to two timber buildings (completed works) with two different construction systems: a load-bearing structure in CLT panels and a framed laminated timber structure. In the third and final phase, an analysis and careful processing of the results obtained will follow. The aim of this thesis is to highlight the potential of timber construction systems, of their profitable and conscious use, whose primary objective is the elimination of greenhouse gas emissions, in the perspective of total emission neutrality.

Keywords

LCA methodology, reversibility, reused materials, timber buildings, circular economy.

Introduction

The construction sector represents one of the main challenges for environmental sustainability of our time. According to the Global Alliance for Buildings and Construction report, the construction sector is responsible for 36% of global greenhouse gas emissions, a figure that highlights the urgency of rethinking the construction approach to reduce environmental impact. With the world's building stock set to double by 2060, it is essential to intervene on emissions already in the initial phase of buildings, adopting materials and techniques that promote decarbonization. Ambitious goals have been set at international and European levels to address the problem. The European Commission, in particular, aims to reduce emissions by 55% by 2030 compared to 1990 levels, to achieve complete carbon neutrality by 2050. The measures proposed include policies to improve the energy efficiency of buildings and reduce emissions from construction materials. In this context, timber emerges as a promising solution: a natural and renewable material capable of storing carbon dioxide, thus contributing to the reduction of emissions throughout the cycle.

This research aims to explore the potential of timber as a sustainable construction material, analyzing its environmental impact through a methodological approach based on life cycle analysis (LCA). The main objective is to evaluate the ability of timber to contribute to the decarbonization of the construction sector, with particular attention to the "cradle to cradle" (C2C) phase. Through the application of the methodology to two buildings made with timber construction systems (CLT and framed glulam), we intend to demonstrate how a conscious and strategic use of this material can represent a valid response to global challenges related to climate change and environmental sustainability.

Dalla culla alla culla

Il concetto di "dalla culla alla culla" (Cradle to Cradle) è un approccio di sostenibilità che promuove un'economia circolare, progettando prodotti in modo che, al termine del loro ciclo di vita, possano essere completamente riciclati o compostati, evitando sprechi e minimizzando l'impatto ambientale. Ideato da McDonough e Braungart, si basa su tre principi fondamentali: considerare ogni risorsa come riutilizzabile, utilizzare energia rinnovabile e rispettare la biodiversità. Parallelamente, gli indicatori di energia e carbonio incorporati (Embodied Energy ed Embodied Carbon) valutano l'impatto ambientale dell'intero ciclo di vita dei materiali, dalla fase di estrazione fino alla dismissione. La maggior parte degli impatti deriva dalla produzione (fase Cradle-to-Gate), mentre trasporto, demolizione e gestione dei rifiuti incidono marginalmente. Per raggiungere la neutralità carbonica, è essenziale combinare progettazione passiva, uso di fonti rinnovabili e riutilizzo di strutture esistenti, riducendo al minimo sia l'energia operativa (Operational Energy) che le emissioni associate.

Cradle to Cradle

The concept of "from cradle to cradle" (Cradle to Cradle) is a sustainability approach that promotes a circular economy, designing products so that, at the end of their life cycle, they can be completely recycled or composted, avoiding waste and minimizing environmental impact. Devised by McDonough and Braungart, it is based on three fundamental principles: considering every resource as reusable, using renewable energy and respecting biodiversity. In parallel, the indicators of energy and embodied carbon (Embodied Energy and Embodied Carbon) evaluate the environmental impact of the entire life cycle of materials, from extraction to disposal. Most of the impacts come from production (Cradle-to-Gate phase), while transport, demolition and waste management have a marginal impact. To achieve carbon neutrality, it is essential to combine passive design, use of renewable sources and reuse of existing structures, minimizing both operational energy (Operational Energy) and associated emissions.

Metodologia

1)Definizione dell'ambito di indagine:

Basandosi sulla norma europea BS EN 15978:2001, l'analisi riguarda l'impatto ambientale (emissioni di CO2) della fase di fine vita dei sistemi costruttivi in legno, includendo:

Modulo C (fine vita), suddiviso in:

C1: Demolizione

C2: Trasporto rifiuti

C3: Trattamento rifiuti per riciclo/riuso

C4: Smaltimento rifiuti

Modulo D: Benefici e carichi legati al riuso e riciclo potenziale.

2)Caratterizzazione tecnologica dell'opera:

Basata sulla norma UNI 8290-1:1981, divide l'edificio in unità tecnologiche (struttura portante, fondazione, chiusure, partizioni interne/esterne, ecc.) e nei relativi elementi tecnici.

3)Stima delle emissioni di CO2:

Le emissioni sono calcolate come somma di cinque componenti: demolizione, sfridi, trasporto, trasformazione, e credito di stoccaggio CO2 nel materiale.

$$\Sigma\ CO2 = CO2{,}1 + CO2{,}2 + CO2{,}3 + CO2{,}4 + CO2{,}5$$

4)Valutazione del livello di disassemblabilità (LID):

Utilizzando la norma UNI 11277:2008 e un metodo integrato, si calcola la capacità dei materiali di essere smontati e riutilizzati. Si considerano parametri come tecnologia di posa, danni da trasporto e trasformazioni, assegnando punteggi (LID) basati su potenzialità di recupero e pesi specifici.

$$LID = \Sigma\ \text{potenzialità di recupero(indicatore i-esimo)} \quad x \quad \text{peso(indicatore i-esimo)}$$

Sistema costruttivo	*Tecnologia di posa in opera*	*LID*
Sistema "a umido"	Legati idraulici e aerei	0
Sistema "adesivo"	Adesivi a fusione, a reazione chimica, ad evaporazione	0
Sistema "a secco" con tecnica "a serraggio"	Chiodature, bullonature, avvitature, rivettature	3
Sistema "a secco" con tecnica "a incastro"	Incastri a scatto e/o tipo maschio-femmina	3
Sistema "a secco" con tecnica "ad accostamento"	Semplice sovrapposizione	5

METODO UNI 11277:2008

Sistema costruttivo e tecnologia di posa in opera	p = 0,60	Danni movimentazione e trasporto	p = 0,20	Attività di trasformazione	p = 0,20	LID
Sistema "a umido" - leganti idraulici e aerei	0%	Elementi fragili, alta probabilità di danneggiamento	20%	Non riutilizzabilità	0%	
Sistema "adesivo" - adesivi a fusione, a reazione chimica e a evaporazione	25%	Trasporto al suolo e caricamento su autoarticolato con autogrù, L > 14m	40%	Taglio di parti forate provocate da unioni avvitate, chiodate	25%	
Sistema assemblato "a secco" con tecnica "a serraggio" - chiodature	50%	Trasporto al suolo e caricamento su autoarticolato con autogrù, L < 14m	60%	Piallatura	50%	
Sistema assemblato "a secco" con tecnica "a serraggio" - bullonature e avvitature	75%	Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento	80%	Trattamento impregnante a spruzzo	75%	
Sistema assemblato "a secco" con tecnica "a incastro" e "ad accostamento" - incastro a scatto e semplice sovrapposizione	100%	Trasporto manuale	100%	Pulitura generale	100%	

METODO SPERIMENTALE INTEGRATO

5)Stima di rifiuti e verifica parametri CAM:

Classificazione e destinazione dei rifiuti (riutilizzo, riciclo, smaltimento) tramite il Codice Europeo dei Rifiuti (CER), distinguendo tra materiali pericolosi e non pericolosi, secondo la Direttiva 2008/98/CE e il DM 11/10/2017.

Methodology

1) Definition of the scope of investigation:

Based on the European standard BS EN 15978:2001, the analysis concerns the environmental impact (CO2 emissions) of the end-of-life phase of timber construction systems, including:

Module C (end of life), divided into:

C1: Demolition

C2: Waste transport

C3: Waste treatment for recycling/reuse

C4: Waste disposal

Module D: Benefits and loads related to reuse and potential recycling.

2) Technological characterization of the work:

Based on the UNI 8290-1:1981 standard, it divides the building into technological units (load-bearing structure, foundation, closures, internal/external partitions, etc.) and the related technical elements.

3) CO2 emissions estimation:

Emissions are calculated as the sum of five components: demolition, waste, transport, transformation, and CO2 storage credit in the material.

$$\Sigma\ CO2 = CO2{,}1 + CO2{,}2 + CO2{,}3 + CO2{,}4 + CO2{,}5$$

4) Assessment of the level of disassemblability (LID):

Using the UNI 11277:2008 standard and an integrated method, the ability of materials to be dismantled and reused is calculated. Parameters such as installation technology, transport damage and transformations are considered, assigning scores (LID) based on recovery potential and specific weights.

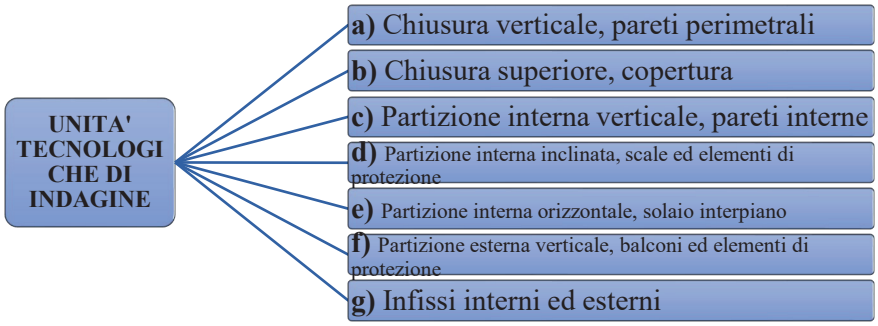
$$LID = \Sigma\ \text{recovery potential (i-th indicator) x weight (i-th indicator)}$$

5) Waste estimation and verification of CAM parameters:

Classification and destination of waste (reuse, recycling, disposal) through the European Waste Code (CER), distinguishing between hazardous and non-hazardous materials, according to Directive 2008/98/EC and Ministerial Decree 11/10/2017.

Applicazione ai casi studio

Come casi studio sono stati scelti due edifici in legno, situati in Italia, nella stessa zona climatica (zona E), con due tecnologie costruttive differenti: Villa singola (BG) con una struttura in telaio e Casa BN (PD) con una struttura in X-LAM. E' stata fatta una verifica pre- demolizione, andando a definire le varie unità tecnologiche di entrambi i casi studio.



PIANO TERRA:

Unità tecnologica / Elemento tecnico	Materiale prevalente dell'elemento tecnico	Numero elementi	Dimensioni del singolo elemento [mm]	Peso specifico [kg/m3]	Peso del singolo elemento [kg]	Peso totale [kg]
Chiusura verticale	Pannello OSB	32	1250x10x2700	600	20	640
	Traverse pilastri	32	80x140x2700	450	25	800
	Controparete	16	1250x10x2700	450	15	240
Pareti perimetrali	Fibra di legno	64	540x140x600	110	4	260
	Pannelli intelaiati	16	2700x4000	-	121	1940

PIANO TERRA:

Unità tecnologica / Elemento tecnico	Materiale prevalente dell'elemento tecnico	Numero elementi	Dimensioni del singolo elemento [mm]	Peso specifico [kg/m3]	Peso del singolo elemento [kg]	Peso totale [kg]
Chiusura verticale	Pannello XLAM 200 mm	6	16000x3000x200	510	102	612
	Pannello XLAM 180 mm	5	16000x3000x180	510	92	460
Pareti perimetrali	Pannello XLAM 160 mm	4	16000x3000x160	510	83	332

Tabella 1.1 – Esempio di partizione delle unità tecnologiche (pareti perimetrali) per entrambi i casi studio

Successivamente sono state individuate le 5 aliquote di CO2 generate da un processo di disassemblaggio e demolizione selettiva di entrambi gli edifici in legno. E' stato definito il livello di disassemblabilità applicando sia il metodo UNI 11277:2008, sia il metodo sperimentale integrato (sebbene più accurato, visto che considera anche le fasi successive allo

smontaggio, è un metodo che ha diversi margini di errore). Lo studio si conclude con la stima di generi e quantità di rifiuti, andando ad assegnare il codice europeo dei rifiuti (CER) a ciascun materiale prevalente, ai sensi della direttiva 2008/98/CE e assegnando una destinazione futura ad ogni materiale prevalente, in funzione della natura del materiale.

Application to case studies

Two timber buildings were chosen as case studies, located in Italy, in the same climate zone (zone E), with two different construction technologies: "Villa Singola" (BG) with a frame structure and "Casa BN" (PD) with a CLT structure. A pre-demolition check was carried out, defining the various technological units of both case studies.

Subsequently, the 5 rates of CO2 generated by a process of disassembly and selective demolition of both timber buildings were identified. The level of disassembly was defined by applying both the UNI 11277:2008 method and the integrated experimental method (although more accurate, since it also considers the phases following disassembly, it is a method that has different margins of error). The study concludes with the estimation of waste types and quantities, assigning the European Waste Code (EWC) to each prevalent material, pursuant to Directive 2008/98/EC and assigning a future destination to each prevalent material, based on the nature of the material.

Risultati e discussioni

Dopo aver applicato la metodologia ad entrambi i casi studio, calcolate le emissioni totali. Si è passati ad un confronto tra i risultati ottenuti

VILLA SINGOLA:			***CASA BN:***		
*Aliquota di emissioni di $CO_{2,1}$ prodotte dall'attività di **demolizione***	663,42	+	*Aliquota di emissioni di $CO_{2,1}$ prodotte dall'attività di **demolizione***	701,79	+
*Aliquota di emissioni di $CO_{2,2}$ prodotte dallo **sfrido** conseguente le operazioni di demolizione*	440,02	+	*Aliquota di emissioni di $CO_{2,2}$ prodotte dallo **sfrido** conseguente le operazioni di demolizione*	601,11	+
*Aliquota di emissioni di $CO_{2,3}$ prodotte dal **trasporto** fuori dal sito*	321,35	+	*Aliquota di emissioni di $CO_{2,3}$ prodotte dal **trasporto** fuori dal sito*	346,96	+
*Aliquota di emissioni di $CO_{2,4}$ prodotte dall'**attività di trasformazione/trattamento** per successivo riutilizzo*	134,62	+	*Aliquota di emissioni di $CO_{2,4}$ prodotte dall'**attività di trasformazione/trattamento** per successivo riutilizzo*	229,88	+
*Aliquota negativa di $CO_{2,5}$ quale credito compensativo di emissioni per **stoccaggio** nel materiale*	-9400,9	=	*Aliquota negativa di $CO_{2,5}$ quale credito compensativo di emissioni per **stoccaggio** nel materiale*	-11.742,4	=
TOTALE	**-7841,49 kg CO_2**		*TOTALE*	**-9862,66 kg CO_2**	

Tabella 1.2 – Riassunto delle emissioni totali di CO2 di entrambi i casi studio

Sono state calcolate le emissioni totali per unità di volume e le emissioni riferite ad ogni aliquota, per entrambi i casi studio:

Totale:

Caso studio	Totale [kg CO_2]	Volume [m^3]	[kg CO_2 / m^3]
Villa Singola	-7841,49	950	-8,25
Casa BN	-9862,66	850	-11,60

Demolizione, CO2,1:

Caso studio	Demolizione [kg CO_2]	Volume [m^3]	[kg CO_2 / m^3]
Villa Singola	663,42	950	0,69
Casa BN	701,79	850	0,83

Sfrido, CO2,2:

Caso studio	Sfrido [kg CO_2]	Volume [m^3]	[kg CO_2 / m^3]
Villa Singola	440,02	950	0,47
Casa BN	601,11	850	0,71

Trasporto, CO2,3:

Caso studio	Trasporto [kg CO_2]	Volume [m^3]	[kg CO_2 / m^3]
Villa Singola	321,35	950	0,34
Casa BN	346,96	850	0,41

Trasformazione e trattamento, CO2,4:

Caso studio	Trasf/Tratt [kg CO_2]	Volume [m^3]	[kg CO_2 / m^3]
Villa Singola	134,62	950	0,15
Casa BN	229,88	850	0,27

Stoccaggio, CO2,5:

Caso studio	Stoccaggio [kg CO_2]	Volume [m^3]	[kg CO_2 / m^3]
Villa Singola	-9400,9	950	-9,89
Casa BN	-11742,4	850	-13,81

L'analisi valuta la capacità di opere edilizie, componenti e materiali di essere smontati e reintrodotti nel ciclo produttivo, favorendo la sostenibilità tra fine vita e nuova produzione. È stata condotta tramite il Metodo sperimentale integrato e il Metodo UNI (11277:2008), confrontando i risultati ottenuti in termini di punteggi LID, espressi in percentuale, per entrambi i casi studio.

Identificate le unità tecnologiche di ciascun caso studio, e valutate le emissioni di CO2 durante l'intero ciclo di vita finale dei due casi studio scelti, è stata eseguita un'analisi del livello di disassemblabilità di ogni materiale predominante e di ciascuna unità tecnologica.

Villa Singola

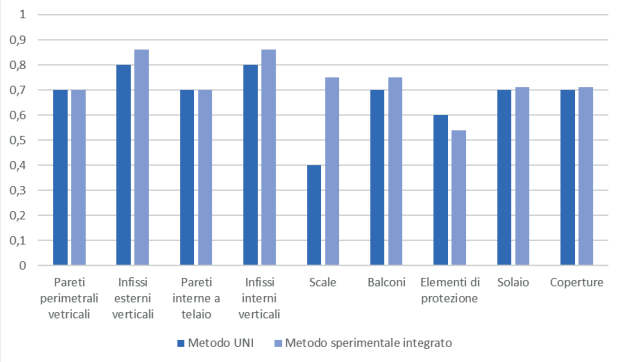


Grafico A

Casa BN

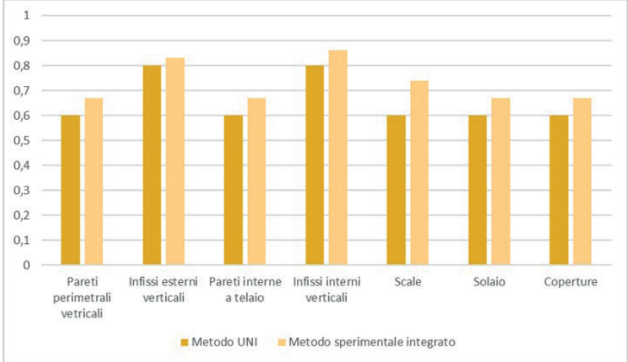


Grafico B

VILLA SINGOLA

Elemento tecnico	LID – metodo UNI	LID- metodo sperimentale integrato
Pareti perimetrali verticali	0,70	0,70
Infissi esterni verticali	0,80	0,86
Pareti interne a telaio	0,7	0,70
Infissi interni verticali	0,8	0,86
Scale	0,4	0,75
Balconi	0,7	0,75
Elementi di protezione	0,6	0,54
Solaio	0,7	0,71
Coperture	0,7	0,71

CASA BN

Elemento tecnico	LID – metodo UNI	LID- metodo sperimentale integrato
Pareti perimetrali verticali	0,60	0,67
Infissi esterni verticali	0,80	0,83
Pareti interne in XLAM	0,60	0,67
Infissi interni verticali	0,80	0,86
Scale	0,60	0,74
Solaio	0,60	0,67
Coperture	0,60	0,67

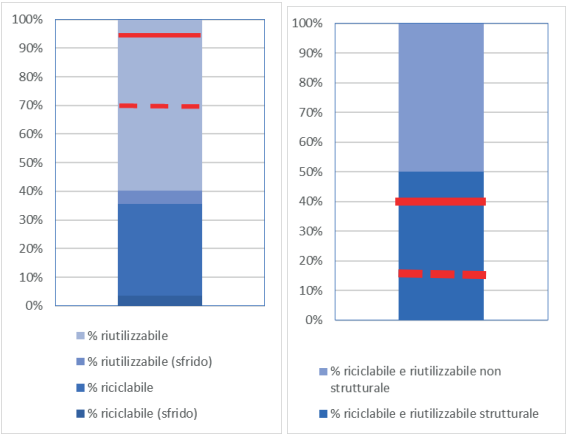
Dal Grafico "A" emergono tre scenari di confronto tra il metodo sperimentale integrato e il metodo UNI per il calcolo dei punteggi LID: il metodo sperimentale integrato può fornire punteggi superiori, inferiori o uguali rispetto a quelli del metodo UNI. Gli elementi di protezione risultano l'unico caso in cui il metodo UNI assegna un punteggio LID

maggiore, poiché non considera la fragilità degli elementi, come il vetro, durante il disassemblaggio. Le scale, invece, ottengono un punteggio significativamente superiore con il metodo sperimentale integrato, grazie alla valutazione di fattori come il basso rischio di danneggiamento durante il trasporto e le limitate modifiche necessarie in officina. Le pareti perimetrali e interne a telaio presentano punteggi identici con entrambi i metodi, mentre gli altri elementi tecnici (infissi, balconi, solai e coperture) mostrano punteggi comparabili, con una differenza media di circa il 10% a favore del metodo sperimentale integrato. Dal Grafico "B" si conferma che tutti gli elementi tecnici ottengono punteggi più alti utilizzando il metodo sperimentale

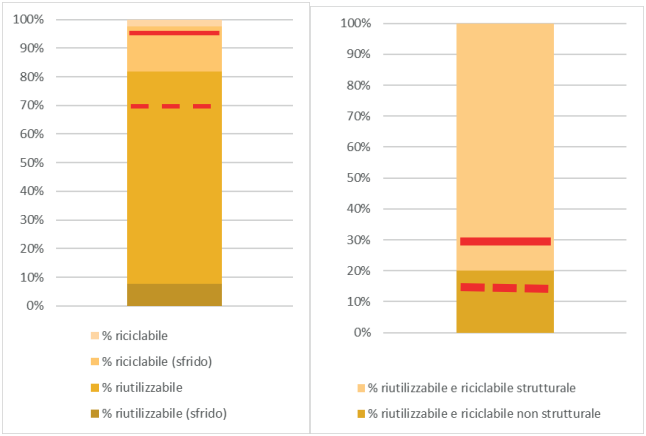
L'ultima fase è la stima di generi e quantità di rifiuti e la verifica del criterio di ''disassemblabilità'' (decreto CAM- DM 23/06/2022). Con riferimento alla fase di fine vita di un organismo edilizio, come visto, risulta di particolare interesse il criterio di ''disassemblabilità'' del DM 11/10/2017:

''Almeno in il 50% in peso dei componenti edilizi e degli elementi prefabbricati, escludendo gli impianti, dev'essere sottoponibile, a fine vita, a demolizione selettiva ed essere riciclabile o riutilizzabile. Di tale percentuale, almeno il 15% dev'essere costituito da materiali non strutturali.''

Per verificare il raggiungimento dell'obbiettivo fissato, per entrambi i casi studio, ci si è serviti della stima dei generi e quantità di rifiuti prodotti durante l'intero processo di disassemblaggio e demolizione selettiva.



Villa Singola



Casa BN

Come si può notare dai grafici sopra riportati, entrambi i casi studio superano le due soglie stabilite dal Decreto Ministeriale.

Come già evidenziato, in entrambi i casi studio, sia per il sistema costruttivo a telaio che per il sistema Xlam, il bilancio finale di CO2 è negativo; il processo di disassemblaggio e demolizione selettiva si è quindi svolto a zero emissioni, grazie al credito compensativo di emissioni derivante dallo stoccaggio nel legno.

Results and discussions

After applying the methodology to both case studies, calculate the total emissions. We moved on to a comparison between the results obtained

VILLA SINGOLA:		
Aliquota di emissioni di $CO_{2,1}$ prodotte dall'attività di ***demolizione***	663,42	+
Aliquota di emissioni di $CO_{2,2}$ prodotte dallo ***sfrido*** *conseguente le operazioni di demolizione*	440,02	+
Aliquota di emissioni di $CO_{2,3}$ prodotte dal ***trasporto*** *fuori dal sito*	321,35	+
*Aliquota di emissioni di $CO_{2,4}$ prodotte dall'****attività di trasformazione/trattamento*** *per successivo riutilizzo*	134,62	+
Aliquota negativa di $CO_{2,5}$ quale credito compensativo di emissioni per ***stoccaggio*** *nel materiale*	-9400,9	=
TOTALE	**-7841,49 kg CO_2**	

CASA BN:		
Aliquota di emissioni di $CO_{2,1}$ prodotte dall'attività di ***demolizione***	701,79	+
Aliquota di emissioni di $CO_{2,2}$ prodotte dallo ***sfrido*** *conseguente le operazioni di demolizione*	601,11	+
Aliquota di emissioni di $CO_{2,3}$ prodotte dal ***trasporto*** *fuori dal sito*	346,96	+
*Aliquota di emissioni di $CO_{2,4}$ prodotte dall'****attività di trasformazione/trattamento*** *per successivo riutilizzo*	229,88	+
Aliquota negativa di $CO_{2,5}$ quale credito compensativo di emissioni per ***stoccaggio*** *nel materiale*	-11.742,4	=
TOTALE	**-9862,66 kg CO_2**	

The total emissions per unit of volume and the emissions referred to each rate were calculated, for both case studies:

Total:

Caso studio	Totale [kg CO_2]	Volume [m^3]	[kg CO_2 / m^3]
Villa Singola	-7841,49	950	-8,25
Casa BN	-9862,66	850	-11,60

Demolition, CO2,1:

Caso studio	Demolizione [kg CO_2]	Volume [m^3]	[kg CO_2 / m^3]
Villa Singola	663,42	950	0,69
Casa BN	701,79	850	0,83

Waste, CO2,2:

Caso studio	Sfrido [kg CO_2]	Volume [m^3]	[kg CO_2 / m^3]
Villa Singola	440,02	950	0,47
Casa BN	601,11	850	0,71

Transport, CO2,3:

Caso studio	Trasporto [kg CO_2]	Volume [m^3]	[kg CO_2 / m^3]
Villa Singola	321,35	950	0,34
Casa BN	346,96	850	0,41

Transformation and treatment, CO2,4:

Caso studio	Trasf/Tratt [kg CO_2]	Volume [m^3]	[kg CO_2 / m^3]
Villa Singola	134,62	950	0,15
Casa BN	229,88	850	0,27

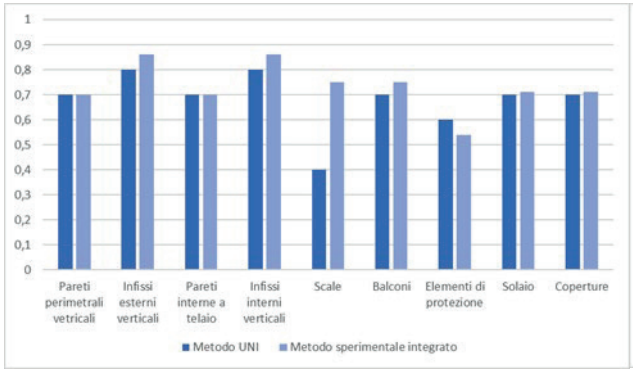
Storage, CO2,5:

Caso studio	Stoccaggio [kg CO_2]	Volume [m^3]	[kg CO_2 / m^3]
Villa Singola	-9400,9	950	-9,89
Casa BN	-11742,4	850	-13,81

The analysis evaluates the ability of building works, components and materials to be dismantled and reintroduced into the production cycle, promoting sustainability between end of life and new production. It was conducted using the Integrated Experimental Method and the UNI Method (11277:2008), comparing the results obtained in terms of LID scores, expressed as a percentage, for both case studies.

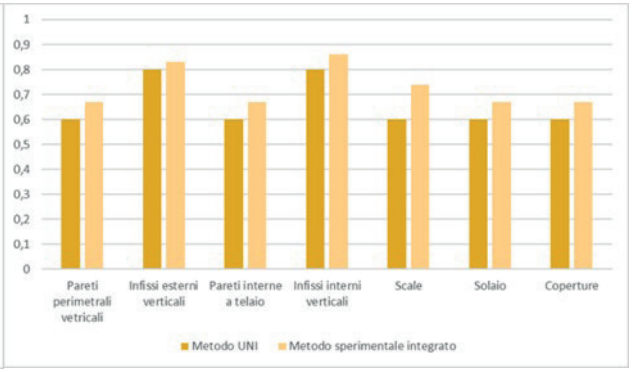
Once the technological units of each case study were identified, and the CO2 emissions during the entire final life cycle of the two chosen case studies were assessed, an analysis of the level of disassemblability of each predominant material and of each technological unit was performed.

Villa Singola



Graph A

Casa BN



Graph B

VILLA SINGOLA		
Elemento tecnico	LID – metodo UNI	LID- metodo sperimentale integrato
Pareti perimetrali verticali	0,70	0,70
Infissi esterni verticali	0,80	0,86
Pareti interne a telaio	0,7	0,70
Infissi interni verticali	0,8	0,86
Scale	0,4	0,75
Balconi	0,7	0,75
Elementi di protezione	0,6	0,54
Solaio	0,7	0,71
Coperture	0,7	0,71

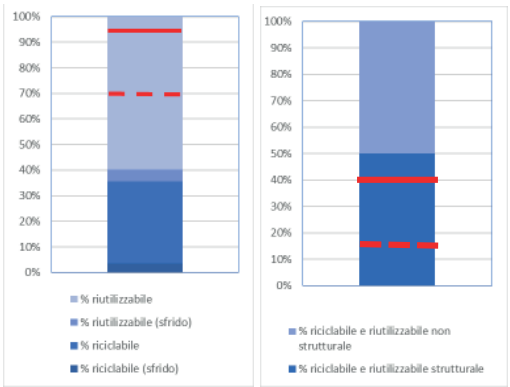
CASA BN		
Elemento tecnico	LID – metodo UNI	LID- metodo sperimentale integrato
Pareti perimetrali verticali	0,60	0,67
Infissi esterni verticali	0,80	0,83
Pareti interne in XLAM	0,60	0,67
Infissi interni verticali	0,80	0,86
Scale	0,60	0,74
Solaio	0,60	0,67
Coperture	0,60	0,67

Graph "A" shows three comparison scenarios between the integrated experimental method and the UNI method for calculating the LID scores: the integrated experimental method can provide scores higher, lower or equal to those of the UNI method. The protection elements are the only case in which the UNI method assigns a higher LID score, since it does not consider the fragility of the elements, such as glass, during disassembly. The stairs, on the other hand, obtain a significantly higher score with the integrated experimental method, thanks to the evaluation of factors such as the low risk of damage during transport and the limited modifications required in the workshop. The perimeter and internal frame walls show identical scores with both methods, while the other technical elements (windows, balconies, floors and roofs) show comparable scores, with an average difference of about 10% in favor of the integrated experimental method. Graph "B" confirms that all the technical elements obtain higher scores using the experimental method

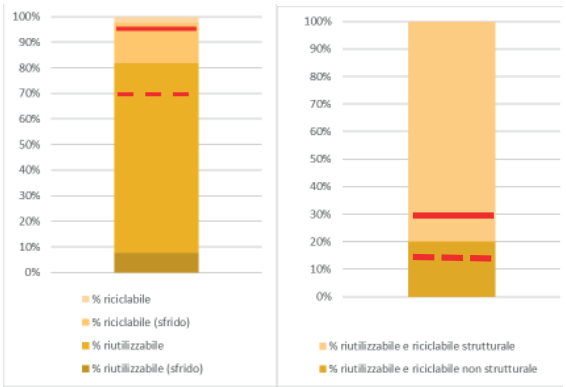
The last phase is the estimate of types and quantities of waste and the verification of the "disassemblability" criterion (CAM decree - Ministerial Decree 23/06/2022). With reference to the end-of-life phase of a building organism, as seen, the "disassemblability" criterion of the Ministerial Decree 11/10/2017 is of particular interest:

''At least 50% by weight of the building components and prefabricated elements, excluding the systems, must be subject, at the end of their life, to selective demolition and be recyclable or reusable. Of this percentage, at least 15% must consist of non-structural materials.''

To verify the achievement of the established objective, for both case studies, we used the estimate of the types and quantities of waste produced during the entire disassembly and selective demolition process.



Villa Singola



Casa BN

As can be seen from the graphs above, both case studies exceed the two thresholds established by the Ministerial Decree.

As already highlighted, in both case studies, both for the frame construction system and for the CLT system, the final CO2 balance is negative; the disassembly and selective demolition process therefore took place with zero emissions, thanks to the offsetting credit of emissions resulting from storage in timber.

BIBLIOGRAFIA/BIBLIOGRAPHY

- Nazioni Unite, Rapport Brundtland - Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Futur, 1987
- ONU, Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile, 21 ottobre 2015.
- Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, "Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi della pubblica amministrazione" (PAN GPP).
- Sicignano E.; Di Ruocco G.; Stabile A.; "Un metodo di valutazione ambientale quantitative secondo il CAM italiano, per la progettazione sostenibile dei quartieri urbani nelle regioni climatiche mediterranee", Soustenability, Agosto 2019.
- UNI EN ISO 14040, 2021.
- UNI EN ISO 14044, 2021.
- Khasreen M.M.; Banfill P.F.G.; Menzies G.F, "Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review", Sustainability, 2009.
- Norma UNI 11277: 2008 - Sostenibilità in edilizia - Esigenze e requisiti di ecocompatibilità dei progetti di edifici residenziali e assimilabili, uffici e assimilabili, di nuova edificazione e ristrutturazione.
- Norma UNI 11228-1:2009 - Ergonomia - Movimentazione manuale - Parte 1: Sollevamento e trasporto.
- Fattori di emissione per la produzione ed il consumo di energia elettrica in Italia, ISPRA, 2020.
- Protocollo UE per la gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione, Commissione europea, settembre 2016.
- DI RUOCCO, GIACOMO; MELELLA, ROBERTA, "Evaluation of environmental sustainability threshold of 'humid' and 'dry' building systems, for reduction of embodied carbon (CO2)", Vitruvio – International Journal of Architecture, Techonology and Sustainability, dicembre 2018.
- Annuario dei dati ambientali – rifiuti, ISPRA, 2019.
- VAN DER LUGT, P., "Carbon Storage Utilising Timber Products", Enviromental industry magazine, 2012.

CHAPTER 3

NEURAL ENGINEERING

CAPÍTULO 3 ***NEUROINGENIERÍA***

Aging in Place and Place Attachment in Macau: The Role of Emotional Experiences and Physical Characteristics of Public Spaces

澳门就地养老与场所依恋：情感联系及公共空间物理特征的角色

Stephen Siu Yu LAU

Faculty of Humanities and Arts, Macau University of Science and Technology; Faculty of Architecture, The University of Hong Kong, PhD Supervisor, Professor, E-mail: ssylau@hku.hk

Hongzhan LAI （Correspondence）

Faculty of Humanities and Arts, Macau University of Science and Technology, PhD Candidate; E-mail: 3220001170@student.must.edu.mo

Abstract

As global aging issues intensify, creating environments that support healthy aging for the elderly has become an urgent topic in both policy and academic research. Aging-in-place for the elderly has emerged as a key strategy to address this challenge, emphasizing the ability for older adults to live independently and safely in familiar homes and communities. In the unique socio-cultural context of Macau, research on elderly emotional experiences and behavioral tendencies in public spaces, particularly in relation to place attachment theory, reveals how physical space characteristics influence elderly individuals' emotions and behaviors. This study explores the emotional experiences of the elderly in Macau during the aging-in-place process, with a particular focus on the formation and role of place attachment, and underscores the significant influence of public space physical features and cultural factors on elderly behavior. Finally, the article provides recommendations for improving and better supporting aging-in-place for the elderly, aiming to create a more suitable living environment for elderly residents in Macau.

Key words: Aging in Place, Place Attachment, Public Space, Emotional Experiences

1. 引言

随着全球人口老龄化，创造支持老年人良好老化的环境已成为一个迫切的课题。就地养老是一项关键战略，旨在帮助老年人在自己的家园和社区中保持独立生活（Boyle, Wiles, & Kearns, 2015）。这一模式在城市环境中尤为重要，因为空间的局限性和社会结构常常使老龄化过程变得更加复杂（Canham, Weldrick, Sussman, Walsh, & Mahmood, 2022; Peace, 2022）。澳门的独特社会文化背景塑造了老年居民的居住体验，并影响这些空间如何在情感和行为上对他们产生作用。

本文探讨了澳门老年人在公共空间中的情感体验，重点关注场所依恋（place attachment）及这些空间的物理特征如何影响老年人的就地养老。相关讨论为未来深入研究如何为澳门老年居民创造支持性环境，以促进其就地养老奠定了基础。

2. 就地养老的概念与发展

就地养老指老年人能够继续生活在自己的家或社区中，并保持良好的生活质量。这一概念涉及到身体、社会、心理和环境等多个因素。Lawton 和 Nahemow 提出的生态学模型（Ecological Model of Aging）认为，老年人会与其环境进行动态互动（Lawton & Nahemow, 1973），他们周围的物理和社会环境对于支持其独立性和整体福祉至关重要。

近年来，关于就地养老的研究重点已从单纯的"在自家居住"转向了"在更广泛的社区中老化"（Wiles, Leibing, Guberman, Reeve, & Allen, 2012）。研究人员如今认识到，公共空间在支持就地养老中的重要性，这些空间为老年人提供了社交互动、身体活动和心理健康的场所（Marek et al., 2005）。对于澳门而言，这一概念尤为重要，因为其城市环境密集，文化景观复杂，社会动态独特。

3. 就地养老与场所依恋：挑战与启示

在澳门，许多老年人倾向于选择就地养老，他们珍视与邻里和熟悉日常生活方式的情感依恋（澳门特别行政区老年人生活状况及长期护理服务需求调研报告，2020）。然而，随着年龄增长，身体健康、活动能力和社交网络的变化常常会挑战他们独立生活的能力。传统的就地养老模式主要关注保持独立性，但往往忽视了老年人的情感需求以及社会联系在支持这一过程中的关键作用（Wong, 2023）。早在 2004 年，澳门社会福利局发布的《老年人照护供给系统调研报告》就提到，提供尊严与高质量生活的服务对于增强老年人身心健康至关重要。

3.1 场所依恋的理论框架

场所依恋理论解释了个体与特定地点之间的情感纽带，尤其对于就地养老的老年人，场所依恋在其身份认同、安全感和幸福感中起着重要作用（Williams & Roggenbuck, 1989）。该理论认为，人们的行为和情感是由他们与环境的互动所塑造的，这些互动不仅受空间的物理特征影响，还受到社会动态、文化因素和个人经验的影响（Aliakbarzadeh Arani, Zanjari, Delbari, Foroughan, & Ghaedamini Harouni, 2022）。在老龄化的背景下，场所依恋显得尤为重要，因为它将情感联系与物理空间、福祉及生活满意度紧密相连（Gilleard, Hyde, & Higgs, 2007）。那些对自己住所和社区有情感依恋的老年人，更有可能保持生活的稳定性和控制感，这对于实现就地养老至关重要（Wiles et al., 2012）。

1. Introduction

As the global population ages, creating environments that support aging well has become an urgent concern. Aging in place (AIP) is a key strategy to address these challenges, allowing older adults to live independently in their own homes and communities (Boyle, Wiles, & Kearns, 2015). This model is particularly relevant in urban settings where space limitations and societal structures often complicate the aging process (Canham, Weldrick, Sussman, Walsh, & Mahmood, 2022; Peace, 2022). In Macau, a unique socio-cultural context exists that shapes how older residents experience their living environments and how these spaces influence their emotional and behavioral tendencies.

This paper explores the emotional experiences of older adults living in Macau's public spaces, focusing on place attachment, and how the physical characteristics of these spaces influence their aging in place. These discussions lay the groundwork for future in-depth research on creating supportive environments that enhance AIP for elderly residents in Macau.

2. The Concept and Evolution of Aging in Place

Aging in place refers to older adults remaining in their home or community while maintaining a good quality of life. It encompasses physical, social, psychological, and environmental factors. Lawton and Nahemow's Ecological Model of Aging proposed that older adults interact dynamically with their environments (Lawton & Nahemow, 1973), and the physical and social aspects of their surroundings are critical to supporting their autonomy and overall well-being.

In recent decades, research on aging in place has shifted focus from simply aging in one's own home to aging in one's broader community (Wiles, Leibing, Guberman, Reeve, & Allen, 2012). Researchers now recognize the importance of public spaces in supporting aging in place, as these spaces serve as venues for social engagement, physical activity, and psychological well-being (Marek et al., 2005). In Macau, this concept is particularly relevant due to its dense urban environment, complex cultural landscape, and unique social dynamics.

3. Aging in Place and Place Attachment: Challenges and Implications

IIn Macau, many older adults prefer to age in place, valuing emotional attachment to their neighborhoods and familiar routines (Research Report on the Living Conditions and Long-Term Care Service Needs of Elderly People in the Macao Special Administrative Region, 2020). However, as individuals age, changes in physical health, mobility, and social networks often challenge their ability to live independently. Traditional aging in place models focus on maintaining independence, but they often overlook the emotional needs of older adults and the crucial role of social connections in supporting this process (Wong, 2023). As early as 2004, the "Research Report on the Elderly Care Supply System" published by the Social Welfare Bureau of Macao mentioned the importance of providing elderly individuals with a dignified and quality life to enhance their physical and mental well-being.

3.1 Theoretical Framework of Place Attachment

Place attachment theory explains the emotional bond individuals form with specific locations, influencing their identity, security, and well-being, especially for older adults aging in place. (Williams & Roggenbuck, 1989). Place attachment theory asserts that people's behaviors and emotions are shaped by their interactions with their environments.

3.2 澳门老年人情感体验的特殊性

澳门老年人的情感体验受到其独特的中葡文化遗产的影响，这决定了他们与公共空间的关系。澳门的文化环境融合了中国传统与葡萄牙殖民影响，老年人往往在这两种文化遗产之间穿梭。澳门的中国文化元素强调家庭凝聚力、尊重传统和集体认同感；而葡萄牙的影响，尤其是在城市的老旧城区，体现在建筑风格、语言和社会结构上。中葡元素的结合在公共空间中创造了一种独特的混合环境，老年人能够在情感层面上与这些空间建立深厚的联系。这种文化融合能够提供一种安慰，因为它使个体能够根据具体情境调动两种文化的参考框架，从而与环境建立更深层次的联系。

这两种文化的双重影响也在场所依恋的形成中发挥作用，尤其是对于那些见证澳门变化的老年人而言。澳门的快速现代化以及新文化元素在公共空间中的融合，可能会激发老年居民的复杂情感，有些人可能会感到失落或与曾经熟悉的澳门产生疏离感。在这种背景下，场所依恋不仅仅是个体与某个地点的物理接近度的反映，更是文化身份、个人记忆和社会关系之间复杂互动的结果。澳门的老年人往往对那些能够反映自己过往经历和文化遗产的空间产生情感依恋，这些空间可能同时包含熟悉的中式和葡式环境元素。

3.3 场所依恋：平衡澳门的独立性与情感福祉

目前关于澳门的文献主要集中在场所依恋与旅游业的关系（Io, 2018；Pai et al., 2023）。例如，Louis Tze-Ngai Vong 关于澳门场所依恋的研究主要涉及 15 至 24 岁的年轻人。他的研究探讨了遗产旅游对当地居民场所感的积极影响（Vong, 2015），以及场所身份在遗产旅游认知与场所依恋关系中的中介作用，确认了场所身份对场所依恋的中介效应（Vong, 2015）。至于澳门的就地养老，Wong 的研究强调了政府采取的多项措施，如提供无障碍交通、机械爬楼设备和电动交通系统，帮助老年人应对传统建筑和高密度社区带来的挑战。这些举措使老年人能够维持正常的生活方式，并通过避免过度依赖外部设施实现"正常老化"，从而促进幸福感和福祉（Wong, 2023）。这一模式体现了澳门政府和慈善机构努力维持老年人独立性并改善生活质量的措施。

就地养老面临着"依赖导致衰退"和"独立导致孤立"的困境，这反映了不同利益相关方的需求差异（Span, 2015）。所谓"依赖导致衰退"的困境，指的是过度依赖外部帮助或护理设施；而"独立导致孤立"的困境则指老年人追求独立生活时可能面临的孤独和被忽视。由于不同利益相关方对就地养老有不同的看法，这一争论仍未得到解决（Wong, 2023）。作者认为，澳门同样面临陷入这一困境的风险。平衡老年人的需求与其对社区支持的依赖仍然是一个挑战，且不同群体的老年人可能对就地养老有不同的期望。虽然澳门政府和慈善组织已帮助老年人维持独立性，但在面对这一群体复杂多样的需求时，冲突和挑战仍然可能出现。

在就地养老实践中，老年人的心理健康与物理空间之间存在不平衡。尽管改善物理空间在某种程度上能够增强他们的独立性和便利性，但这些物理变化无法完全解决他们的负面情绪，如孤独感和不安全感，除非同时考虑到心理需求和情感联系。值得强调的是，从场所依恋的角度探索就地养老，专注于个体与生活环境之间的情感联系和福祉，可能为解决这一困境提供新的思路。场所依恋突显了老年人与生活环境之间的情感纽带，这可以增强他们的心理安全感和福祉。通过优化环境的物理特征并加强与生活空间的情感连接，旨在帮助老年人在维持独立性的同时获得情感支持，从而避免依赖设施带来的疲惫感和过度独立所导致的孤立感。

These interactions are not only influenced by the physical characteristics of the spaces but also by social dynamics, cultural factors, and personal experiences (Aliakbarzadeh Arani, Zanjari, Delbari, Foroughan, & Ghaedamini Harouni, 2022). In the context of aging, place attachment becomes particularly significant as it links the emotional connection to physical spaces with well-being and life satisfaction (Gilleard, Hyde, & Higgs, 2007). Older adults who feel emotionally connected to their homes and neighborhoods are more likely to maintain a sense of stability and control over their lives, which is crucial for aging in place (Wiles et al., 2012).

3.2 The Specificities of Emotional Experience Among Older Adults in Macau

The emotional experiences of older adults in Macau are shaped by its distinctive Sino-Portuguese heritage, which influences how they connect with public spaces. Macau's cultural environment is a blend of Chinese traditions and Portuguese colonial influences, creating a space where older adults navigate between these two distinct cultural heritages. The Chinese cultural elements in Macau emphasize family cohesion, respect for traditions, and a collective sense of identity. On the other hand, the Portuguese influence, especially in the older sections of the city, manifests in the architectural style, language, and social structures. The combination of Portuguese and Chinese elements in public spaces creates a unique hybrid environment that older adults can relate to on a deep, emotional level. This cultural fusion can provide a sense of comfort, as it allows individuals to draw upon both cultural references depending on the context, facilitating a deeper connection to the environment.

The dual cultural influences also play a role in the formation of place attachment, particularly for older adults who have witnessed the transformations in Macau over the decades. Macau's rapid modernization and the integration of new cultural influences into its public spaces may provoke mixed emotions among elderly residents, some of whom may feel a sense of loss or disconnection from the Macau they once knew. In this context, place attachment can be seen not just as a reflection of a person's physical proximity to a location, but as a complex interaction between cultural identity, personal memories, and social relationships. Older adults in Macau often exhibit emotional attachment to spaces that reflect their past experiences and cultural heritage, which may include both familiar Chinese and Portuguese elements.

3.3 Place Attachment: Balancing Independence and Emotional Well-being in Macau

Most of existing literature on Macau mainly focuses on the relationship between place attachment and tourism in the region (Io, 2018; Pai et al., 2023). For example, Louis Vong's research on place attachment in Macau primarily involves young people (ages 15-24). His study explored the positive impact of heritage tourism on local residents' sense of place (Vong, 2015) as well as the mediating role of place identity in the relationship between heritage tourism perceptions and place attachment, confirming the mediating effect of place identity on place attachment (Vong, 2015). Regarding AIP in Macau, Wong's research highlights several measures taken by the government, such as providing barrier-free transportation, mechanical stair-climbing devices, and electric transport systems, to help older adults cope with challenges posed by traditional buildings and high-density communities. These initiatives have allowed older adults to maintain their usual lifestyles and, through passive avoidance of dependency on external facilities, achieve a form of "normal aging" that promotes a sense of happiness and well-being (Wong, 2023).

3.4 公共空间的物理特征与老年人行为模式

老年人更加重视身体舒适性和环境条件（Askari, Soltani, & Ahmad, 2015）。创建适老社区的核心在于改善建成环境，以支持就地养老（Choi, 2022）。因此，公共空间设计在决定老年人是否能够有效地实现就地养老方面起着至关重要的作用。公共空间的物理特征直接影响老年人的日常行为（Zhang et al., 2023）。在澳门，公共空间的设计和布局具有高度的多样性。例如，前地是澳门特有的公共广场形式，作为连接历史建筑的纽带。澳门历史城区内有八个此类广场被列为联合国教科文组织世界遗产。

为老年人设计良好的空间通常具备平整、光滑的人行道、供休息的长椅、良好的照明以及清晰的指示标志，以帮助人们顺利导航环境。相反，设计不当且缺乏可达性特征的公共空间可能导致老年人的社会隔离、身体活动减少，以及整体生活质量下降（Pickard, 2015）。此外，公共空间中绿地和自然元素的融合已被证明能够增强老年人对这些环境的情感依恋，促进更大的宁静感和福祉感（Kim, Kim, & Jun, 2021）。

同时，环境变化可能对老年人产生复杂的心理和情感影响（Haugan, 2023）。Ma 指出，随着建成环境的变化，老年人可能会感受到传统生活方式的失落，进而产生焦虑和不适感。建成环境的变化可能削弱老年人对原有居住空间的情感依恋，从而导致心理不安（Ma, Guerra-Santin, & Mohammadi, 2022）。因此，改善公共空间的设计和可达性对支持老年人就地养老至关重要。

4. 讨论与结论：提升澳门的就地养老

本研究探讨了澳门老年人在公共空间中的情感体验，并通过场所依恋理论聚焦于就地养老问题。研究结果揭示，公共空间的物理特征以及文化、社会影响显著影响老年人的情感福祉及其是否能够实现就地养老。老年人对公共空间形成的情感纽带在其就地养老的经历中起着至关重要的作用。受澳门中葡文化遗产影响的公共空间具有重要的情感价值。然而，随着城市空间的演变，老年居民可能会经历怀旧和失落的情感，这突显了需要敏感的城市规划，以体现文化延续性并促进情感福祉。

展望未来，进一步研究的一个关键方向是将先进技术融入到公共空间中情感依恋的定量评估与理解中。本研究建议，未来的研究可以利用眼动追踪技术和皮电反应（GSR）测量等工具，这些工具能够实时捕捉老年人在与不同公共空间互动时的生理反应。这些技术可以为我们提供宝贵的洞察，帮助理解特定的物理设计特征、文化元素和环境因素如何促成情感依恋，并进而影响老年人实现就地养老的能力。

另一个未来研究的方向是文化身份在塑造老年人对公共空间情感依恋中的作用。随着澳门城市空间的发展，研究城市物理与社会环境的变化如何影响老年人对周围环境的情感纽带将变得尤为重要。这可能需要进行一项纵向研究，追踪老年人的情感体验和场所依恋感随着城市转型的时间变化。

总之，本研究的发现强调了公共空间物理设计和文化背景在塑造澳门老年人情感体验中的重要性。为了促进就地养老，必须采取更为综合的方法，结合技术工具量化情感依恋和身体参与，并深入探讨文化身份如何影响老年人养老体验。该领域的未来研究将为城市设计和政策决策提供宝贵的数据支持，确保公共空间能够支持老年人的情感与身体健康，并使他们能够以尊严和满足感实现就地养老。

This model reflects the efforts of the Macau government and charitable organizations to maintain the independence of older adults and improve their quality of life.

Aging in place faces a dilemma between 'dependence leading to decline' and 'independence leading to isolation,' reflecting the differing needs of stakeholders (Span, 2015). The "dependence leading to decline" dilemma refers to the over-reliance on external help or care facilities, while the "independence leading to isolation" dilemma describes the sense of isolation and neglect that older adults may face in their pursuit of independent living. As different stakeholders view aging in place from different perspectives, this debate remains unresolved (Wong, 2023). The authors believe that Macau is also at risk of falling into this dilemma. Balancing older adults' needs with their dependence on community support remains challenging, and different groups of elderly people may have differing expectations of aging in place. While the Macau government and charitable organizations have helped older adults maintain their independence, conflicts and challenges may still arise when addressing the complex and diverse needs of this population.

In the practice of aging in place, there is an imbalance between older adults' psychological health and the physical space. Although improvements in physical space can enhance their independence and convenience to some extent, these physical changes cannot fully address their negative emotions, such as loneliness and insecurity, unless psychological needs and emotional connections are also taken into account. It is worth emphasizing that exploring aging in place from the perspective of place attachment—focusing on the emotional connection and well-being between individuals and their living environment—may offer new insights into solving this dilemma. Place attachment highlights the emotional bond between older adults and their living environment, which can enhance their sense of psychological security and well-being. By optimizing physical features of the environment and strengthening the emotional connection to their living spaces, the aim is to help older adults maintain independence while receiving emotional support, thus avoiding both the exhaustion caused by over-dependence on facilities and the isolation resulting from excessive independence.

3.4 The Physical Characteristics of Public Spaces and Older Adults' Behavioral Patterns

Older adults place greater importance on physical comfort and environmental conditions(Askari, Soltani, & Ahmad, 2015). Creating age-friendly communities focuses on improving the built environment to support aging in place (Choi, 2022). Thus, public space design plays a critical role in determining whether older adults can effectively age in place. The physical characteristics of public spaces directly impact the daily behaviors of older adults (Zhang et al., 2023). In Macau, the design and layout of public spaces are highly variable. For instance, the "largo" is a unique form of public square in Macau, serving as a connection between historical buildings. There are eight such squares listed as UNESCO World Heritage sites in Macau's historic district.

Spaces that are well-designed for older adults are characterized by features such as smooth, even pavements, benches for resting, well-lit areas, and clear signage to help individuals navigate the environment. In contrast, poorly designed public spaces that lack accessibility features can lead to social isolation, reduced physical activity, and an overall decline in the quality of life for older adults (Pickard, 2015). Moreover, the integration of green spaces and natural elements in public spaces has been shown to enhance older adults' emotional attachment to these environments, promoting a greater sense of tranquility and well-being (Kim, Kim, & Jun, 2021).

At the same time, environmental changes can have complex psychological and emotional effects on older adults (Haugan, 2023). Ma noted that as the built environment changes, older adults may feel a loss of their traditional way of life, leading to feelings of anxiety and discomfort. Changes in the built environment can weaken older adults' emotional attachment to their original living spaces, resulting in psychological unease (Ma, Guerra-Santin, & Mohammadi, 2022). Therefore, improving the design and accessibility of public spaces is essential for supporting aging in place.

4. Discussion and Conclusion: Enhancing Aging in Place in Macau

This study explores the emotional experiences of older adults in Macau, focusing on public spaces and aging in place through place attachment theory. The findings reveal that both the physical characteristics of public spaces and the cultural, social influences significantly impact older adults' emotional well-being and their ability to age in place. The emotional bonds that older adults form with public spaces play a crucial role in their aging in place experience. Public spaces in Macau, influenced by the city's Chinese and Portuguese heritage, hold significant emotional value. However, as urban spaces evolve, older residents may experience feelings of nostalgia and loss, underscoring the need for sensitive urban planning that reflects cultural continuity and fosters emotional well-being.

Looking to the future, one of the key directions for further research is the integration of advanced technology to quantitatively assess and understand emotional attachment in public spaces. This study suggests that future research could benefit from utilizing tools such as eye-tracking technology and galvanic skin response (GSR) measurements, which can capture real-time physiological reactions of older adults as they interact with different public spaces. These technologies could provide valuable insights into how specific physical design features, cultural elements, and environmental factors contribute to emotional attachment and, by extension, the ability to age in place.

Another area for future exploration is the role of cultural identity in shaping emotional attachment to public spaces. As urban spaces in Macau evolve, it will be crucial to investigate how changes in the city's physical and social environment affect the emotional bonds that older adults form with their surroundings. This could involve a longitudinal study that tracks how older adults' emotional experiences and sense of place attachment change over time in response to urban transformation.

In conclusion, the findings from this study underscore the importance of both the physical design of public spaces and the cultural context in shaping the emotional experiences of older adults in Macau. To enhance aging in place, it is essential to incorporate a more integrated approach that includes technological tools to quantify emotional attachment and physical engagement, as well as deeper investigations into how cultural identity influences the aging experience. Future research in this area can provide valuable data to guide urban design and policy decisions, ensuring that public spaces support the emotional and physical well-being of older adults and enable them to age in place with dignity and fulfillment.

5. Reference

Aliakbarzadeh Arani, Z., Zanjari, N., Delbari, A., Foroughan, M., & Ghaedamini Harouni, G. (2022). Place attachment and aging: A scoping review. *Journal of Human Behavior in the Social Environment, 32*(1), 91-108.

Askari, A. H., Soltani, S., & Ahmad, I. M. (2015). Engagement in public open spaces across age groups: The case of Merdeka Square in Kuala Lumpur city, Malaysia. *Urban Design International, 20*, 93-106.

Boyle, A., Wiles, J., & Kearns, R. (2015). Rethinking Ageing in Place: The 'People'and 'Place'Nexus= 对就地养老的反思-"人" 与 "地方" 关系视角.

Canham, S. L., Weldrick, R., Sussman, T., Walsh, C. A., & Mahmood, A. (2022). Aging in the right place: A conceptual framework of indicators for older persons experiencing homelessness. *Gerontologist, 62*(9), 1251-1257.

Choi, Y. J. (2022). Understanding aging in place: Home and community features, perceived age-friendliness of community, and intention toward aging in place. *Gerontologist, 62*(1), 46-55.

Gilleard, C., Hyde, M., & Higgs, P. (2007). The impact of age, place, aging in place, and attachment to place on the well-being of the over 50s in England. *Research on aging, 29*(6), 590-605.

Haugan, T. (2023). Social anxiety in modern societies from an evolutionary perspective. *Discover psychology, 3*(1), 12-15. doi:10.1007/s44202-023-00074-6

Io, M.-U. (2018). The relationships between positive emotions, place attachment, and place satisfaction in casino hotels. *International Journal of Hospitality & Tourism Administration, 19*(2), 167-186.

Kim, M. J., Kim, M. J., & Jun, H. J. (2021). *Towards a Sustainable Life: Smart and Green Design in Buildings and Community*. Basel, Switzerland: MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

Lawton, M. P., & Nahemow, L. (1973). Ecology and the aging process.

Ma, C., Guerra-Santin, O., & Mohammadi, M. (2022). Smart home modification design strategies for ageing in place: a systematic review. *Journal of housing and the built environment, 37*(2), 625-651.

Marek, K. D., Popejoy, L., Petroski, G., Mehr, D., Rantz, M., & Lin, W.-C. (2005). Clinical outcomes of aging in place. *Nursing research, 54*(3), 202-211.

Pai, C. K., Chen, H., Lee, T. J., Hyun, S. S., Liu, Y., & Zheng, Y. (2023). The impacts of under-tourism and place attachment on residents' life satisfaction. *Journal of Vacation Marketing*, 13567667231164807.

Peace, S. (2022). *The environments of ageing: Space, place and materiality*: Policy Press.

Pickard, L. (2015). A growing care gap? The supply of unpaid care for older people by their adult children in England to 2032. *Ageing & Society, 35*(1), 96-123.

Span, P. (2015). At home, many seniors are imprisoned by their independence. *New York Times, 19*.

Vong, L. T.-N. (2015). The mediating role of place identity in the relationship between residents' perceptions of heritage tourism and place attachment: The Macau youth experience. *Journal of Heritage Tourism, 10*(4), 344-356.

Wiles, J. L., Leibing, A., Guberman, N., Reeve, J., & Allen, R. E. (2012). The meaning of "aging in place" to older people. *Gerontologist, 52*(3), 357-366.

Williams, D. R., & Roggenbuck, J. W. (1989). *Measuring place attachment: Some preliminary results.* Paper presented at the NRPA Symposium on Leisure Research, San Antonio, TX.

Wong, S. (2023). Depleted by dependence or imprisoned by independence? Cases of China's aging in place. *Educational Gerontology, 49*(8), 657-672.

Zhang, L., Shao, K., Tang, W., Lau, S. S. Y., Lai, H., & Tao, Y. (2023). Outdoor Space Elements in Urban Residential Areas in Shenzhen, China: Optimization Based on Health-Promoting Behaviours of Older People. *Land, 12*(6), 1138.

MÁQUINAS QUE SUEÑAN: EXPLORANDO LA IMAGINACIÓN EN LA ERA DE LA CREATIVIDAD ARTIFICIAL

MACHINES THAT DREAM: EXPLORING IMAGINATION IN THE AGE OF ARTIFICIAL CREATIVITY

Francisco Javier Alvarez Torres
División de Ciencias Naturales y Exactas Universidad de Guanajuato, Noria Alta S/N, Guanajuato, Gto; México.
E-mail: fjalvarez@ugto.mx

Fabiola Colmenero Fonseca
Universidad de La Salle México. Departamento de Arquitectura, Diseño y Comunicación. México Av. Benjamín Franklin 45, Colonia Condesa, Cuauhtémoc, 06140 Ciudad de México, CDMX, México. e-mail: fabiola.colmenero@lasalle.mx /Instituto Universitario de Tecnología de Materiales. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n 46022 (Valencia, España) E-mail: fcolfon@upvnet.upv.es
Universidad de La Salle México. Department of Architecture, Design and Communication Mexico Av. Benjamín Franklin 45, Colonia Condesa, Cuauhtémoc, 06140 Mexico City, CDMX, Mexico. e-mail: fabiola.colmenero@lasalle.mx /University Institute of Materials Technology. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n 46022 (Valencia, Spain) E-mail: fcolfon@upvnet.upv.es

Bruno Guadarrama Rincón
Ingeniero Mecatrónico Universidad La Salle. Av. Benjamín Franklin 45, Colonia Condesa, Cuauhtémoc, 06140 Mexico City, CDMX, Mexico. e-mail: gr@lasallistas.org.mx
Mechatronics Engineering, Universidad La Salle. Av. Benjamín Franklin 45, Colonia Condesa, Cuauhtémoc, 06140 Mexico City, CDMX, Mexico. e-mail: b.gr@lasallistas.org.mx

Alejandro Guzmán Ramírez
Investigador Universidad de Guanajuato, Departamento de Arquitectura, Av. Juárez 77. 36000, Guanajuato, Gto, México.
E-mail: alejandro.guzman@ugto.mx

Abstract

In this era of unprecedented technological advancements, the intersection between human imagination and artificial creativity has generated an ever-evolving landscape. This article dives into the world of *machines that dream* exploring how artificial intelligence is redefining the boundaries of creativity and challenging our traditional conceptions of imagination. At the same time, we reflect on the ethical and philosophical implications of this phenomenon, questioning what it means to be creative in a world where the boundaries between the human and the artificial are increasingly blurred. The concept of artificial creativity has gained great relevance in recent times, with machines generating art, music, and even scientific discoveries. However, a fundamental question remains: can machines be imaginative? Imagination, often associated with dreams, is a cornerstone of human creativity. Recent studies and developments in the field are analyzed, as well as the ethical and conceptual debates surrounding this topic. The results are expected to shed light on the nature of artificial creativity and its relationship to the human imagination. In addition, areas of future research could be identified to explore in depth the ethical, philosophical, and scientific aspects of this evolving phenomenon. In conclusion, this study highlights the complexity of the concept of artificial creativity and suggests that while machines can generate creative content, it remains to be determined whether they possess true imagination. However, it recognizes the potential of machines as tools to enhance human creativity and urges further research in this fascinating and ever-evolving field.

Keywords: Artificial creativity, Imagination, Machine learning, Digital ethics, creativity

Introduction

In the era of unprecedented technological advances, the intersection between human imagination and artificial creativity has generated an ever-evolving landscape. This article dives into the world of dreaming machines exploring how Artificial Intelligence (AI) is redefining the boundaries of creativity and challenging our traditional conceptions of imagination. At the same time, we reflect on this phenomenon's ethical and philosophical implications, questioning what it means to be creative in a world where the boundaries between the human and the artificial are increasingly blurred.

The purpose of this article is to explain the intersection between human imagination and artificial creativity, and its relevance in today's technological age. The concept of Artificial Creativity (AC) has gained great relevance in recent times, with machines generating art, music, and even scientific discoveries. However, a fundamental question arises: can machines be imaginative? Imagination, often associated with dreams, is a cornerstone of human creativity.

The article addresses a topic of increasing relevance in the modern era: the intersection between human creativity and Artificial Intelligence (AI). In an age where technological advances are rapid and disruptive, understanding how machines can influence, enhance, or even rival human creativity is essential.

This study not only explores the ability of machines to generate art and music but also delves into the philosophical and ethical implications, providing a view of the phenomenon. The relevance of this study lies in its ability to address fundamental questions about the nature of creativity and imagination. With machines playing an increasingly important role in traditionally human-dominated areas such as art, science and education, it's crucial to understand the limits and possibilities of AC. In addition, exploring the ethical and philosophical implications provides a necessary framework for assessing the long-term impacts of these technologies on society and world.

We highlight the importance of the topic in the context of technological advances and its impact on various fields. AC is not only an emerging tool in artistic and scientific production but also raises profound questions about the nature of creativity and imagination. Recent studies in the field have shown that machines can generate creative content, but it remains to be determined whether they possess true imagination (Boden, 1998; Colton & Wiggins, 2012; Ivcevic & Grandinetti, 2024; Mazzone & Elgammal, 2019; E. Zhou & Lee, 2024). We stand out mainly for its focus on the social and ethical dimension of AC, which represents a significant innovation in the field. Unlike many studies that focus on the technical aspects, this paper delves into the ethical and philosophical implications of machines that generate creative content.

This reflection is important for the responsible development of technology, ensuring that its integration into society is ethical and beneficial for all. In addition, the article questions and redefines fundamental concepts such as imagination and creativity in the context of artificial intelligence, proposing a new way of understanding these human qualities considering technological advances. This reassessment has the potential to change how society perceives the creativity and contribution of machines, promoting a more harmonious and productive coexistence between humans and machines.

The article not only considers the creativity of machines in an isolated sense but also emphasizes how they can enhance and complement human creativity. This collaborative approach suggests that machines can be valuable tools for humans, enhancing collective creative capacity and fostering a positive view of technology in society. We also suggest specific areas for future research, especially in the ethical, philosophical, and scientific aspects of AC, promoting a better understanding and management of its social impacts. By raising the question of whether machines can be truly imaginative, the study opens a fundamental debate about the nature of creativity, which is essential for setting clear boundaries and realistic expectations about the role of machines in content creation, influencing policy, education, and public perception of technology.

The article is structured as follows: first, it examines recent developments in AC, including examples of machines that generate art and music. Then, the ethical and conceptual debates around AC are analyzed, including the philosophical implications of machine creativity. Finally, future areas of research are explored to better understand the aspects of this evolving phenomenon.

The results are expected to shed light on the nature of AC and its relationship to the human imagination. In addition, future research areas could be identified to explore aspects of this evolving phenomenon in depth. In conclusion, this study highlights the complexity of the concept of AC and suggests that while machines can generate creative content, it remains to be determined whether they possess a true imagination. However, the potential of machines as tools to enhance human creativity is recognized, urging more research in this fascinating and constantly evolving field (McCormack et al., 2019).

Experimental Plan

Artificial Creativity and Imagination

The human race to explore new worlds between machines and human capabilities has sparked new discoveries in the last ten years. This quest has led us to reconsider human potential, especially in the development of creativity. For human intelligence and perspective, creativity is the core for a significant difference between Human and AI. However, AI models designed as part of cognitive science can aid psychologists in understanding the mechanisms behind human creativity and its potential (Boden, 1998).

Creativity isn't just a rare talent reserved for a select few humans; it's a fundamental aspect of human intelligence. It's woven into our everyday abilities, like connecting ideas, recalling memories, perceiving our surroundings, thinking analogically, solving problems in a structured way, and engaging in reflective self-criticism, key abilities in education (Habib et al., 2024).

Creativity enriches us not only cognitively by sparking new ideas but also emotionally and motivationally, intertwining deeply with our cultural backgrounds and personality traits.

However, we are now living in an era where humans are designing models that enable AI to surpass human creativity. This endeavor is both fascinating and challenging, not only for technological reasons but also due to ethical considerations. Human creativity is driven by our emotions, evolutionary instincts that facilitate communication, and cultural influences that shape civilizations. In contrast, a creative machine would rely on vast amounts of data and sophisticated algorithms.

The potential of such machines, which can process and combine information at an unprecedented scale and speed, offers a glimpse into a future of innovative ideas, artworks, and solutions beyond the limits of human imagination. This pursuit pushes us beyond the boundaries of our minds and presents the opportunity to integrate AI into our creative processes. These scenarios compel us to rethink the essence of human creativity and envision a future where machines not only complement human efforts but also stimulate and inspire new forms of creative expression. The outcomes of this vision are limitless (Edgell, 2024).

As AI interpretation and models are increasingly able to create and generate languages, interactions, and artifacts, we are facing changes in the coexistence with the creative and artistic production of means. This gives us a concern about how artificial creativity can work together with humans without replacing them (Grilli & Pedota, 2024). This reveals an increased debate about how AC is grounding the effect of computers, AI, and alternative virtual realities into the real world. In that way, we define AC as the ability of machines, especially those based on artificial intelligence (AI) to imitate original and novel production and content such as artwork, frames of creative decisions, music, literature, design etc.; with previous human-based information interaction.

This concept challenges the traditional view that creativity is an exclusive human interaction with reality. However, we believe that AC does not replace humans. AC suggests that machines can simulate creative behaviors, they are programmed with sophisticated algorithms and database access always with previous human interaction. AC just uses technology to leverage high-tech techniques such as machine learning, neural networks, and evolutionary algorithms to simulate the creative process, opening new possibilities for innovation in various fields for human beings.

Compared to human creativity, AC lacks the depth of emotional experiences, cultural contexts, and the vibrancy of human personalities. It is driven solely by data and algorithms. Human creativity, however, involves intuition, inspiration, a sense of divine connection (Gaut, 2010), and a non-linear thought process. AC relies on pattern recognition, data analysis, and the manipulation of existing information. Human creativity is nurtured by a dual reality, where the abstract (dreams) and the physical (environment) worlds interact in a complex union, both contributing to creative potential (Barrett, 2017; Lee & Lee, 2023), sometimes verging on madness. But, Can a AI ever experience a form of madness? Maybe or not, technology is giving us a new reality and a novel way to interact with it (Murphy & Pardeck, 1986). Despite these differences and questions, both forms of creativity aim to produce valuable outcomes, whether through artistic expression, problem-solving, or scientific discovery.

AC it is a core value for blended creation among human and virtual interactions; this has found applications in various industries, including entertainment, design, marketing, and research. In the entertainment industry, AI-generated music, films, and video games offer new forms of artistic expression and personalized content (Anantrasirichai & Bull, 2022). In design, AI tools assist in creating innovative products, architectural plans, and fashion designs. Marketing professionals use AI to develop creative advertising campaigns and targeted content strategies (Ivcevic & Grandinetti, 2024). Additionally, AC contributes to scientific research by generating hypotheses, however, this kind of creation need authenticity and intentionality to be considered creativity (Runco, 2023). Both these aspects are unique in human experiences, something that AI technology cannot currently replicate due to its inability to sense and experience the empirical world (human body-human experience-emotional thinking) (Z. Zhou, 2021).

This rise of AC raises important ethical questions regarding authorship, originality, and the potential impact on human creators. As machines become more capable of producing creative works, it is essential to address issues related to intellectual property rights, the value of human creativity, and the potential for AI to both augment and replace human jobs. Looking ahead, the integration of AC into various sectors holds promise for enhancing human capabilities, driving innovation, and creating new opportunities for collaboration between humans and machines. However, it is crucial to navigate these developments thoughtfully to ensure that the benefits of AC are realized while mitigating potential risks (Cheng, 2022).

Ethical Challenges Between Artificial and Human Creativity

The intersection between artificial intelligence (AI) and creativity poses several ethical and philosophical challenges that require careful attention. As machines become more capable of generating creative content, fundamental questions arise about intellectual property, authenticity, and the potential human dependence on artificial creativity.

One of the main ethical challenges is the issue of intellectual property. Who owns the copyright to a work created by a machine? This topic is especially relevant in fields such as music and art, where originality and authorship are highly valued. Copyright law traditionally protects human creations, but AI-generated works don't easily fit into this category (Brynjolfsson & McAfee, 2016). They discuss how technological innovation can complicate existing legal and economic structures, creating the need for new regulations that address these emerging issues.

Another ethical challenge is authenticity. AI-created works can be indistinguishable from those created by humans, raising questions about the value and authenticity of such works. If a machine can produce a symphony that sounds just as emotional as one composed by a human, does it have the same artistic value? This issue not only affects artists and creators but also consumers and the art industry in general.

In addition, there are concerns that over-reliance on AC may diminish human creative capabilities. If machines can generate innovative ideas and solutions, humans could become complacent and less incentivized to develop their creative abilities. This phenomenon could lead to an erosion of human creativity in the long term, which is a crucial issue that Bostrom (2014) addressed in his discussion of the possible consequences of superintelligence. The philosophical debate around AC centers on what it means to be creative in a world where the line between human and artificial is increasingly blurred. Creativity has traditionally been seen as a uniquely human characteristic, linked to imagination, intuition, and personal experience. However, machines can now generate works that seem to exhibit these same qualities.

The key question is whether machines can be truly creative or whether they are simply following predefined algorithms. According to Bostrom (2014) If we accept that creativity can arise from computational processes, then the distinction between human and artificial creativity becomes less clear. This raises profound questions about the nature of creativity and originality, and whether these qualities can truly be replicated by machines.

In this context of intersection, we are raising important questions about the nature of authorship, authenticity, and technological dependence. These challenges not only affect creators and consumers of artwork but also have profound implications for the development of soft skills in education. The following table 1 presents a detailed comparison of the soft skills that students can acquire by

analyzing and reflecting on these ethical and philosophical challenges, providing specific examples and academic references that underline the importance of these competencies in modern education.

Tabla 1. Desarrollo de Soft Skill en context CA en educación/Table 1. Development of Soft Skills in AC Context in the education.

Soft Skill	Description	Associated Challenge	Example/Case Study	References
Critical Thinking	Evaluate and analyze information objectively to make informed decisions.	Questioning the authenticity and value of works created by AI; Assess intellectual property rights.	To discuss the authorship of the portrait Edmond de Belamy and its value compared to works of human art.	(Bostrom, 2014; Brynjolfsson & McAfee, 2016)
Ethics and Responsibility	Understand and apply ethical principles in various situations.	Determine the intellectual property of works created by AI; Avoid over-reliance on artificial creativity.	Analysis of how copyright law applies to AI-generated works and the need for new regulations.	(Brynjolfsson & McAfee, 2016)
Creativity	Generate new and original ideas and be able to adapt to new situations.	The potential erosion of human creativity due to reliance on AI to generate innovative ideas.	Discussion about whether machines can be truly creative or simply follow predefined algorithms.	(Bostrom, 2014)
Communication	Express ideas clearly and effectively, both orally and in writing.	Articulate and debate the blurred line between the human and the artificial in creativity.	Presentations and class discussions on the nature of creativity and originality in the context of artificial intelligence.	(Bostrom, 2014; Brynjolfsson & McAfee, 2016)
Problem-Solving	Identify and resolve problems effectively.	Navigating the legal and ethical complexities of intellectual property and authenticity in AI-created works.	Specific case studies where AI has generated ethical controversy, such as the portrait Edmond de Belamy.	(Bostrom, 2014; Brynjolfsson & McAfee, 2016)
Collaboration	Work effectively with others to achieve a common goal.	Foster a collaborative vision between humans and machines to enhance collective creativity.	Team projects where students use AI tools to create works of art or music, reflecting on the collaboration between human and artificial creativity.	(Bostrom, 2014; Brynjolfsson & McAfee, 2016)
Philosophical Thought	Reflect on fundamental questions about existence, knowledge, and ethics.	Explore what it means to be creative in a world where the line between human and artificial is blurred.	Philosophical class discussions about whether creativity can arise from computational processes and what this implies for human creativity.	(Bostrom, 2014)
Adaptability	Be flexible and adapt to new situations and changes.	Adapt to changes in the perception of creativity and the value of AI-generated works.	Analyze how technological innovations are changing existing legal and economic structures and how to adapt to these changes.	(Bostrom, 2014; Brynjolfsson & McAfee, 2016)

This table highlights how students can develop various soft skills through analysis and reflection on the ethical and philosophical challenges of AC, using specific case studies and relevant academic references. A specific case that illustrates the ethical controversies surrounding artificial creativity is

the use of AI in the creation of works of art. For example, the portrait Edmond de Belamy created by the French collective Obvious using an AI algorithm, was sold at a Christie's auction for $432,500 in 2018. This event generated a significant debate about the nature of authorship and the value of machine-generated works.



Figura 1. Edmond De Belamy © Obvious. Source: https://obvious-art.com/portfolio/edmond-de-belamy/
Figure 1. Edmond De Belamy © Obvious. Source: https://obvious-art.com/portfolio/edmond-de-belamy/

The sale of the portrait raised several questions: Should the Obvious collective be considered the author of the work, or should it be attributed to the algorithm they used? And how is a work created by a machine valued compared to one created by a human artist? These dilemmas reflect the need for a re-evaluation of the concepts of authorship and value in the context of AC.

Edmond de Belamy was created using an AI algorithm known as a Generative Adversarial Network (GAN). The creative process began with training the algorithm on a database of historical portraits, which allowed the AI to learn and replicate traditional art styles. The result was an image that combines elements of Renaissance portraiture with a touch of digital abstraction. The sale of this work at a prestigious auction house such as Christie's marked a milestone at the intersection of art and technology, bringing the discussion about the authorship and value of AI-generated art to the forefront.

One of the central dilemmas posed by the sale of Edmond de Belamy is the question of authorship. In the case of works created by AI, the question is whether authorship should be attributed to the Obvious collective, which developed the algorithm and selected the training parameters, or to the algorithm itself. Traditionally, the authorship of a work of art has been associated with creativity and human intention. However, in this case, AI played a crucial role in generating the artistic content, complicating the assignment of authorship. Copyright law, which protects human creations, is not adapted to address works produced by algorithms.

The valuation of an AI-created work of art raises another set of ethical questions. In the art market, the value of a work is based not only on its aesthetic quality, but also on its historical context, the artist's reputation, and authenticity. With Edmond de Belamy, the question arises as to whether a machine can create a work with the same artistic value as one created by a human being. The sale of the portrait for a considerable sum suggests that the art market is willing to recognize and value AI-generated creations, but it also questions whether this valuation is based on traditional criteria of authenticity and creativity or a new perspective on digital art.

The case of Edmond de Belamy highlights the need to reevaluate the traditional concepts of authorship and creativity. If machines can generate artwork that is indistinguishable from those created by humans, the definition of authorship must be expanded to include collaboration between humans and algorithms. This also raises questions about originality: if an AI can create something new based on existing data, how "original" is it? These issues require continued debate and possible reform in laws and practices related to intellectual property and art.

The impact of this case on the art market is significant. The acceptance and sale of AI-generated artwork at a reputable auction house like Christie's can set a precedent for the recognition of machine-

created works in the art market. This could open up new opportunities for digital artists and AI developers, but it could also challenge traditional notions of value and authenticity in art.

The case raises important questions about authorship, value, and authenticity in the context of artificial creativity. By challenging traditional concepts of authorship and value in art, this case underscores the need for a continuous reevaluation of our norms and practices in response to technological advances. The integration of AI into artmaking is not only redefining the way art is produced and valued, but it is also driving a crucial dialogue about the nature of creativity in the digital age.

¿Can Machines Be Imaginative?

The question of whether machines can possess true imagination or simply simulate creative processes is a central issue in the study of AI. Human imagination involves the ability to create new ideas, concepts, or mental images without the need for direct external stimuli. In contrast, imagination in AI could be defined as the ability to generate novel ideas or content from pre-existing patterns and data.

Human imagination is a complex process that allows for the creation of new ideas and concepts, often without relying on immediate external stimuli. This process includes the ability to visualize things that are not present in the physical environment, combine concepts in novel ways, and generate creative solutions to problems (Boden, 1998). In AI, imagination manifests itself through algorithms that process and reconfigure pre-existing data to produce novel results. While these results may seem creative, the question is whether this process can be considered true imagination.

In this context, artificial imagination can be understood as the ability of machines to identify patterns in large data sets and generate innovative results from them. A discussion has been made through several studies as shown in table 2. This does not necessarily imply a conscious ability to imagine, but a simulation of human creative processes.

Tabla 2. Comparativa Autor Análisis: Imaginación Humana vs. Imaginación Artificial
Table 2. Comparative Author Analysis: Human Imagination vs. Artificial Imagination.

Author	Concept	Description	Focus on Human Imagination	Focus on Artificial Imagination
(Boden, 1998)	Creative Imagination	Boden defines imagination as the ability to generate new and original ideas by recombining existing concepts. The human imagination can produce innovative ideas without immediate external stimuli.	Human imagination is a complex cognitive process that combines elements in novel ways, based on a deep understanding of concepts and contexts.	Artificial imagination is a simulation based on pre-existing data; Machines reconfigure patterns without having a creative conscience.
(Chomsky, 2005)	Creativity and Language	Chomsky argues that creativity in language is an innate characteristic of human beings, related to the ability to generate and understand complex linguistic structures.	Human creativity in language is based on an innate competence that allows the production and understanding of new sentences.	Artificial creativity in language is limited to algorithms that manipulate pre-existing data and generate text based on learned patterns.
(Gelernter, 1994)	Artificial Intelligence and Creativity	Gelernter explores the relationship between artificial intelligence and creativity, suggesting that although machines can perform tasks that seem creative, they do not possess true creative capacity or imagination in the human sense.	Human creativity includes intuition and a sense of purpose that machines don't replicate.	AI creativity is a simulation based on data and pattern processing, with no conscious understanding or internal purpose.
(Searle, 1992)	Consciousness and Computation	Searle argues that awareness and understanding are necessary for genuine creativity. He argues that machines, despite their ability to process information, lack true consciousness and, therefore, true creativity.	The human imagination is intrinsically linked to consciousness and subjective experience.	AI can simulate creativity, but it lacks consciousness and subjectivity, limiting its ability to experience true imagination.
(Dennett, 1995)	Philosophy of Mind and Creativity	Dennett believes that creativity is a function of the human brain that arises from complex cognitive processes. The human imagination is	The human imagination is a product of the interaction of complex cognitive processes,	Artificial creativity is based on the reconfiguration of data, without the depth of human cognitive processes,

	based on the interaction of various mental capacities.	including experience and knowledge.	and lacks the richness of subjective experience.

The comparison between human imagination and artificial imagination reveals fundamental differences in the nature and creative capacity of both. Boden (1998) and Gelernter (1994) emphasize that the human imagination is an inherently complex and multifaceted process, which combines concepts in novel ways and produces original ideas without relying on immediate external stimuli.

This process is based on a deep understanding of context and an ability to visualize and create new concepts that are not present in the physical environment. In contrast, artificial imagination, as Boden (1998) defines it, manifests itself through algorithms that reconfigure pre-existing data to generate results that may seem creative but do not come from a creative consciousness. AI algorithms identify patterns in large datasets and generate groundbreaking results based on these patterns but without a conscious ability to imagine or understand context subjectively.

Chomsky (2005) and Searle (1992) reinforce this difference by arguing that human creativity is linked to innate capacities and consciousness. Chomsky suggests that creativity in human language is the product of innate linguistic competence, while Searle argues that true creativity requires consciousness, something that machines do not possess. Thus, AI, while it can generate text and outputs that mimic creativity, lacks the depth and understanding that characterizes the human imagination.

Dennett (1995) approaching creativity from a philosophical perspective, he adds that the human imagination arises from the interaction of multiple complex cognitive processes. By comparison, artificial creativity is limited to the reconfiguration of data and patterns without the enrichment of subjective experience or consciousness that humans possess.

Although AI can simulate aspects of creativity by processing and reconfiguring data, true human imagination includes a dimension of consciousness, understanding, and subjective experience that cannot currently be replicated by machines. Artificial imagination is still an advanced simulation of creative processes, but it does not reach the depth and complexity of human imagination. This analysis highlights the need to distinguish between human creative capabilities and AI-produced simulations of creativity, recognizing both the technological advances and inherent limitations of artificial intelligence.

As recent studies and developments of this, we have three example. The first one is Google's DeepDream that is a computer vision program that uses convolutional neural networks to find and enhance patterns in images, resulting in visual creations that look like "dreams." This project demonstrates how machines can transform visual data into ways that humans perceive as imaginative, although in reality, it is the manipulation of pre-existing patterns (Mordvintsev et al., 2015). The second is OpenAI's GPT-3, this is the famous advanced language model that can generate coherent text, answer questions, write essays, and create stories from initial prompts. This model uses a vast corpus of pre-existing text to generate new combinations of words and phrases, which can give the impression of creativity and imagination (Brown et al., 2020). And the last one is Google Brain's Magenta, this project explores how AI can assist and expand human creativity in music and art. Using deep learning techniques, Magenta can generate original music and art, collaborating with human artists to create innovative works (Roberts et al., 2019).

Tabla 3. Comparación de Estudios Recientes y Avances en Creatividad Artificial.
Table 3. Comparison of Recent Studies and Developments in Artificial Creativity.

Aspect	DeepDream de Google	GPT-3 de OpenAI	Magenta de Google Brain
Description	Computer vision program that uses convolutional neural networks to find and enhance patterns in images, creating visual creations that look like "dreams."	Advanced language model that generates coherent text, answers questions, writes essays, and creates stories from initial prompts.	A project that explores how AI can assist and expand human creativity in music and art, generating original works and collaborating with human artists.
Main Technique	Convolutional neural networks	Language model based on transformative neural networks	Deep Learning
Creative Results	Visual images that look like "dreams"	Coherent text, essays, stories	Original music and art
Working Principle	Enhances patterns in pre-existing visual data	Uses a vast corpus of pre-existing text to generate new combinations of words and phrases	Generate content by collaborating with human artists using deep-learning techniques
Perception of Creativity Philosophical Implications	Transforming visual data into forms perceived as imaginative Question originality and authenticity in machine-generated art	Text generation that gives the impression of creativity and imagination Challenges the notion of human creativity by producing coherent and compelling text	Generation of innovative works in music and art Explore human-machine collaboration to empower human creativity
Featured Use Cases	Digital Art Creation and Creative Visualizations	Automatic redaction, advanced chatbots, content generation	Music composition, digital art creation, tools for human artists
Significant Contributions	Demonstration of how machines can manipulate pre-existing visual patterns to create art	Advances in automatic text generation and natural language understanding	Expanding creative possibilities in music and art through collaboration between AI and humans
Key Researchers Impact on Human Creativity	(Mordvintsev et al., 2015) Facilitates new forms of visual expression through the manipulation of pre-existing patterns	(Brown et al., 2020) It offers advanced tools for the creation of written content, facilitating creative tasks	(Roberts et al., 2019) Expands human creative capabilities by providing new tools and collaborations in art and music

Speculative Futures and Artificial Creativity

But can a computer dream? Could an AI possess imagination? Might they dream like us? The looming environmental and social crises, with signs of impending climate-related disasters on our planet, compel us to revisit our cosmological origins as a specie to explore our inner connections to save our future. It seems that the Anima Mundi (Sato, 2017) has withdrawn into the shadows of this world and its spacetime, leaving humanity to confront the challenge of survival on its own. In response, smart computers, AI devices, and human-like robots are being developed as potential solutions to address these crises. But, why are we seeking this imaginative connection with these silicon artifacts? Are we searching for a form of 'out of the box' answer?

There is no doubt about the transformative and innovative power of AI in shaping the future of work and creativity. As AI becomes increasingly capable of performing complex cognitive tasks, fear and uncertainty about the future of skills and employment are rising (Bozic Yams & Aranda Muñoz, 2021). This scenario gives us continuous mainstream media debates and popular sci-fi series about these dystopian projections. While research supports some concerns about machines replacing humans, these fears are often biased and mixed with a limited understanding of AI and unrealistic expectations of its potential, sometimes attributing it with almost magical capabilities (Saffari et al., 2021).

A major challenge we are facing today is that technology has progressed more rapidly than our ability to adapt and it is going to increase it. Moving forward, our focus should shift from merely developing new technology to improving how people interact with it and creating platforms to increase quality of life. This requires a significant push in education, organizational transformation, and workforce reskilling (Mangion & Scicluna, 2022). Universities and productive organizations will need to find effective ways to engage employees in discussions about the future of their work. This is not only raising awareness and understanding of AI and other digital technologies but also transforming employees' apprehensions about being replaced into enthusiasm for the new opportunities that technology can create. By doing so, teams can enhance productivity, foster innovation, and improve overall well-being (Marchese et al., 2023).

The combination of cooperative platforms and machine learning techniques are moving the evaluation of state-of-the-art of learning algorithms in artificial creativity using deep neural networks to create novel digital and virtual worlds. This shows how embedding technological agents are influencing

languages, creating new symbols among human and technological minds. To understand the use of AI platforms in creativity, speculative research should examine how individual performance in AI relationships translates to the group or organization's digital performance and experience (Srinivasan, 2024). Creating these models of languages would detonate a new era of Generative AI and Neural Networks that create universes of data with realistic output applications in art, music, management, and economics (E. Zhou & Lee, 2024).

Using AI tends to increase the average originality of ideas, which can be beneficial for team performance when integrating additive idea-generation processes. This is due to the multifaceted nature of the creative process, which involves numerous subtasks from idea generation and evaluation to development and final product completion (Grilli & Pedota, 2024). The key advantage arises when we understand how to apply AI effectively and when to maximize individual and team creativity performance. Exploring the interconnection between AI, individual, and team creativity performance should be a vital area of research, spanning the entire continuum of creativity within organizations (Dutta & Mishra, 2023).

Future research should focus on understanding the integration of AI as a tool for creativity at various levels: individuals, teams, organizations (Grilli & Pedota, 2024), and communities. This approach requires comparing the generative processes of AI and humans and reflecting on their characteristics and effects on creativity. This emerging research area will present numerous questions, such as the implications of computer-assisted design for artistic professions or the creation of decision-making scenarios for managers. New technologies introduce new variables and often bring qualitative changes in how we live, work, and interpret reality.

Final Thoughts

The possibility of AI possessing true imagination remains an open question. While AI can generate creative content that appears to stem from genuine imagination, these capabilities are currently understood to result from advanced algorithms and neural networks processing pre-existing human data. However, the impact of AI on human creativity is undeniable. AI can serve as a powerful tool to enhance and expand human creative capacities, offering new forms of expression and collaboration. However, one day could we transfer our dreams, anxieties, and nightmares as well? We hope so.

As final thoughts, we believe that the exploration of creativity and imagination is a profound and intimate quest that spans diverse fields, presenting both exciting opportunities and significant challenges. As we advance into this technological age, it is crucial to continue researching and reflecting on these topics to better understand the implications of artificial creativity and its role in our world.

While technology can enhance creativity, it is essential to remember the profound connections among all beings in our shared reality—plants, animals, humans—and the tools and technologies we create. This interconnectedness is revealed through the natural world that surrounds us, a dual world that touches us every second through air, water, fire, and earth (Sato, 2017). Computers, silicon, neural connections, AI, and future technologies are all integral parts of this interconnected whole.

We need to cultivate a new elemental consciousness and reconnect with our imagination. In doing so, nature and technology will converge into a unified space infused with the omnipresent life force of all living things, rather than being fragmented by the consumption-driven system (Huanca, 2019). Even the most advanced technologies, including AI, are integral parts of this interconnected whole. It is humanity's task to navigate, create and advance within these elemental settings, recognizing the vital thread that permeates all of creation (Berchez et al., 2015). Perhaps the questions raised by AI are an opportunity to conceive of a higher purpose for humanity—one that transcends mere production and moves toward a more profound entanglement of humans, the planet, and technology.

CHAPTER 4

HERITAGE

CAPÍTULO 4 ***PATRIMONIO***

ESTRATEGIAS DE PRESERVACIÓN DEL CEMENTERIO BRITÁNICO DE MADRID. UN RECORRIDO TURÍSTICO POR EL CEMENTERIO
PRESERVATION STRATEGIES OF THE BRITISH CEMETERY IN MADRID. A TOURIST TOUR THROUGH THE CEMETERY

Ana Girbés Baroja
Graduada en Conservación y Restauración de bienes culturales, por la Universitat Politècnica de València. Especialista en Restauración de Escultura y Arqueología. Máster de Restauración Patrimonial en la Universidad Complutense. Restauradora de Patrimonio Nacional. España. E-mail: ana.girbes.baroja@gmail.com
Marta Girbés Baroja
Graduada en Filosofía y Letras, por la Universidad de Valencia. Máster en la Universidad Complutense. España. E-mail: marta.girbes.baroja@gmail.com
Jorge Girbés Pérez
Profesor Titular de Universidad. Arquitecto Técnico por la UPV, Doctor Arquitecto por la UPV por la Tesis: Arquitectura Ecléctico-funeraria de la Ciudad de Valencia. El Cementerio General de Valencia. España. E-mail: jgirbes@ega.upv.es

Miembros de las Redes Española e Iberoamericana de Cementerios Patrimoniales.

Abstract

The British Cemetery in Madrid, founded in 1854 and owned by the British Government, has played a significant role in the city's history. Initially created to provide a resting place for non-Catholic British citizens living in Madrid, this cemetery has evolved to become a cultural and architectural testimony.

For this work, various studies have been carried out on the environment of the Community of Madrid, which is essential to understand the region in its entirety, including its history, geography, economy, culture and society. An analysis of the vulnerability of the property to different threats of natural origin, crucial for its conservation and protection and thus achieving an understanding of how different natural risks could affect its integrity and heritage value. A study of local climatic conditions and possible risks of anthropic origin, together with an approximation of the environmental factors that are in constant contact with the property, thus being the main agents of deterioration that act on it. And finally, a study of the state of conservation in which the cemetery is located.

Carrying out a diagnosis of the asset, which emphasizes the main dangers and threats faced by the asset selected as a case study. After this, the preservation measures, enhancement strategies and registration process of this cultural heritage will be developed.

As well as a proposal for a tourist-cultural tour of the cemetery.

The study has highlighted the importance of the cemetery from a historical and cultural perspective by documenting the lives of the personalities buried there and their impact on local and transnational history. This method increases public awareness of the value of the cemetery by emphasizing its historical and cultural value.

Urban pressures, vandalism and lack of public awareness are some of the threats and challenges facing the conservation of the cemetery. These threats require a well-planned conservation strategy that includes physical preservation and restoration actions, as well as public awareness programs to engage the community and ensure its continued support.

Keywords
British Cemetery, Heritage, Protection, Vandalism, Urban Planning

Introducción

Este trabajo se aborda el estudio del Cementerio Británico de Madrid. Se realizará un estudio de este caso con la finalidad de elaborar un plan integral de conservación y promoción sostenible para así preservar su valor patrimonial y promover su reconocimiento como parte relevante del patrimonio histórico y cultural.

Se realizará una investigación histórica detallada, y se evaluará el estado de conservación del bien, identificando áreas de deterioro, riesgos potenciales y necesidades de conservación, para así identificar las amenazas y desafíos a los que se enfrenta, con la finalidad de establecer una propuesta de conservación, en la que se desarrollarán estrategias específicas para la conservación a largo plazo del cementerio. También se pretende elaborar un plan de gestión que incluya aspectos como la protección legal, mantenimiento, y difusión cultural.

En el cementerio se pueden encontrar tumbas, mausoleos y panteones de interés patrimonial. En este trabajo se han recopilado datos e información necesaria que ha permitido plantear una propuesta de conservación y gestión del bien objeto de estudio. También se aporta información sobre el tipo de protección legal bajo el que se encuentra.

Así mismo, a través de este tipo de monumentos y obras funerarias se muestra la muerte en la historia de las civilizaciones y cómo es entendida en las diversas religiones enfocadas desde las distintas geografías o culturas. La visión de Occidente se fija en la ideología del culto a la muerte.

El Cementerio Británico de Madrid, fundado en 1854 y propiedad del Gobierno Británico, ha tenido un papel significativo en la historia de la ciudad. Inicialmente creado para proporcionar un lugar de descanso a ciudadanos británicos no católicos que vivían en Madrid, este cementerio ha evolucionado para convertirse en un testimonio cultural y arquitectónico.

Rodeado de jardines de estilo inglés, el Cementerio Británico es un espacio sereno que contrasta con la vibrante vida de la ciudad. Entre las tumbas y monumentos destacados se encuentra el panteón de la familia Bauer, una familia judía importante en la historia religiosa de España. La familia Bauer inauguró la primera sinagoga en España tras la expulsión de los judíos por los Reyes Católicos. Su monumento funerario, diseñado por el arquitecto Fernando Arbós y Tremanti, añade una dimensión arquitectónica notable al cementerio.

David John Butler, vocal de la comisión gestora, se encarga de la preservación y gestión del cementerio, promoviendo su relevancia cultural y arquitectónica. El cementerio no solo es un lugar de descanso, sino también un testimonio de la rica historia y diversidad cultural en Madrid.

Se han realizado diversos estudios, del entorno de la Comunidad de Madrid, fundamental para comprender la región en su totalidad, incluyendo su historia, geografía, economía, cultura y sociedad. Un análisis de vulnerabilidad del bien ante diferentes amenazas de origen natural, crucial para su conservación y protección y así conseguir la comprensión de cómo diferentes riesgos naturales podrían afectar su integridad y valor patrimonial. Un estudio de las condiciones climáticas locales y los posibles riesgos de origen antrópico, junto con una aproximación de los factores ambientales que están en constante contacto con el bien, siendo así los principales agentes de deterioro que actúan sobre este. Y finalmente un estudio del estado de conservación en el que se encuentra el cementerio.

Una vez realizados estos estudios, se procedió a la realización de un diagnóstico del bien, en el que se enfatizan los principales peligros y amenazas al que se enfrenta el bien seleccionado como caso de estudio. Tras esto se procederá al desarrollo de las medidas de preservación, estrategias de puesta en valor y proceso de registro de este patrimonio cultural.

Finalmente, se ha realizado un estudio de la normativa tanto nacional como internacional que protege a este bien. A pesar de que no existen disposiciones específicas que se refieran exclusivamente a este cementerio en la legislación británica, su protección y conservación son una combinación de marcos legales y acuerdos internacionales.

Introduction

This work addresses the study of the British Cemetery in Madrid. A study of this case will be carried out with the purpose of developing a comprehensive conservation and sustainable promotion plan in order to preserve its heritage value and promote its recognition as a relevant part of the historical and cultural heritage.

A detailed historical investigation will be carried out, and the state of conservation of the property will be evaluated, identifying areas of deterioration, potential risks and conservation needs, in order to identify the threats and challenges it faces, with the purpose of establishing a proposal for conservation, in which specific strategies will be developed for the long-term conservation of the cemetery. It is also intended to develop a management plan that includes aspects such as legal protection, maintenance, and cultural dissemination.

In the cemetery you can find tombs, mausoleums and pantheons of heritage interest. In this work, data and necessary information have been collected that have allowed us to propose a proposal for the conservation and management of the property under study. Information is also provided about the type of legal protection under which it is found.

Likewise, through this type of monuments and funerary works, death is shown in the history of civilizations and how it is understood in the various religions focused from different geographies or cultures. The vision of the West is fixed on the ideology of the cult of death.

The British Cemetery in Madrid, founded in 1854 and owned by the British Government, has played a significant role in the city's history. Initially created to provide a resting place for non-Catholic British citizens living in Madrid, this cemetery has evolved to become a cultural and architectural testimony.

Surrounded by English-style gardens, the British Cemetery is a serene space that contrasts with the vibrant life of the city. Among the notable tombs and monuments is the pantheon of the Bauer family, an important Jewish family in the religious history of Spain. The Bauer family inaugurated the first synagogue in Spain after the expulsion of the Jews by the Catholic Monarchs. Its funerary monument, designed by architect Fernando Arbós y Tremanti, adds a notable architectural dimension to the cemetery.

David John Butler, member of the management committee, is responsible for the preservation and management of the cemetery, promoting its cultural and architectural relevance. The cemetery is not only a place of rest, but also a testimony to the rich history and cultural diversity in Madrid.

Various studies have been carried out on the environment of the Community of Madrid, which is essential to understand the region in its entirety, including its history, geography, economy, culture and society. An analysis of the vulnerability of the property to different threats of natural origin, crucial for its conservation and protection and thus achieving an understanding of how different natural risks could affect its integrity and heritage value. A study of local climatic conditions and possible risks of anthropic origin, together with an approximation of the environmental factors that are in constant contact with the property, thus being the main agents of deterioration that act on it. And finally a study of the state of conservation of the cemetery.

Once these studies were carried out, a diagnosis of the property was carried out, which emphasized the main dangers and threats faced by the property selected as a case study. After this, the preservation measures, enhancement strategies and registration process of this cultural heritage will be developed.

Finally, a study has been carried out on both national and international regulations that protect this property. Although there are no specific provisions referring exclusively to this cemetery in British law, its protection and conservation are a combination of legal frameworks and international agreements.

In Hispanic culture, we recognize this relationship from the pain, loss and suffering of a loved one. "In Judeo-Christian culture, to this day, death has been considered something painful, which is why it has been denied, becoming a topic that is definitely not talked about" (Blaya, Pérez, and Gil s. f.).



Imagen 1. Fachada a la Calle Image 1. Street Facade

En la cultura hispana, reconocemos esta relación desde el dolor, pérdida y sufrimiento de un ser querido "En la cultura judeocristiana, hasta el día de hoy, la muerte ha sido considerada como algo doloroso, razón por la cual ha sido negada, convirtiéndose en un tema sobre el que definitivamente no se habla" (Blaya, Pérez, y Gil s. f.).

En la cultura anglosajona la muerte es comprendida desde una actitud más fría, pasiva, menos ligada que la en la cultura hispana. Esto se traduce en ritos funerarios alegres y a la proyección de dotaciones como áreas de esparcimiento y recreación en la ciudad. La visión del cementerio es de un espacio lúdico-paisaje, una visión más romántica.

Antecedentes y estado de la Cuestión. Aproximación al Tema.

Algunos de los estudios previos realizados sobre la conservación del patrimonio cultural, la gestión de cementerios históricos, y la preservación de lugares de interés arquitectónico en España y en otros países son:

- Investigaciones sobre conservación de patrimonio cultural, como estudios generales que abordan métodos, estrategias y desafíos relacionados con la preservación de monumentos históricos, sitios culturales y cementerios en diversas ubicaciones, que pueden llegar a proporcionar un marco teórico útil para comprender la importancia de preservar el Cementerio Británico de Madrid.

- Estudios locales sobre patrimonio y conservación en Madrid, principalmente se han encontrado investigaciones enfocadas en el patrimonio histórico-cultural de Madrid, que podrían mencionar o contextualizar la importancia del Cementerio Británico dentro del panorama del patrimonio local.

- Estudios sobre gestión de cementerios históricos: documentos que exploran la gestión, conservación y preservación de cementerios históricos en diferentes contextos geográficos.

- Trabajos académicos sobre patrimonio arquitectónico y relaciones culturales transnacionales, hay estudios que examinan el patrimonio arquitectónico y cultural en contextos transnacionales, aunque podrían no mencionar directamente el caso específico del Cementerio Británico de Madrid.

Los estudios previos sobre conservación del patrimonio cultural, gestión de cementerios históricos y relaciones culturales transnacionales pueden proporcionar un marco conceptual y práctico para abordar la preservación y gestión de este importante sitio histórico y cultural. Estos estudios pueden servir como punto de partida para futuras investigaciones y acciones dirigidas a promover la conservación y valoración de los Cementerios.



Imágenes 2-3. Detalle e Interior Cementerio Images 2-3. Detail and Interior Cemetery

In Anglo-Saxon culture, death is understood from a colder, passive, less connected attitude than in Hispanic culture. This translates into joyful funeral rites and the projection of facilities as leisure and recreation areas in the city. The vision of the cemetery is of a ludic-landscape space, a more romantic vision.

Background and status of the Issue. Approach to the Topic.

Some of the previous studies carried out on the conservation of cultural heritage, the management of historic cemeteries, and the preservation of places of architectural interest in Spain and other countries are:

- Research on cultural heritage conservation, such as general studies that address methods, strategies and challenges related to the preservation of historical monuments, cultural sites and cemeteries in various locations, which can provide a useful theoretical framework to understand the importance of preserving the British Cemetery in Madrid.

- Local studies on heritage and conservation in Madrid, mainly research focused on the historical-cultural heritage of Madrid has been found, which could mention or contextualize the importance of the British Cemetery within the panorama of local heritage.

- Studies on the management of historic cemeteries: documents that explore the management, conservation and preservation of historic cemeteries in different geographical contexts.

- Academic works on architectural heritage and transnational cultural relations, there are studies that examine architectural and cultural heritage in transnational contexts, although they may not directly mention the specific case of the British Cemetery in Madrid.

Previous studies on cultural heritage conservation, management of historic cemeteries and transnational cultural relations can provide a conceptual and practical framework to address the preservation and management of this important historical and cultural site. These studies can serve as a starting point for future research and actions aimed at promoting the conservation and appreciation of Cemeteries.

Justificación y Delimitación del Estudio

El cementerio británico es un testimonio tangible del legado histórico y cultural británico en España. Su importancia y su valor arquitectónico lo convierten en un referente significativo del patrimonio cultural transnacional.

La preservación de este cementerio no solo resguarda la memoria de personas destacadas, sino que también contribuye a la comprensión de las relaciones entre el Reino Unido y España a lo largo de la historia.

Con este estudio se pretende que sea relevante en el ámbito de la conservación del patrimonio al ofrecer un caso de estudio específico que destaca los desafíos y oportunidades de preservar un espacio arquitectónico y cultural británico en suelo español. Además, el análisis de estrategias para su preservación puede ofrecer pautas y recomendaciones aplicables a otros sitios similares, fomentando la protección de espacios patrimoniales transnacionales.

En cuanto a la delimitación del trabajo, el estudio se centrará en este cementerio como caso de estudio principal, considerando su relevancia histórica y arquitectónica dentro del contexto del patrimonio británico en España. Se evaluará el estado actual de conservación del cementerio, considerando su arquitectura, elementos históricos, condiciones de preservación y desafíos a enfrentar para su mantenimiento a largo plazo.

Objetivos

El objetivo general de este trabajo es elaborar un plan integral de conservación y promoción sostenible del Cementerio Británico de Madrid que abarque aspectos legales, históricos, culturales y de gestión, con el fin de preservar su valor patrimonial y promover su reconocimiento como parte relevante del patrimonio histórico y cultural de la ciudad.

Así mismo, y centrándonos en la puesta en valor y conservación del Cementerio Británico de Madrid, los objetivos específicos son:

1. Analizar el marco normativo: Investigar y analizar la normativa española e internacional que afecta la conservación de cementerios extranjeros en España, con un enfoque específico en el Cementerio Británico de Madrid.

2. Evaluar el estado de conservación: Realizar una evaluación exhaustiva del estado actual del cementerio, identificando áreas de deterioro, riesgos potenciales y necesidades de conservación.

3. Estudio histórico y cultural: Realizar una investigación detallada sobre la historia del cementerio, destacando la importancia cultural y las personalidades relevantes enterradas allí, para resaltar su valor histórico.

4. Identificar amenazas y desafíos: Analizar las amenazas y desafíos específicos que enfrenta el Cementerio Británico en términos de conservación, como presiones urbanísticas, falta de conciencia pública, etc.

5. Propuesta de estrategias de conservación: Desarrollar estrategias específicas para la conservación a largo plazo del cementerio, incluyendo medidas de preservación física, restauración, gestión sostenible y programas de sensibilización.

6. Establecer colaboraciones: Identificar posibles colaboraciones con instituciones, organizaciones internacionales, entidades gubernamentales, ONG u otros actores relevantes para apoyar la conservación del Cementerio Británico.

7. Elaborar un plan de gestión: Diseñar un plan integral de gestión para el cementerio, que incluya aspectos como la protección legal, mantenimiento, difusión cultural y acciones para involucrar a la comunidad.

8. Evaluación de impacto y sostenibilidad: Desarrollar métricas para medir el impacto de las acciones de conservación y garantizar la sostenibilidad a largo plazo de las medidas propuestas.

Justification and Delimitation of the Study

The British cemetery is a tangible testimony of the British historical and cultural legacy in Spain. Its importance and architectural value make it a significant reference of transnational cultural heritage.

The preservation of this cemetery not only protects the memory of notable people, but also contributes to the understanding of the relations between the United Kingdom and Spain throughout history.

This study is intended to be relevant in the field of heritage conservation by offering a specific case study that highlights the challenges and opportunities of preserving a British architectural and cultural space on Spanish soil. Furthermore, the analysis of strategies for their preservation can offer guidelines and recommendations applicable to other similar sites, promoting the protection of transnational heritage spaces.

Regarding the delimitation of the work, the study will focus on this cemetery as the main case study, considering its historical and architectural relevance within the context of British heritage in Spain. The current state of conservation of the cemetery will be evaluated, considering its architecture, historical elements, preservation conditions and challenges to be faced for its long-term maintenance.

Goals

The general objective of this work is to develop a comprehensive conservation and sustainable promotion plan for the British Cemetery in Madrid that covers legal, historical, cultural and management aspects, in order to preserve its heritage value and promote its recognition as a relevant part of the heritage. historical and cultural of the city.

Likewise, and focusing on the enhancement and conservation of the British Cemetery in Madrid, the specific objectives are:

1. Analyze the regulatory framework: Investigate and analyze the Spanish and international regulations that affect the conservation of foreign cemeteries in Spain, with a specific focus on the British Cemetery in Madrid.

2. Evaluate the state of conservation: Conduct a thorough evaluation of the current state of the cemetery, identifying areas of deterioration, potential risks and conservation needs.

3. Historical and cultural study: Conduct detailed research on the history of the cemetery, highlighting the cultural importance and the relevant personalities buried there, to highlight its historical value.

4. Identify threats and challenges: Analyze the specific threats and challenges facing the British Cemetery in terms of conservation, such as planning pressures, lack of public awareness, etc.

5. Proposal for conservation strategies: Develop specific strategies for the long-term conservation of the cemetery, including physical preservation measures, restoration, sustainable management and awareness programs.

6. Establish collaborations: Identify possible collaborations with institutions, international organizations, government entities, NGOs or other relevant actors to support the conservation of the British Cemetery.

7. Prepare a management plan: Design a comprehensive management plan for the cemetery, which includes aspects such as legal protection, maintenance, cultural dissemination and actions to involve the community.

8. Impact and sustainability assessment: Develop metrics to measure the impact of conservation actions and ensure the long-term sustainability of the proposed measures.

Metodología

La metodología seguida en este trabajo se ha basado en los siguientes puntos:

- Revisión del marco teórico: identificación y recopilación de fuentes académicas, documentos históricos, legislación relevante y estudios previos sobre conservación del patrimonio arquitectónico británico en España, con énfasis en cementerios históricos. Revisión crítica de esta documentación para desarrollar un marco teórico sólido que abarque aspectos de conservación, legislación, valor patrimonial y estudios de caso similares.

- Estudio de caso. Cementerio Británico de Madrid: estudio detallado de la historia del cementerio, incluyendo su fundación, evolución arquitectónica, personajes ilustres enterrados, y relevancia cultural. Análisis de la importancia patrimonial, arquitectónica, artística, histórica y social del Cementerio Británico, identificando elementos vulnerables y necesidades de conservación.

- Diagnóstico y evaluación del estado actual. Estudio de campo: realización de visitas al cementerio para realizar un análisis in situ del estado de conservación, documentando su condición física, identificando áreas de deterioro y tomando registro fotográfico y audiovisual. Realizar entrevistas a expertos en conservación del patrimonio, autoridades locales, gestores del cementerio y usuarios, con el fin de obtener diferentes perspectivas sobre desafíos y oportunidades de conservación.

- Propuesta de estrategias de preservación: desarrollo de propuestas de conservación y gestión sostenible, considerando aspectos técnicos, financieros y sociales, incluyendo planes de acción a corto, mediano y largo plazo.

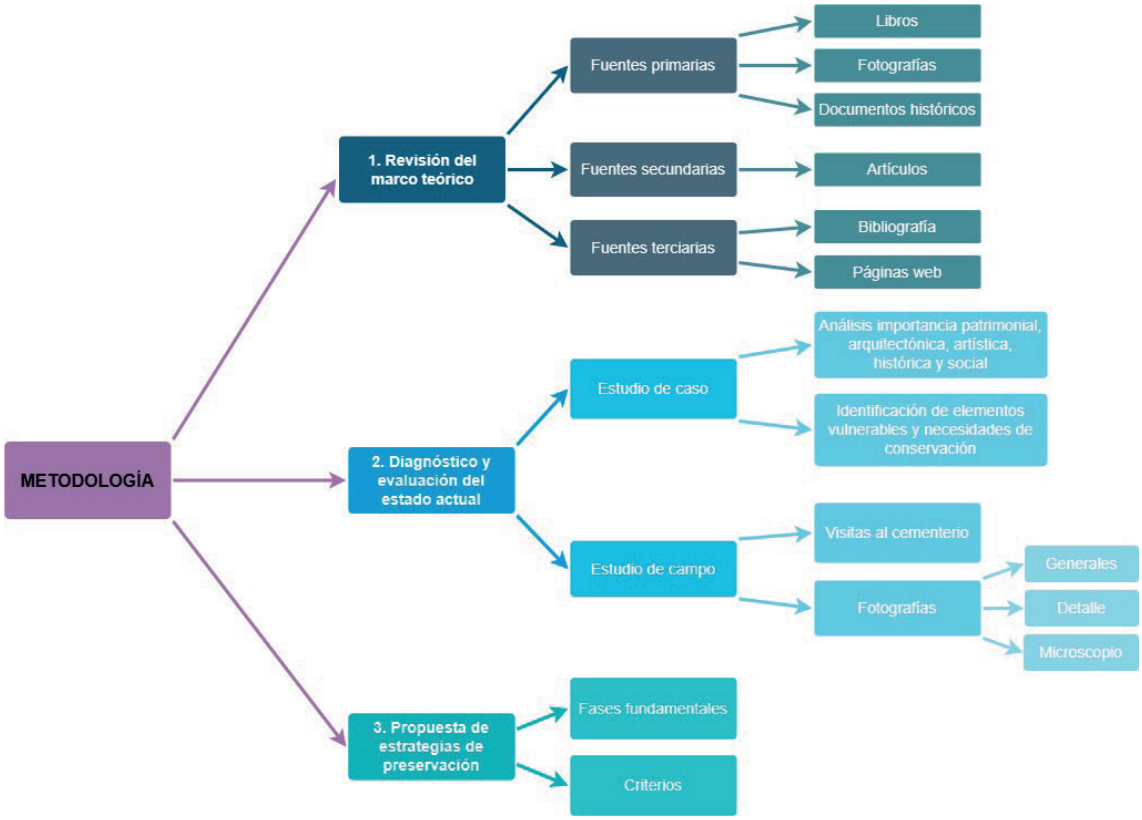


Imagen 4. Mapa conceptual en que se exponen de manera simplificada los puntos tratados en la metodología

Image 4. Conceptual map in which the points discussed in the methodology are presented in a simplified manner

Mapa conceptual en que se exponen de manera muy simplificada los puntos tratados en la metodología y su desarrollo.

Methodology

The methodology followed in this work has been based on the following points:

- Review of the theoretical framework: identification and compilation of academic sources, historical documents, relevant legislation and previous studies on the conservation of British architectural heritage in Spain, with emphasis on historic cemeteries. Critical review of this documentation to develop a solid theoretical framework covering aspects of conservation, legislation, heritage value and similar case studies.

- Case study. British Cemetery of Madrid: detailed study of the history of the cemetery, including its foundation, architectural evolution, illustrious people buried, and cultural relevance. Analysis of the heritage, architectural, artistic, historical and social importance of the British Cemetery, identifying vulnerable elements and conservation needs.

- Diagnosis and evaluation of the current state. Field study: carrying out visits to the cemetery to carry out an in-situ analysis of the state of conservation, documenting its physical condition, identifying areas of deterioration and taking photographic and audiovisual records. Conduct interviews with experts in heritage conservation, local authorities, cemetery managers and users, to obtain different perspectives on conservation challenges and opportunities.

- Proposal of preservation strategies: development of conservation and sustainable management proposals, considering technical, financial and social aspects, including short, medium and long-term action plans.

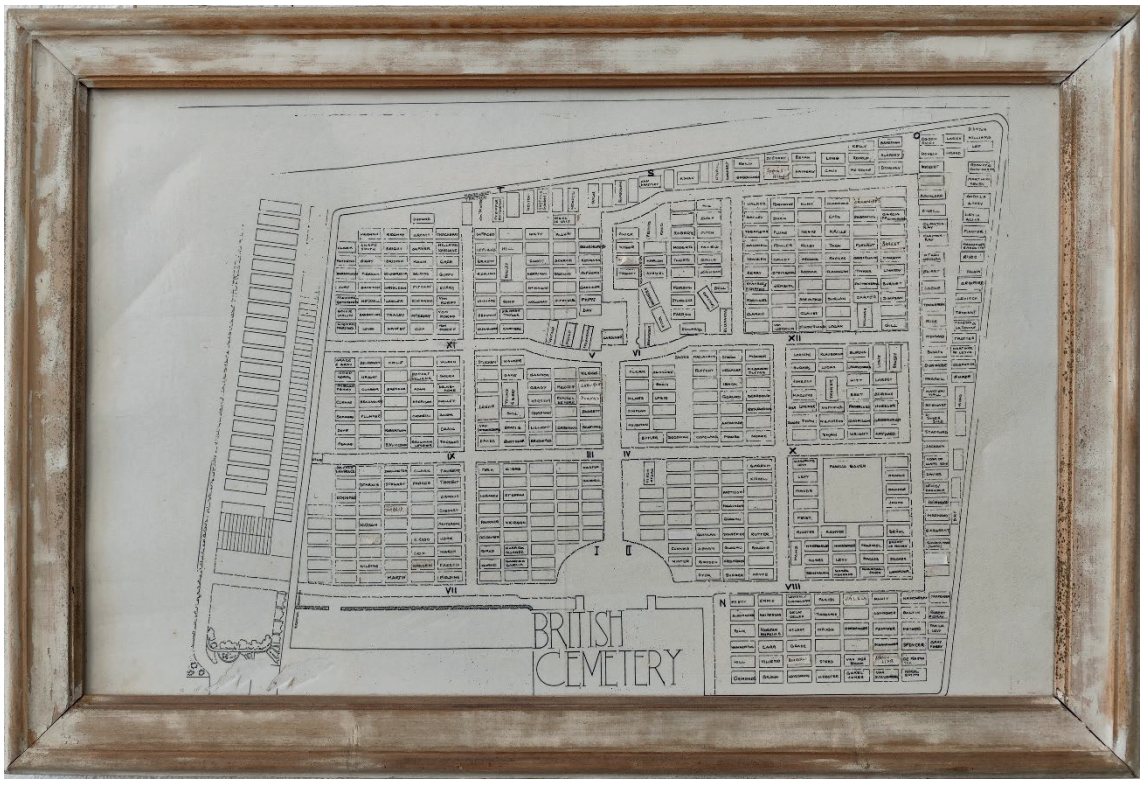


Imagen 5. Mapa del Cementerio a la entrada de este (fecha desconocida)

Image 5. Map of the Cemetery at its entrance (unknown date)

Conclusions

- The full assessment of the state of conservation of the cemetery has identified potential future risks and critical areas requiring immediate intervention. To ensure that resources are used efficiently and effectively, this analysis has been instrumental in prioritizing conservation actions.
- The study has highlighted the importance of the cemetery from a historical and cultural perspective by documenting the lives of the personalities buried there and their impact on local and transnational history. This method increases public awareness of the value of the cemetery by emphasizing its historical and cultural value.
- Urban pressures, vandalism and lack of public awareness are some of the threats and challenges facing the conservation of cemeteries around the world. These threats require a well-planned conservation strategy that includes physical preservation and restoration actions, as well as public awareness programs to engage the community and ensure its continued support.

Conclusiones

- La evaluación completa del estado de conservación del cementerio ha identificado posibles riesgos futuros y áreas críticas que requieren intervención inmediata. Para asegurarse de que los recursos se utilicen de manera eficiente y efectiva, este análisis ha sido fundamental para priorizar las acciones de conservación.
- El estudio ha destacado la importancia del cementerio desde una perspectiva histórica y cultural al documentar la vida de las personalidades enterradas allí y su impacto en la historia local y transnacional. Este método aumenta la conciencia pública del valor del cementerio al enfatizar su valor histórico y cultural.
- Las presiones urbanísticas, el vandalismo y la falta de conciencia pública son algunas de las amenazas y desafíos que enfrentan la conservación de los cementerios en todo el mundo. Estas amenazas requieren una estrategia de conservación bien planificada que incluya acciones físicas de preservación y restauración, así como programas de sensibilización pública para involucrar a la comunidad y asegurar su apoyo continuo. Con una granulometría bien graduada, se alcanzan escurrimientos similares con menor cantidad de aditivo.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- Ba Azkarate, A., Ruiz de Ael, M. J., & Santana, A. (2003). El patrimonio arquitectónico. País Vasco: Ediciones UPV. EHU. Recuperado de: http://cort.as/-ICEt
- "Building Regulations | Historic England." (2023, 1 de marzo). Historic England. Recuperado de https://historicengland.org.uk/advice/technical-advice/building-regulations/.
- Calvo, Guille Martin. (2019). La Protección Legislativa Del Patrimonio Cultural En El Reino Unido. Recuperado el 1 de enero de 2019, de https://www.academia.edu/42921821/La_protecci%C3%B3n_legislativa_del_Patrimonio_Cultural_en_el_Reino_Unido
- Cementerio británico en Madrid – Fundación Cementerios Británicos en España. Recuperado 3 de enero de 2024. https://britishcemeteriesspain.org/foundation/cementerio-britanico-en-madrid/
- Girbés, Jorge. (2020). La planimetría como herramienta de estudio de los cementerios, los concursos de las academias de Bellas Artes: el caso del Cementerio General de Valencia. En Ramírez-Sánchez M. y Rodríguez-Marín, F. (eds.), Cementerios patrimoniales y turismo: Una visión multidisciplinar (pp. 117-132). España: Síntesis editorial.
- Gutiérrez Restrepo, L. M. (2021). El patrimonio cultural funerario en Iberoamérica: aproximaciones al concepto desde declaraciones oficiales de la Red Iberoamericana de valoración y gestión de cementerios patrimoniales.
- Londoño, Juan Jose. (2005). Carta internacional de Morelia. Relativa a cementerios patrimoniales y arte funerario.

ANNI ALBERS: GEOMETRÍA Y COLOR EN SU OBRA

ANNI ALBERS: GEOMETRY AND COLOUR IN HER WORKS

Jorge García-Valldecabres
Investigador en el Dpto. Expresión Gráfica Arquitectónica*; Universitat Politècnica de València; Camino de Vera, s/n,* Building-B1*, 46022 Valencia, España. Profesor Titular de Universidad en la UPV. E-mail:* jgvallde@ega.upv.es
Escuela de Ingeniería de la Edificación, Centro de Investigación Arquitectura, Patrimonio y Gestión del Desarrollo Sostenible PEGASO (https://pegaso.webs.upv.es/) Grupo AG_BIM-PATRIMONIO.

Luis Cortés Meseguer
Investigador en el Dpto. de Construcciones Arquitectónicas*; Universitat Politècnica de València; Camino de Vera, s/n,* Building-C1*, 46022 Valencia, España.* Profesor Contratado Doctor en la UPV. *E-mail: luicorme@upv.es*
Escuela de Ingeniería de la Edificación, Centro de Investigación de Tecnología de la Edificación. cite@csa.upv.es

Li Liqun
Diseñadora / Designer and Student of PhD / Doctoral School Universitat Politècnica Valencia

Abstract

The study analyses the work of Anni Albers (1899-1994), through design, colour and the formal characteristics of her designs: lines, colours and geometry. The project focuses on two works in the 1960s whose visual effects are realised in parallel with Josef Albers (1888-1976); and a second analysis of textile design in the 1970s characterised by the study of the interaction of colour and patterns geometry. Both derive from certain didactic concepts of Anni Albers because of her collaboration at the School Bauhaus.

En el proyecto, los autores reflexionan sobre el concepto de que todas las cosas en el mundo pueden reducirse a simples líneas simbólicas, basadas en puntos, líneas y superficies, y sobre la relación entre planos y elevaciones. These elements, the shape and color represented, are underlined, interrelated, and influenced by each other. As well as the repetitions of the designs in the fabrics of the collection. Finally, from this study, the compositional fact is analyzed and graphically realized to understand the creative process of the artist.

Keywords

Colour, Pattern, Design, Textile, Architecture

Introducción

La Bauhaus fue una escuela de arte y diseño fundada en 1919 en Weimar (Alemania), por el arquitecto Walter Gropius. Su enfoque integraba las artes aplicadas, la arquitectura, el diseño gráfico, el diseño industrial y la artesanía, buscando la unificación de la forma y la función. La Bauhaus defendía la simplicidad, la geometría y el uso de materiales modernos, rechazando la ornamentación excesiva. A lo largo de su existencia, la escuela fue influenciada por destacados artistas y diseñadores como Paul Klee, Wassily Kandinsky y Mies Van der Rohe. Su legado sigue siendo fundamental en la educación y la práctica del diseño contemporáneo.

Si bien el diseño de telas ha dependido siempre del gusto estético de la época, marcado en gran parte por la Arquitectura, la Bauhaus fomentó una interacción que autoalimentaba el proceso creativo, facilitando la creación de patrones de diseño aplicables a la cerámica y otros materiales de acabado y decoración en la arquitectura. Su enfoque innovador promovió la colaboración entre artistas, diseñadores y arquitectos para crear soluciones funcionales y estéticamente coherentes, impulsando la industrialización del diseño y su accesibilidad a gran escala. A través de esta síntesis de arte y técnica, la Bauhaus dejó un legado duradero en la evolución del diseño moderno y la arquitectura contemporánea.

Objetivos

El estudio que se aborda en esta investigación trata del diseño de dos obras textiles concretas de Anni Albers, como los colores y las características formales del diseño (líneas, colores y formas geométricas). Ciertos conceptos pedagógicos tras la colaboración de la Bauhaus, un estudio de las interacciones del color y patrón, un análisis de los hechos compositivos, realizados digital y gráficamente, para comprender el proceso creativo del artista.

Una centrada en dos obras concretas de la etapa de los años sesenta Imagen 1 y 2. y la otra un segundo análisis del diseño textil de la década de los setenta Imagen 3 y 4.

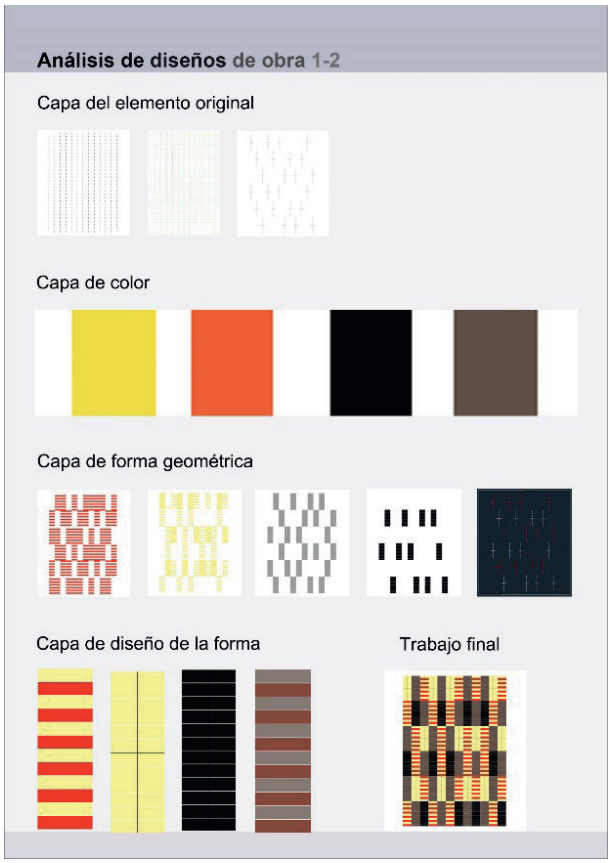


Imagen 2.
Image 2.

Introduction

The Bauhaus was a school of art and design founded in 1919 in Weimar, Germany, by the architect Walter Gropius. Its approach integrated applied arts, architecture, graphic design, industrial design and craftsmanship, seeking the unification of form and function. The Bauhaus advocated simplicity, geometry and the use of modern materials, rejecting excessive ornamentation. Throughout its existence, the school was influenced by leading artists and designers such as Paul Klee, Wassily Kandinsky and Mies van der Rohe. Their legacy remains central to contemporary design education and practice.

While fabric design has always depended on the aesthetic taste of the time, largely shaped by architecture, the Bauhaus fostered a self-feeding interaction with the creative process, facilitating the creation of design patterns applicable to ceramics and other decorative and finishing materials in architecture. Its innovative approach promoted collaboration between artists, designers and architects to create functional and aesthetically coherent solutions, driving the industrialisation of design and its accessibility on a large scale. Through this synthesis of art and technique, the Bauhaus left a legacy in the evolution of modern design and contemporary architecture.

Objectives

The study addressed in this research deals with the design of two specific textile works by Anni Albers, such as the colours and formal characteristics of the design (lines, colours and geometric shapes). Certain pedagogical concepts following the Bauhaus collaboration, a study of the interactions of colour and pattern, an analysis of the compositional facts, digitally and graphically realised, in order to understand the artist's creative process.

One focuses on two specific works from the 1960s Image 1 and 2. and the other a second analysis of textile design in the 1970s Image 3 and 4.

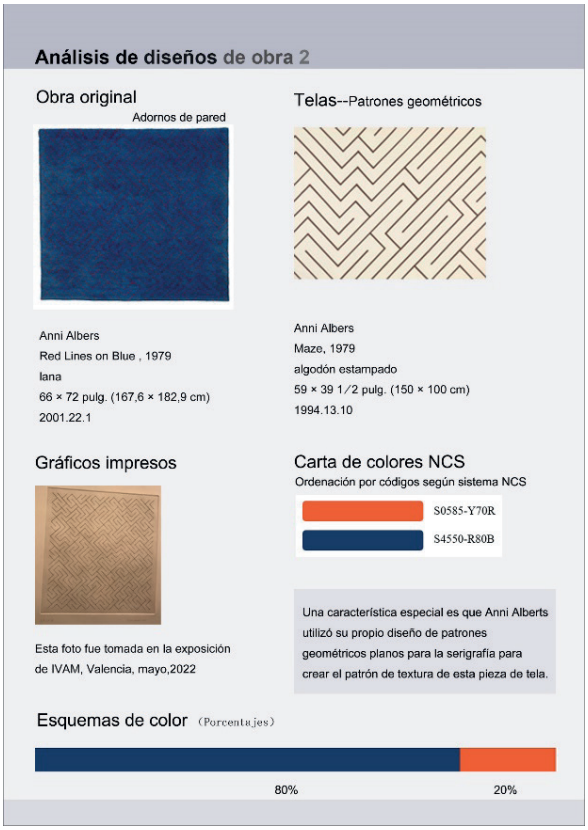


Imagen 3.

Image 3.

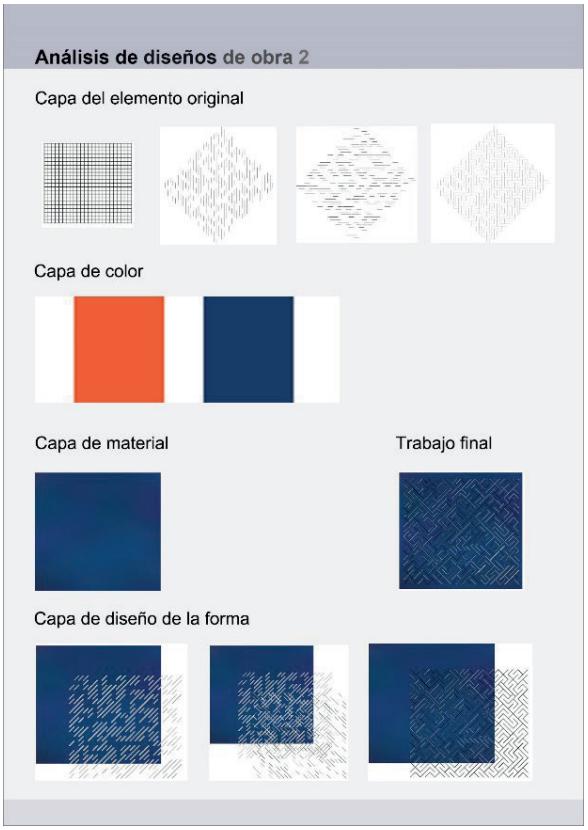


Imagen 4.
Image 4.

Plan del experimento y resultados

Las sencillas formas geométricas y las sutiles combinaciones de colores que caracterizan las obras textiles de Anne Albers, que en su conjunto parecen formar un cuadro perfecto de los efectos de la luz y la sombra, constituyen un profundo vínculo intrínseco entre la composición y la arquitectura y el diseño moderno. Un textil es una arquitectura, dice Anni Albers.

En la Visión, la geometría y el color son la división funcional de los límites del espacio visual. El diseño geométrico de la obra textil de Anne Albers es muy compatible con la estética formal de la arquitectura moderna. Sus tejidos se crean mediante un enfoque modular que sistematiza sus patrones. Tejido de tramas superpuestas para crear volumen y nivel. En particular, sus obras textiles utilizan con frecuencia formas geométricas básicas como rectángulos, líneas y cuadrículas, a través del color o el material, que están en la misma línea que la filosofía Bauhaus de funcionalidad y simplicidad en la arquitectura. Estas formas geométricas se disponen de manera ordenada pero flexible, haciendo hincapié en el orden, la proporción y la estructura, transmitiendo un fuerte sentido de la estructura y conservando al mismo tiempo la libertad artística de expresión, tanto para la propia función decorativa del textil como para complementar la jerarquía visual de la arquitectura.

Por ejemplo, Dessau Bauhaus, fue construido en 1929 por Walter Gropius, como se muestra la Imagen 5 y 6. Sus formas geométricas básicas de rectángulos, líneas y cuadrículas se utilizan como fachadas de edificios para reforzar visualmente la totalidad espacial y la jerarquía mediante la continuación de líneas y formas. The Bauhaus advocated simplicity, geometry and the use of modern materials, rejecting excessive ornamentation. Throughout its existence, the school was influenced by leading artists and designers such as Paul Klee, Wassily Kandinsky and Mies van der Rohe. Their legacy remains central to contemporary design education and practice.

Experiment plan and results

The simple geometric shapes and subtle colour combinations that characterise Anne Albers' textile works, which together seem to form a perfect picture of the effects of light and shadow, constitute a deep intrinsic link between composition and modern architecture and design. Textile is architecture, says Anni Albers.

In Vision, geometry and color are the functional division of the boundaries of visual space. The geometric design of Anne Albers' textile work is very compatible with the formal aesthetics of modern architecture. Its fabrics are created using a modular approach that systematizes its patterns. Overlapping weft fabric to create volume and level. In particular, his textile works frequently use basic geometric shapes such as rectangles, lines and grids, through color or material, which are in the same vein as the Bauhaus philosophy of functionality and simplicity in architecture. These geometric shapes are arranged in an orderly yet flexible manner, emphasizing order, proportion and structure, conveying a strong sense of structure while retaining artistic freedom of expression, both for the decorative function of the textile itself and to complement the visual hierarchy of the architecture.

For example, Dessau Bauhaus was built in 1929 by Walter Gropius, as shown in Images 5 and 6. Its basic geometric shapes of rectangles, lines, and grids are used as building facades to visually reinforce spatial totality and hierarchy through the continuation of lines and shapes. the Bauhaus was a school of art and design founded in 1919 in Weimar, Germany, by the architect Walter Gropius. Its approach integrated applied arts, architecture, graphic design, industrial design and craftsmanship, seeking the unification of form and function. The Bauhaus advocated simplicity, geometry and the use of modern materials, rejecting excessive ornamentation. Throughout its existence, the school was influenced by leading artists and designers such as Paul Klee, Wassily Kandinsky and Mies van der Rohe. Their legacy remains central to contemporary design education and practice.

Conclusiones

- Los diseños geométricos y coloristas de Anni Albers no sólo reflejan el valor estético único del arte textil, sino que lo elevan a la altura del diseño arquitectónico. Su lenguaje geométrico y colorista no sólo responde a los principios estéticos de la arquitectura moderna, sino que añade una vitalidad artística única al espacio arquitectónico, demostrando las infinitas posibilidades de la integración del arte y el diseño, y proporcionando un modelo de integración transfronteriza en el campo del diseño moderno.

- Los textiles de Anni Albers es la combinación de colores y patrón define una nueva forma de combinar el color y los textiles, patrón, piezas y arquitectura. La interacción entre el color y la línea y la estructura puede entenderse como una función del lenguaje de diseño del color, el color, como la línea y la estructura como límite visual o frontera en la composición gráfica general y la disposición en todo el diseño artístico.

- Su enfoque de este concepto de diseño textil, que consiste en utilizar combinaciones de puntos, líneas y colores, y la interacción entre los colores y los patrones de puntos, líneas y superficies, al sistematizar el módulo de líneas y simplificar su planteamiento de patrones, la composición y el diseño de patrones brillan, cuya interacción al autoalimentarse mutuamente el diseño facilita los patrones de diseño, no solo en los textiles y el arte textil, sino también en arquitectura. Este enfoque se puede aplicar a cualquier campo del diseño, sean tejidos, arquitectura, cerámica o de otros.



Imagen 5.
Image 5.
El edificio de la Bauhaus en Dessau desde el ventanal de la escalera (foto: © CSA)
Citado por https://www.aceprensa.com/cultura/la-bauhaus-de-dessau-un-resurgir-cultural-legendario/



Imagen 6.
Image 6.
Citado por https://archilio.fr/projet/dessau-bauhaus/

Conclusions,

- Anni Albers' geometric and colourful designs not only reflect the unique aesthetic value of textile art but elevate it to the height of architectural design. Her geometric and coloudesign andge not only responds to the aesthetic principles of modern architecture but adds a unique artistic vitality to the architectural space, demonstrating the infinite possibilities of the integration of art and design, and providing a model of cross-border integration in the field of modern design.
- Anni Albers' textiles is the combination of colour and pattern that defines a new way of combining colour and textiles, pattern, parts and architecture. The interaction between colour and line and structure can be understood as a function of the design language of colour, colour as line and structure as visual boundary or border in the overall graphic composition and layout in all artistic design.

- His approach to this concept of textile design, which is to use combinations of dots, lines and colours, and the interaction between colours and patterns of dots, lines and surfaces, by systematising the line module and simplifying its pattern approach, composition and pattern design shine through, whose interaction in mutually self-feeding design facilitates design patterns, not only in textiles and textile art, but also in architecture. This approach can be applied to any field of design, be it textiles, architecture, ceramics or others.

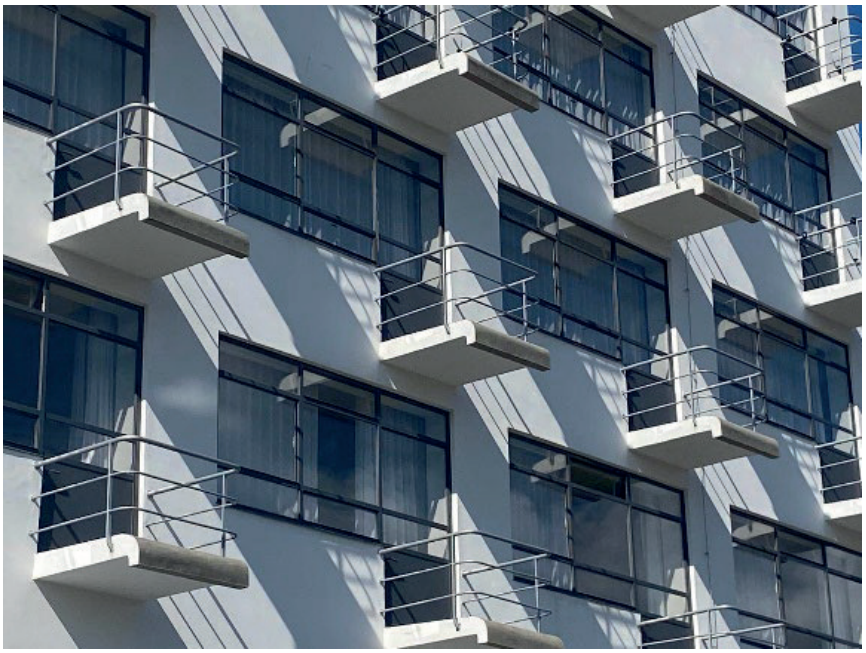


Imagen 7.
Image 7.
Residencia de alumnos de la Bauhaus en Dessau con sus balcones (foto: © CSA)
Citado por https://www.aceprensa.com/cultura/la-bauhaus-de-dessau-un-resurgir-cultural-legendario/



Imagen 8.
Image 8.
Residencia de alumnos de la Bauhaus en Dessau con sus balcones (foto: © CSA)
Citado por https://www.aceprensa.com/cultura/la-bauhaus-de-dessau-un-resurgir-cultural-legendario/

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- Albers, A. «Annie Albers: On Designing». Wesleyan University Press (1961).
- Albers, A. «Anni Albers: Selected Writings on Design». Wesleyan University Press (2001).
- Albers, A. «Del tejer». Fundación del Museo Guggenheim Bilbao (2017).
- Albers, J. «Interaction of Colour». Yale University Press (1971).
- Alberts, A. «On Weaving». Princeton University Press (2017).
- Alberts, J. «Vidrio, Color y Luz». Valencia: IVAM Centre Julio González (1994).
- Danilowitz, B., Albers, A., Brugnoli, P., Hoces de la Guardia, S., Csoma, J., Gilderhus, K., Albers, J., Anger, H., Palmarola Sagredo, H. «Anni y Josef Albers. Viajes por latinoamerica». Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía (2006).
- Garimorth, J. «Annie et Josef Albers. L'art et la vie». Paris: Paris Musées (2021).
- Gropius, W. «The New Architecture and the Bauhaus». Faber & Faber, London (1935).

CONSULTAS PAGINAS WEBS / WEBSITE CONSULTATIONS

- https://es.wikiarquitectura.com/edificio/edificio-de-la-bauhaus-en-dessau/ (consulta 02/12/2024)
- https://es.slideshare.net/slideshow/gropius-y-la-bauhaus/90859260 (consulta 24/11/2024)
- https://www.aceprensa.com/cultura/la-bauhaus-de-dessau-un-resurgir-cultural-legendario/ (consulta 06/12/2024)
- https://archilio.fr/projet/dessau-bauhaus/ (consulta 10/12/2024)

INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA RECOSTRUCIÓN ARQUEOLOGICA DE JARDINES

ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR ARCHAEOLOGICAL GARDEN RECONSTRUCTION

Quiteria Angulo-Ibáñez
Investigadora del CITE. Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Profesora. Doctora en Arquitectura por la UPV. E-mail:quianib@csa.upv.es
CITE Researcher. Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València, Assistant Professor. Architect. PhD in Architecture by the UPV.

J David Gordo-Martínez
Arquitecto / Architect

Abstract

The content developed in this work puts into practice the use of Artificial Intelligence (AI) and its possible applications in the compositional analysis of organizational schemes of Hispano-Muslim gardens, using graphical methods and systematizing the procedure for its optimization. In collaboration with the research work, the compositional schemes of all the clear examples of Hispano-Muslim gardens, which have been scattered throughout the Iberian Peninsula, are studied. We are analyzing those gardens that have arrived in a better state of preservation and belonging to the Umayyad, Caliphate and Nasrid periods, being the culmination of the typical scheme of the crossing courtyard. In parallel, an algorithm is also being developed with the purpose of transferring computationally all the information obtained from the previous compositional study, as well as the processes required in this analysis. Finally, a methodology to be followed is established that can be exported, and AI can help in the reconstruction of these gardens through the elaboration of hypotheses configured the type.

Keywords

Artificial Intelligence, Hispanic-Muslim Gardens, Digital Reconstruction, Virtual Archaeology

Introducción

Este trabajo se centra en el estudio de los jardines hispanomusulmanes de Al-Ándalus, un legado cultural que integra elementos estéticos, espirituales y de sostenibilidad. Estos jardines, inspirados en la visión islámica del paraíso, combinaban agua, vegetación y arquitectura para crear espacios que simbolizaban paz y satisfacción espiritual. Actualmente, muchos de estos jardines se encuentran en estado de deterioro, afectando su conservación y estudio. Ante esta problemática, el presente trabajo propone aplicar la inteligencia artificial (IA) para analizar y reconstruir digitalmente estos espacios. Mediante un algoritmo basado en redes generativas antagónicas (GAN), se busca optimizar el análisis compositivo y facilitar la reconstrucción de los jardines hispanomusulmanes, procesando datos históricos y generando modelos conceptuales que aporten una visión profunda y detallada de sus diseños originales. Los objetivos del estudio incluyen desarrollar una metodología replicable para el análisis de jardines históricos, mejorar la eficiencia en la preservación digital, y convertir la IA en una herramienta de apoyo para la arqueología y el paisajismo. Esto no solo permitirá preservar y estudiar el patrimonio andalusí, sino que también ayudará a sistematizar el conocimiento sobre el diseño de jardines, facilitando su conservación para generaciones futuras. Este proyecto aspira a enriquecer el campo de la conservación patrimonial mediante tecnologías avanzadas, asegurando que el legado cultural de los jardines hispanomusulmanes perdure en el tiempo.



Imagen 1. Vista aérea de la ciudad califal de Medina Azahara / Image 3. Aerial view of the caliphal city of Medina Azahara

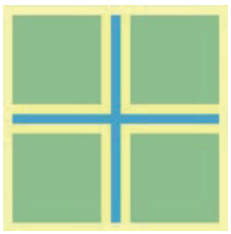


Imagen 2. Esquema tipo Char-Bagh /Image 2. Char-Bagh Schematic



Imagen 31. Vista aérea de la Alhambra de Granada / Image 1. Aerial view of the Alhambra in Granada

Marco Teórico

Historia y Evolución de los Jardines Hispanomusulmanes

Los jardines hispanomusulmanes, reflejo del ideal coránico del paraíso, se caracterizan por diseños geométricos, la integración del agua y la vegetación ornamental. Ejemplos destacados son Medina Azahara en Córdoba (Imagen 1), los Reales Alcázares de Sevilla y la Alhambra en Granada (Imagen 3), representativos de las etapas omeya, almohade y nazarí. Se distinguen dos tipos principales: Los patios-jardín, integrados en mezquitas o residencias con albercas y canales; y los jardines asociados a pabellones, abiertos al paisaje y al disfrute.

Su diseño, como el Char-Bagh (Imagen 2), divide el espacio en cuatro partes con una fuente central, incorporando canales y albercas para la irrigación. En el período nazarí, alcanzaron su máxima expresión en la Alhambra y el Generalife, cuya fusión de arquitectura y naturaleza marcó la jardinería española.

Estado Actual de Conservación y Retos de Preservación

La conservación de jardines históricos plantea retos debido al desgaste natural, la pérdida de vegetación y la escasez de documentación detallada. Aunque algunos jardines, como el Generalife y la Alhambra, han sido preservados, otros han sufrido cambios significativos o han desaparecido. Los métodos tradicionales de restauración se han visto limitados por la ausencia de elementos originales y, en muchos casos, no pueden restaurar el jardín a su estado completo. La aplicación de IA ofrece un método complementario, capaz de interpretar datos fragmentarios para reconstruir estos espacios patrimoniales de manera fiel.

Introduction

This study focuses on the gardens of Al-Andalus, a cultural legacy that integrates aesthetic, spiritual, and sustainable elements. These gardens, inspired by the Islamic vision of paradise, combined water, vegetation, and architecture to create spaces symbolizing peace and spiritual fulfillment. Today, many of these gardens are in a state of deterioration, affecting both their preservation and study. To address this challenge, this work proposes applying artificial intelligence (AI) to analyze and digitally reconstruct these spaces. By employing an algorithm based on generative adversarial networks (GANs), the aim is to optimize compositional analysis and facilitate the reconstruction of Hispano-Muslim gardens, processing historical data to generate conceptual models that provide a deep and detailed understanding of their original designs.The objectives of this study include developing a replicable methodology for analyzing historical gardens, improving the efficiency of digital preservation, and establishing AI as a supportive tool for archaeology and landscaping. This approach will not only help preserve and study Andalusian heritage but will also systematize knowledge about garden design, ensuring its conservation for future generations. This project aspires to enrich the field of heritage conservation through advanced technologies, ensuring that the cultural legacy of Hispano-Muslim gardens endures over time.

Theoretical Framework

History and evolution of Hispano-Muslim gardens

Hispano-Muslim gardens, reflecting the Quranic ideal of paradise, are characterized by geometric designs, the integration of water, and ornamental vegetation. Notable examples include Medina Azahara in Córdoba (Image 1), the Reales Alcázares of Seville, and the Alhambra in Granada (Image 3), representing the Umayyad, Almohad, and Nasrid periods. Two primary types stand out: Patio-gardens, integrated into mosques or residences with pools and canals, and gardens associated with pavilions, open to the landscape and designed for enjoyment.

Their layout, inspired by the Char-Bagh (Image 2) concept, divides the space into four parts with a central fountain, incorporating canals and pools for irrigation. During the Nasrid period, these gardens reached their peak expression in the Alhambra and the Generalife, where the fusion of architecture and nature significantly influenced Spanish garden design.

Current State of conservation and preservation challenges

Preserving historical gardens faces significant challenges due to natural wear, loss of vegetation, and limited detailed documentation. While some gardens, like the Generalife and the Alhambra, have been well preserved, others have undergone significant changes or have been lost entirely. Traditional restoration methods are often constrained by the lack of original elements, making it difficult to fully restore these gardens to their original state. AI offers a complementary method, capable of interpreting fragmented data to faithfully reconstruct these heritage spaces.

Artificial Intelligence in archaeology and digital architecture

AI, particularly generative adversarial networks, enables the creation of precise digital reconstructions from incomplete or degraded data. In archaeology and architecture, this technology has been applied to document and reconstruct historical sites. AI can identify patterns, architectural styles, and ornamental details, allowing researchers to simulate and explore highly accurate models that facilitate cultural heritage preservation.

Methodology

Collection of Historical and Visual Data

In the first phase, visual and historical sources on Hispano-Muslim gardens were analyzed and studied, such as ancient architectural plans, explorers' drawings, historical documents and previous archaeological studies that provide a detailed record of the structure and composition of the gardens.

Inteligencia Artificial en la arqueología y la arquitectura digital

La IA, particularmente las redes generativas antagónicas, permite crear reconstrucciones digitales precisas a partir de datos incompletos o deteriorados. En la arqueología y la arquitectura, esta tecnología ha sido aplicada en proyectos de documentación y reconstrucción de sitios históricos. La IA puede tener aplicaciones en la identificación de patrones, estilos arquitectónicos y detalles ornamentales. Estos avances permiten a los investigadores simular y explorar modelos de alta precisión que facilitan la preservación del patrimonio cultural.

Metodología

Recopilación de datos históricos y visuales

En la primera fase, se analizaron y estudiaron fuentes visuales e históricas sobre jardines hispanomusulmanes, como planos arquitectónicos antiguos, dibujos de exploradores, documentos históricos y estudios arqueológicos previos que ofrecen un registro detallado de la estructura y composición de los jardines. Este conjunto de datos se usó para alimentar el modelo de IA y proporcionarle una base de patrones visuales que sirven como referencia.

Posteriormente para generar una traducción correcta de datos entre el análisis compositivo y el entorno digital donde después pasaran a ser parte del algoritmo de manera computacional. Se dibujaron los elementos vectorialmente dependiendo de su forma y función. Estas capas responden también a una función jerárquica cuantificando la importancia a la concepción compositiva del tipo, quedando ordenada de la manera como se indica en la imagen 4.

Desarrollo de un algoritmo de IA para el análisis espacial

Se desarrolló un algoritmo de IA basado en redes generativas antagónicas (GANs) para identificar y replicar patrones específicos de diseño en los jardines. El algoritmo fue entrenado con los datos recopilados para identificar características clave, así como para diferenciar y aprender patrones compositivos hispanomusulmanes y a emplear esta información en la reconstrucción visual. Empezaremos estableciendo un espacio de trabajo que incluirá las herramientas y el código necesarios para diseñar, desarrollar y probar el algoritmo de manera progresiva. Trabajaremos en Google Colab, un entorno basado en Jupyter Notebooks que permite ejecutar código Python en el navegador. Google ofrece este servicio gratuitamente con acceso a recursos en la nube como GPUs y TPUs, ideales para ciencia de datos y aprendizaje automático. Colab facilita la colaboración en tiempo real, permitiendo la edición y compartición simultánea de notebooks. El proyecto de análisis de imágenes automatizado se desarrollará con la extensión pix2pixHD, una mejora de pix2pix.

Funcionamiento de pix2pix

Pix2pix es una red generativa adversarial (GAN) diseñada para traducir imágenes de un dominio a otro (por ejemplo, de un boceto a una fotografía). Se compone de dos redes principales:

1.**Generador**: Convierte una imagen de entrada (A) en una imagen de salida (B) usando una arquitectura de codificación-decodificación con conexiones de salto para preservar detalles.
2.**Discriminador**: Evalúa si la imagen generada (B') es real o falsa, aprendiendo a distinguir entre ambas.
3.**Pérdida adversarial**: El generador y el discriminador se entrenan juntos; el generador intenta engañar al discriminador creando imágenes realistas, mientras que el discriminador detecta las falsas.
4.**Pérdida de reconstrucción**: Se usa una pérdida (L1 o L2) para asegurar que la imagen generada sea lo más parecida posible a la imagen objetivo.

En resumen, el modelo toma una imagen de entrada (A) y genera una hipótesis de salida (B') que intenta replicar el objetivo (B). Esto permite a la IA aprender las relaciones que definen el espacio y el tipo de jardín. Dado que se requieren imágenes en alta resolución, utilizaremos `pix2pixHD` para obtener resultados de mejor calidad (Imagen 5).

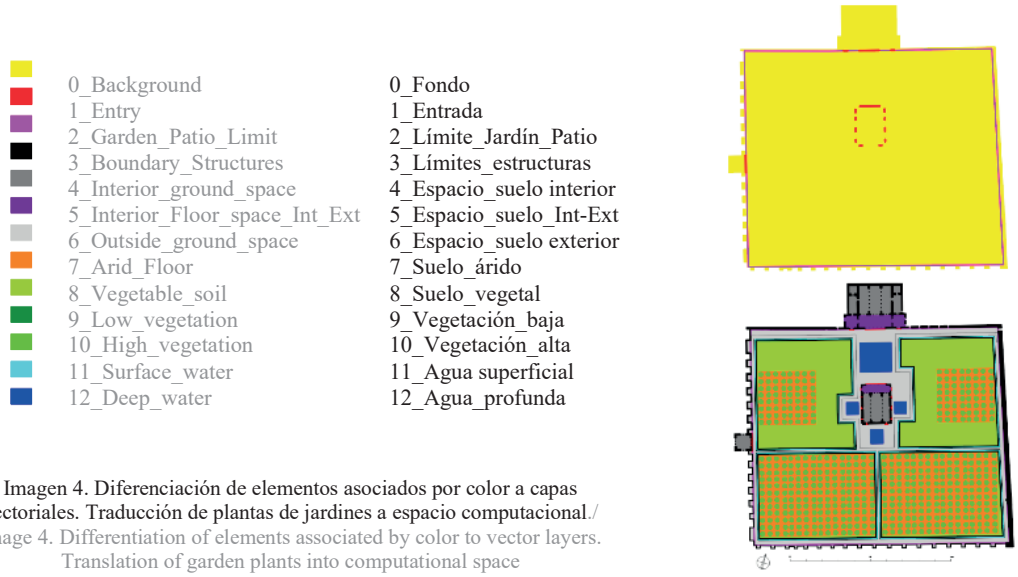


Imagen 4. Diferenciación de elementos asociados por color a capas vectoriales. Traducción de plantas de jardines a espacio computacional./ Image 4. Differentiation of elements associated by color to vector layers. Translation of garden plants into computational space

This dataset was used to feed the AI model and provide it with a visual pattern base to serve as a reference. Subsequently to generate a correct translation of data between the compositional analysis and the digital environment where they would then become part of the algorithm computationally. The elements were drawn vectorially depending on their form and function. These layers also respond to a hierarchical function quantifying the importance to the compositional conception of the type, being ordered as shown in image 4.

Development of an AI algorithm for spatial analysis

An AI algorithm based on Generative Adversarial Networks (GANs) was developed to identify and replicate specific design patterns in the gardens. The algorithm was trained with the collected data to detect key features and to learn and apply Hispano-Muslim compositional patterns in visual reconstructions. The development process began by establishing a workspace incorporating the necessary tools and code for the progressive design, development, and testing of the algorithm. The work was carried out using Google Colab, a Jupyter Notebook-based platform that runs Python code in a browser. Google Colab provides free access to cloud resources such as GPUs and TPUs, ideal for data science and machine learning tasks. Real-time collaboration was facilitated, allowing simultaneous editing and sharing of notebooks.The automated image analysis project utilized the pix2pixHD extension, an enhanced version of pix2pix.

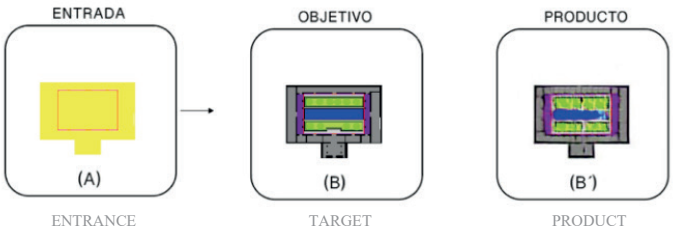


Imagen 5. Esquema funcionamiento básico pix2pix / Image 5. Basic functioning diagram of pix2pix

How pix2pix Works

Pix2pix is a GAN designed to translate images from one domain to another (e.g., sketches to photographs). It consists of two main networks:

1. Generator: Converts an input image (A) into an output image (B) using an encoder-decoder architecture with skip connections to preserve details.
2. Discriminator: Evaluates whether the generated image (B') is real or fake, learning to distinguish between the two.

Funcionamiento de pix2pixHD

Pix2pixHD es una versión mejorada de pix2pix que genera imágenes de alta resolución con mayor detalle y calidad. Este modelo incorpora varias mejoras:

1. **Generador**: Incluye múltiples capas de convolución y una arquitectura de aprendizaje profundo jerárquica, que permite generar imágenes en alta resolución con mayor fidelidad en los detalles.
2. **Discriminador**: Utiliza discriminadores multiescala, evaluando la calidad de las imágenes generadas a diferentes niveles de detalle.
3. **Pérdida perceptual**: Se emplea una pérdida perceptual basada en redes preentrenadas (como VGG) que mide las diferencias de alto nivel entre imágenes reales y generadas.
4. **Pérdida adversarial**: Extiende la pérdida adversarial a múltiples escalas, permitiendo capturar detalles y características más finas de las imágenes.

Arquitectura de entrenamiento se entrena el generador y el discriminador simultáneamente con pares de imágenes (p. ej., mapas de segmentación e imágenes fotorrealistas), minimizando una combinación de pérdida perceptual y adversarial.

Configuración y comando de entrenamiento

Se importan las librerías y se crean directorios para almacenar los datos y resultados. Se verifica que los directorios existan y luego se monta Google Drive en Colab. Finalmente, se ejecuta el comando *!python train.py* para iniciar el entrenamiento, especificando parámetros como la ausencia de mapas de etiquetas, el directorio de puntos de control y la ruta de los datos de entrenamiento.

Concepto de Epoch y Batches

Un **epoch** es una iteración completa sobre el conjunto de datos de entrenamiento, esencial para ajustar y evaluar el rendimiento del modelo en cada ciclo. El entrenamiento se realiza en **batches** para optimizar el procesamiento de grandes volúmenes de datos.

Análisis de jardines y entrenamiento del algoritmo

Se realiza un análisis de jardines hispanomusulmanes representativos, siguiendo una línea de tiempo que marca los periodos de construcción y la etapa histórica de al-Ándalus. Se emplean dos tipos de imágenes:

- (A): Representa el espacio virgen antes de la intervención.
- (B): Refleja el jardín intervenido, mostrando su esquema compositivo, forma y tipo.

Selección y estudio de ejemplos representativos

Se eligieron jardines emblemáticos como el Generalife y Madinat al-Zahra para identificar patrones de diseño hispanomusulmán, como la simetría y la disposición de elementos. Estos casos de estudio fueron clave para entrenar el algoritmo, permitiéndole aprender las características y rasgos compositivos. El análisis se centra en plantas hipotéticas o jardines bien conservados, que ofrecen una visión clara de los diseños originales, facilitando así una comprensión más profunda de su estructura.

Categorización de elementos clave y tipologías de jardines

Se establecieron tipologías y clasificaciones de diseño basadas en elementos recurrentes como fuentes, albercas y vegetación. Esto permitió al algoritmo reconocer y replicar características estructurales en los jardines, facilitando la generación de modelos representativos. La categorización incluyó tanto la simetría como el uso del espacio, de manera que la IA pudiera replicar configuraciones propias de los jardines hispanomusulmanes (Imagen 6 - 7).

Verificación y evaluación de resultados del modelo

Una vez el modelo haya completado su entrenamiento, se realiza una verificación del rendimiento y calidad de las imágenes generadas a través del script *test.py.*

1. **Ejecución del comando de procesamiento**: Se procesa la imagen utilizando el modelo pix2pixHD y parámetros específicos de generación.
2. **Confirmación del guardado de resultados**: Se verifica que las imágenes procesadas hayan sido almacenadas en el directorio designado.

3. Adversarial Loss: Both the generator and discriminator are trained together; the generator tries to deceive the discriminator by creating realistic images, while the discriminator learns to identify fake ones.
4. Reconstruction Loss: A loss function (L1 or L2) ensures that the generated image closely resembles the target image.

The model takes an input image (A) and generates an output hypothesis (B') that attempts to replicate the target (B). This enables the AI to learn relationships defining the space and type of garden. To achieve high-resolution images, pix2pixHD was employed for superior quality results (Image 5).

How pix2pixHD Works

Pix2pixHD, an enhanced version of pix2pix, produces high-resolution images with improved detail and quality. Key features include:

1. Generator: Utilizes multiple convolutional layers and a hierarchical deep-learning architecture to generate high-resolution images with greater fidelity.
2. Discriminator: Employs multi-scale discriminators to assess the quality of generated images at different detail levels.
3. Perceptual Loss: Leverages pre-trained networks (e.g., VGG) to measure high-level differences between real and generated images.
4. Adversarial Loss: Extends adversarial loss across multiple scales, capturing finer details and features in the images.

The training architecture simultaneously trains the generator and discriminator using paired images (e.g., segmentation maps and photorealistic images), minimizing a combination of perceptual and adversarial loss.

Training configuration and commands

Libraries are imported, and directories are created to store data and results. Google Drive is mounted in Colab, and the training process is initiated with the command !python train.py, specifying parameters such as label maps, checkpoint directories, and training data paths.

Epochs and Batches

An epoch represents a complete iteration over the training dataset, essential for adjusting and evaluating model performance in each cycle. Training is conducted in batches to optimize processing large data volumes.

Garden analysis and algorithm training

Representative Hispano-Muslim gardens were analyzed, following a timeline marking construction periods and the historical stages of al-Andalus. Two types of images were used:

(A): Represents the untouched space before intervention.

(B): Shows the intervened garden, illustrating its compositional scheme, form, and type.

Selection and study of representative examples

Emblematic gardens such as the Generalife and Madinat al-Zahra were chosen to identify Hispano-Muslim design patterns, including symmetry and element arrangement. These case studies were crucial for training the algorithm to learn compositional characteristics.

The analysis focused on hypothetical layouts or well-preserved gardens, offering a clear view of the original designs and enabling a deeper understanding of their structure.

Categorization of key elements and garden typologies

Design typologies and classifications were established based on recurring elements such as fountains, pools, and vegetation. This allowed the algorithm to recognize and replicate structural features in gardens, facilitating the generation of representative models.

3. **Ejecución del comando de procesamiento**: Se procesa la imagen utilizando el modelo pix2pixHD y parámetros específicos de generación.
4. **Confirmación del guardado de resultados**: Se verifica que las imágenes procesadas hayan sido almacenadas en el directorio designado.
5. **Inspección visual de resultados**: Se revisan las imágenes generadas para evaluar visualmente su calidad.

En conclusión, la validación mediante inspección visual y revisión de resultados es crucial para confirmar la calidad y la precisión de las transformaciones realizadas, asegurando que el modelo cumple las expectativas. Además, se destaca el uso del modelo en experimentos, como la creación de representaciones hipotéticas que facilitan nuevas interpretaciones visuales.

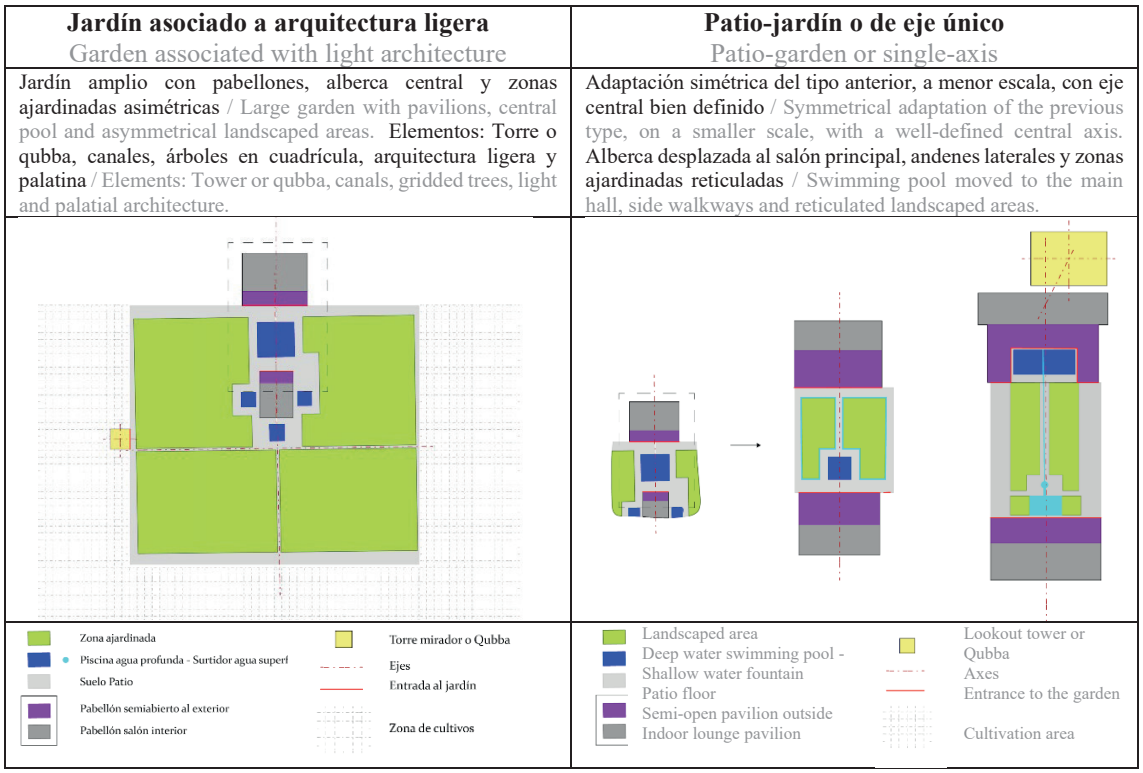


Imagen 6. Esquemas compositivos de plantas tipos generado tras el estudios de la IA. Elaboración propia
Image 6. Compositional schemes of type plants generated after the study of AI. Own elaboration

Entrenamiento del algoritmo y evaluación de los resultados

Este proceso resulta fundamental para la comprensión y análisis de la estructura y estilo de jardines mediante imágenes generadas en alta definición (Imagen 8).

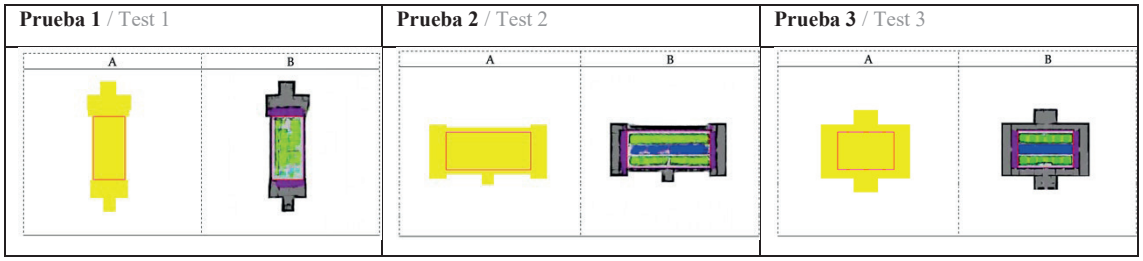


Imagen 8. Caso hipotético generado por la IA. Elaboración propia / Image 8. Hypothetical case generated by AI. Own elaboration

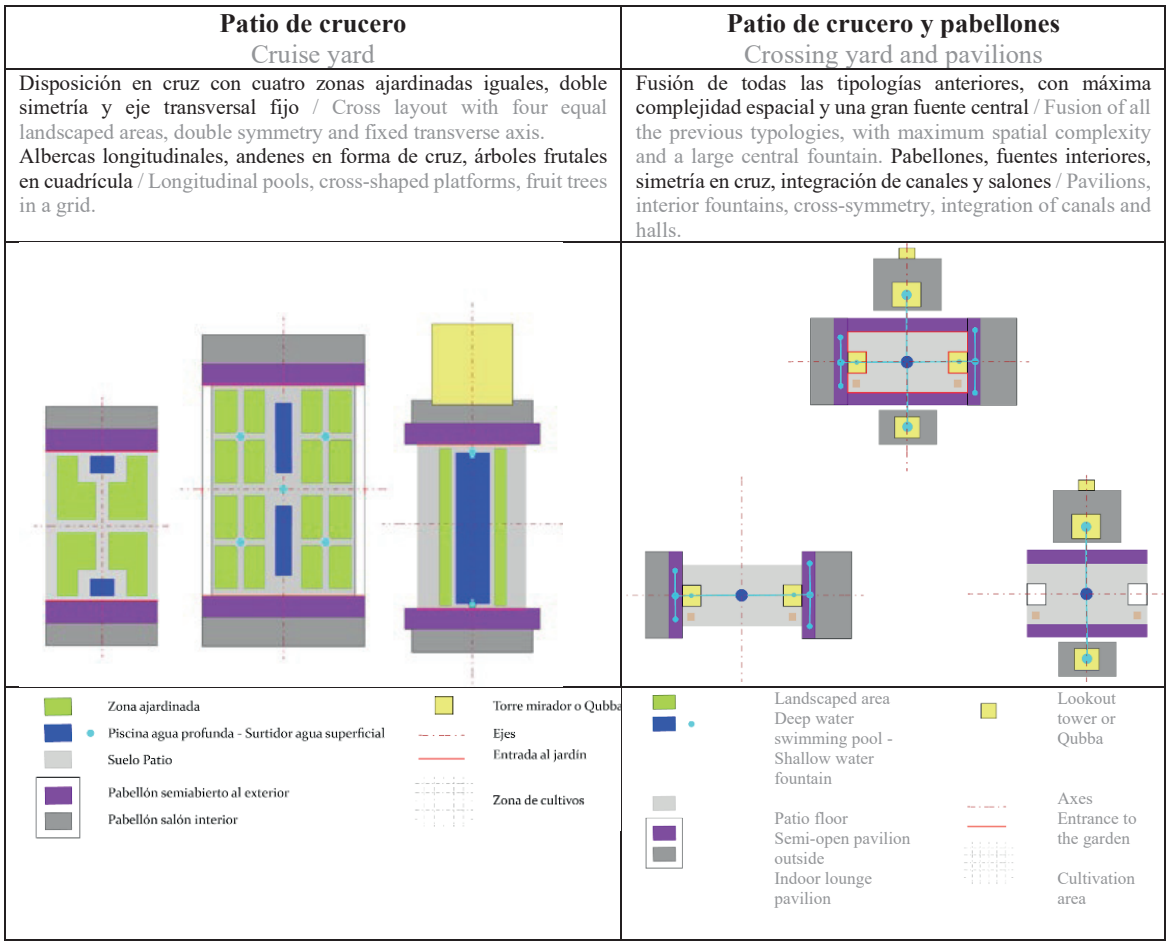


Imagen 7. Esquemas compositivos de plantas tipos generado tras el estudios de la IA. Elaboración propia.
Image 7. Compositional schemes of type plants generated after the study of AI. Own elaboration.

The categorization emphasized symmetry and spatial usage, enabling the AI to replicate configurations unique to Hispano-Muslim gardens (Image 6 - 7).

Verification and evaluation of model results

Once training was completed, the model's performance and image quality were evaluated through the test.py script:

1. **Execution of processing commands:** The image was processed using the pix2pixHD model with specific generation parameters.
2. **Confirmation of results storage**: The generated images were verified as saved in the designated directory.
3. **Visual inspection of results**: The images were reviewed to assess their quality.

In conclusion validation through visual inspection and result review was critical to confirming the quality and accuracy of transformations. The model's use in experiments, such as creating hypothetical representations, enables new visual interpretations.

Algorithm training and result evaluation

This process was fundamental for understanding and analyzing the structure and style of gardens using high-definition generated images (Image 8).

Conclusions

This research developed an innovative methodology for the preservation, analysis, and digitization of Hispano-Muslim gardens, making a significant contribution to the fields of architectural and archaeological conservation. Through advanced technologies and the use of generative AI, these

historical spaces were virtually reconstructed with remarkable accuracy, faithfully reflecting compositional characteristics such as symmetry, the arrangement of elements, and the designs of water channels. The algorithm's training demonstrated its ability to reproduce the visual and structural patterns typical of Hispano-Muslim gardens. The generated models showed high fidelity when compared to historical examples, validating their effectiveness through visual analyses and comparative records.

In conclusion, the combination of advanced technologies with a deep historical and cultural understanding has enabled the development of an innovative model for preserving the legacy of Hispano-Muslim gardens. This interdisciplinary and technological approach not only ensures their conservation for future generations but also establishes new pathways for future research, transforming the way we understand and protect our cultural heritage.

Conclusiones

Esta investigación desarrolló una metodología innovadora para la preservación, análisis y digitalización de jardines hispanomusulmanes, marcando una contribución significativa en los campos de la conservación arquitectónica y arqueológica. Mediante tecnologías avanzadas y el uso de IA generativa, se logró reconstruir virtualmente estos espacios históricos con una notable precisión, reflejando fielmente características compositivas como la simetría, la disposición de elementos y los diseños de los canales de agua. El entrenamiento del algoritmo evidenció su capacidad para reproducir patrones visuales y estructurales propios de los jardines hispanomusulmanes. Los modelos generados demostraron una gran fidelidad al comparar su diseño con ejemplos históricos, validando su eficacia mediante análisis visuales y registros comparativos.

En conclusión, la combinación de tecnologías avanzadas con un profundo entendimiento histórico y cultural ha permitido desarrollar un modelo para preservar el legado de los jardines hispanomusulmanes. Este enfoque interdisciplinario y tecnológico no solo garantiza su conservación para futuras generaciones, sino que también establece nuevas rutas para investigaciones futuras, transformando la forma en que entendemos y protegemos nuestro patrimonio cultural.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- Almagro Gorbea, A. (2010, February 12). Acerca del jardín andalusí. FUNCI - Fundación de Cultura Islámica. https://funci.org/acerca-del-jardin-andalusi/
- Aurelien Geron. (2019). Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras and TensorFlow: concepts, tools, and techniques to build intelligent systems. O'reilly.
- Cimadomo, G., Shahdadpuri Aswani, V., & Yeregui-Tejedor, J. (2024). Aplicaciones de la Inteligencia Artificial en arquitectura. Clasificación y análisis de obra en la era digital. Riuma.uma.es. https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/29972?show=full
- Cortés, J. (1999). El Corán.
- Fernando Chueca Goitia. (1947). Invariantes castizas de la arquitectura española.
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep Learning. MIT Press.
- Isola, P., Zhu, J.-Y., Zhou, T., & Efros, A. A. (2017). Image-to-image translation with conditional adversarial networks. 5967–5976. https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.632
- José Tito Rojo. (2012). El jardín hispanomusulmán. Los jardines de Al-Ándalus y su herencia. UNIVERSIDAD DE GRANADA.
- Kensek, K. (2014). Building Information Modeling. John Wiley & Sons.
- Puertas, F. (1984). La protección y conservación de los monumentos hispanomusulmanes y sus problemas específicos. Vol. 27 (1978). Universidad de Granada.
- Rojo, J. T., & Casares Porcel, Manuel. (2009). Restauración de jardines hispanomusulmanes: tipologías de intervención. (Giardini e paesaggio ; 25). L.S. Olschki.
- Sheil, B., Mette Ramsgaard Thomsen, Tamke, M., & Hanna, S. (2020). Design Transactions: Rethinking Information Modelling for a New Material Age. Ucl Press.
- Torres Balbás, L. (1949). La Alhambra y el Generalife (por L. Torres Balbás.).
- Vicent, M. (2016). Remote sensing in archaeology: From visual data interpretation to digital data manipulation. Journal of Archaeological Method and Theory, 23.
- Wang, T.-C., Liu, M.-Y., Zhu, J.-Y., Tao, A., Kautz, J., & Catanzaro, B. (2018). High-resolution image synthesis and semantic manipulation with conditional GANs. 8798–8807. https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00917.

LA PUESTA EN VALOR DEL PARAJE Y LA ERMITA DE PINTARRAFES CARLET

THE ENHANCEMENT OF THE SITE AND THE HERMITAGE OF PINTARRAFES CARLET

Pablo Ariel Escudero
Estudiante de la Escuela de Doctorado de la Universitat Politècnica de València. Centro de Investigación Arquitectura, Patrimonio y Gestión del Desarrollo Sostenible PEGASO (https://pegaso.webs.upv.es/) Grupo AG_BIM-PATRIMONIO pabes@arq.upv.es
Luis Cortés Meseguer
Investigador en el Dpto. de Construcciones Arquitectónicas*; Universitat Politècnica de València; Camino de Vera, s/n,* Building-C1*, 46022 Valencia, España.* Profesor Contratado *Doctor en la UPV. E-mail: luicorme@upv.es Escuela* de Ingeniería de la Edificación
Jorge García-Valldecabres
Investigador en el Dpto. Expresión Gráfica Arquitectónica*; Universitat Politècnica de València; Camino de Vera, s/n,* Building-B1*, 46022 Valencia, España. Profesor Titular de la UPV. E-mail:* jgvallde@ega.upv.es *Escuela de Ingeniería de la Edificación*
Mª Concepción López González
Investigador en el Dpto. Expresión Gráfica Arquitectónica*; Universitat Politècnica de València; Camino de Vera, s/n,* Building-B1*, 46022 Valencia, España. Catedrática de E.U. de la UPV. E-mail: mlopezg@ega.upv.es Escuela de Ingeniería de la Edificación*

Summary

This study tries to show a first approach to knowledge to establish the historical-artistic values appropriate for the declaration as an Asset of Cultural Interest in the category of Historic Site of the Site of Pintarrafes and the Hermitage of Sant Bernat, María i Gràcia as a Monument, in Carlet. And how these represent signs of identity of a community that transcends materiality and are a testimony of its contribution to universal culture. It is a living heritage, maintained by the community itself and passed down over the years. It is considered within the historical, ethnological and architectural field, that is, both of a material and immaterial nature. According to Law 4/98 on Valencian Cultural Heritage.

The declaration of an asset as a BIC entail becoming part of the Catalogue of Assets of Cultural Interest of Spain, a series of documentation must be processed that informs about the assets to be evidenced, as well as the justification of the importance that the asset weighs.

Keywords

Value, Hermitage, Design, Architecture

Introducción

El presente estudio trata de evaluar los valores histórico-artísticos procedentes para la declaración como Bien de Interés Cultural en la categoría de Conjunto Histórico del Yacimiento de Pintarrafes y la Ermita de Sant Bernat, María y Gràcia como Monumento, en Carlet. Se considera dentro del ámbito histórico, etnológico y arquitectónico, es decir, tanto de carácter material como inmaterial. Según la Ley 4/98 de Patrimonio Cultural Valenciano. Y de como estos representan señas de identidad de una comunidad que trascienden a la materialidad y son un testimonio de su contribución a la cultura universal. Se trata de un patrimonio vivo, mantenido por la misma comunidad y transmitido a lo largo de los años. Se considera dentro del ámbito histórico, etnológico y arquitectónico, es decir, tanto de carácter material como inmaterial. Según la Ley 4/98 de Patrimonio Cultural Valenciano.

La declaración de un bien como BIC conlleva, pasar a formar parte del Catálogo de Bienes de Interés Cultural de España, se debe dar curso una serie de documentación que informe sobre los bienes a evidenciar, así como la justificación de la transcendencia que el bien pese.

La descripción

La Ermita se encuentra en la zona de Pintarrafes cerca del pueblo y en el Camino de San Bernardo, en dirección noreste. Podemos distinguir el paisaje de la ermita de Sant Bernat en dos niveles perceptivos: uno, el lejano, formado por la llanura aluvial y el cultivo contemporáneo de árboles frutales, todo ello rodeado de estribaciones montañosas de baja altura que delimitan una cuenca visual 2característica y muy acuñada como tópico de éxito de la riqueza agrícola de la Ribera. La otra, la que está junto a la ermita, la zona de Pintarrafes, que no es más que un trozo de la anterior, aunque configurada como parte del escenario de las celebraciones festivas y conmemorativas de los Santos del Carlet y que ahora están formadas por elementos modernos, de buen diseño, formando un ambiente amable de moreras y bancos en un círculo de ladrillo encalado para alojar a los peregrinos que acuden allí cada 23 de julio.

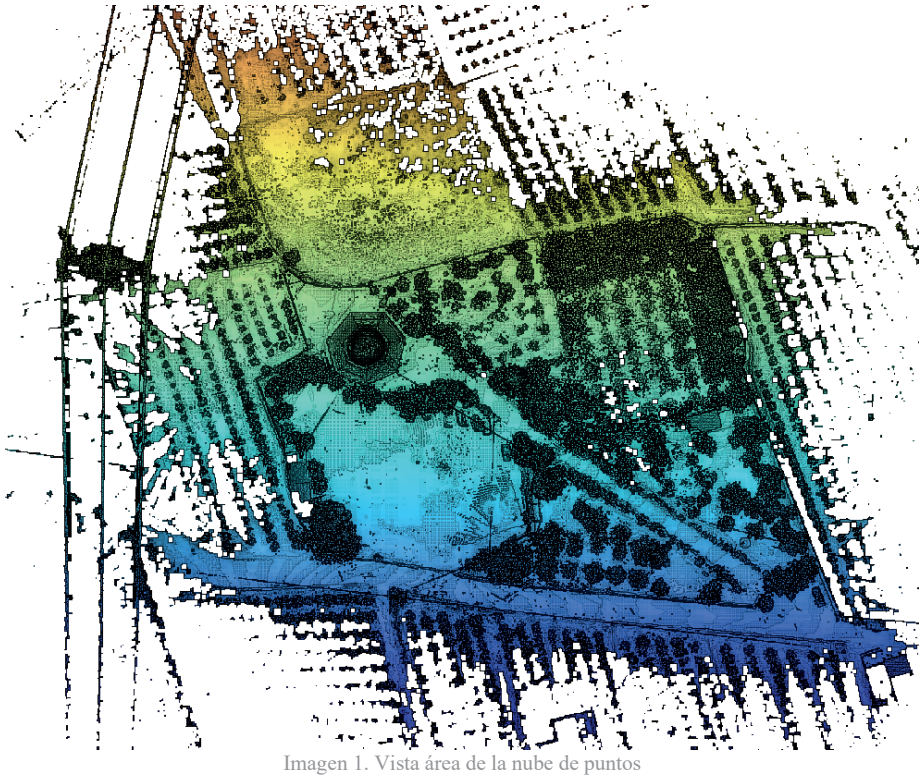


Imagen 1. Vista área de la nube de puntos
Image 1. Point cloud area view

Introduction

The aim of this study is to evaluate the historical-artistic values that are appropriate for the declaration of the Pintarrafes Site and the Hermitage of Sant Bernat, María i Gràcia as a Monument as an Asset of Cultural Interest in the category of Historic Site. It is considered within the historical, ethnological and architectural field, that is, both of a material and immaterial nature. According to Law 4/98 on Valencian Cultural Heritage. And how these represent signs of identity of a community that transcends materiality and are a testimony of its contribution to universal culture. It is a living heritage, maintained by the community itself and passed down over the years. It is considered within the historical, ethnological and architectural field, that is, both of a material and immaterial nature. According to Law 4/98 on Valencian Cultural Heritage.

The declaration of an asset as a BIC entail becoming part of the Catalogue of Assets of Cultural Interest of Spain, a series of documentation must be processed that informs about the assets to be evidenced, as well as the justification of the importance that the asset weighs.

The description

The Hermitage is around Pintarrafes near the town and on the Camino de San Bernardo, in a northeasterly direction. We can distinguish the landscape of the hermitage of Sant Bernat on two perceptual levels: one, the distant one, formed by the alluvial plain and the contemporary cultivation of fruit trees, all surrounded by low-lying mountain foothills that delimit a visual basin 2characteristic and widely coined as a topic of success of the agricultural wealth of the Ribera. The other, the one next to the hermitage, the area of Pintarrafes, which is nothing more than a piece of the previous one, although configured as part of the stage for the festive and commemorative celebrations of the Saints of Carlet and which are now made up of modern elements, of good design, forming a friendly atmosphere of mulberry trees and benches in a whitewashed brick circle to accommodate the pilgrims who come there every 23 of July.

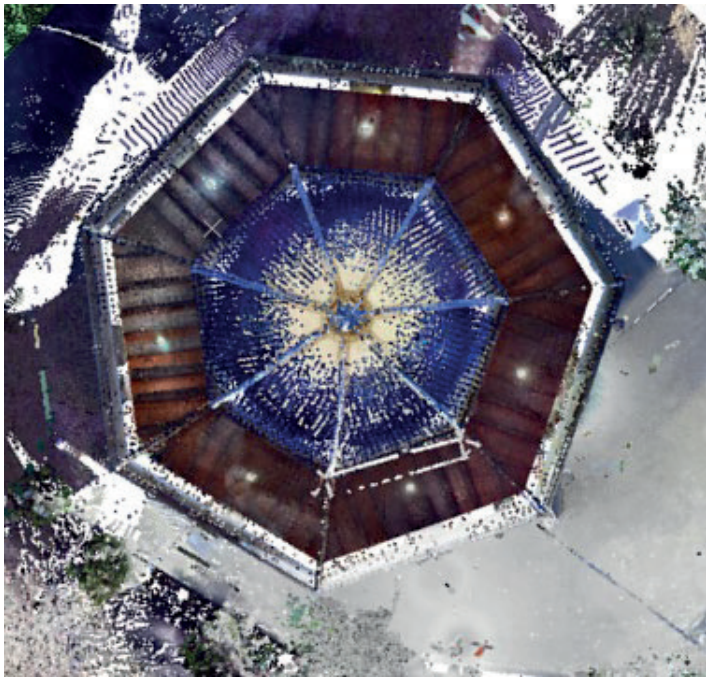


Imagen 2 Vista área de la nube de puntos
Image 2. Point cloud area view



Imagen 3. Vista superior parcial de la nube de puntos
Image 3. Partial top view of the point cloud



Imagen 4. Vista longitudinal de la nube de puntos
Image 4. Longitudinal view of the point cloud

Resultados

La composición proyectual, el trazado de la Ermita de San Bernardo, forma parte de la transición del barroco de la primera mitad del siglo XVIII a la norma académica fundada en 1768.

La ermita fue construida entre 1762 y 1765, y consagrada en 1769 y la autoría es probablemente atribuible al arquitecto Antoni Gilabert. El arquitecto Gilabert tenía una estrecha relación con los condes de Carlet en otros proyectos de tierras vecinas dentro de su jurisdicción.

Las semejanzas tipológicas, proyectual, como la ermita de Nules, parroquia de San Andrés en LÀlcudia y la iglesia de Escuelas Pías y personales conducen, reafirman hipótesis de la autoría el maestro Gilabert de la ermita de Sant Bernat.

Resultados

La composición proyectual, el trazado de la Ermita de San Bernardo, forma parte de la transición del barroco de la primera mitad del siglo XVIII a la norma académica fundada en 1768.

La ermita fue construida entre 1762 y 1765, y consagrada en 1769 y la autoría es probablemente atribuible al arquitecto Antoni Gilabert. El arquitecto Gilabert tenía una estrecha relación con los condes de Carlet en otros proyectos de tierras vecinas dentro de su jurisdicción.

Las semejanzas tipológicas, proyectual, como la ermita de Nules, parroquia de San Andrés en LÀlcudia y la iglesia de Escuelas Pías y personales conducen, reafirman hipótesis de la autoría el maestro Gilabert de la ermita de Sant Bernat.



Imagen 5. Vista sur-norte con el camino delante de la nube puntos del paraje con el ermita
Image 5. South-north view with the path in front of the cloud Points of the place with the hermitage



Imagen 6. Ortofoto del del paraje de Pintarrafes
Image 6. Orthophoto of the place de Pintarrafes

Conclusiones

Las disposiciones legales patrimoniales de la Ley 4/1989 de Patrimonio Cultura Valenciana: aplicable al caso que nos ocupa: Artículo 26 Es el lugar vinculado a acontecimientos pasados, tradiciones populares o creaciones culturales de valor histórico, etnológico o antropológico. Por lo que se refiere al paraje de Pintarrafes, hay que decir que forma parte de un entorno muy estimable como es la llanura de la Ribera, de altos valores paisajísticos que rodean a una arquitectura académica ilustrada y que su protección está claramente ligada a la del bien arquitectónico y en definitiva se trata de un espacio muy vinculado a la figura de San Bernardo y sus hermanas y a la conmemoración de su martirio, que se materializa en una arraigada tradición popular que traspasa los límites y abarca la región.

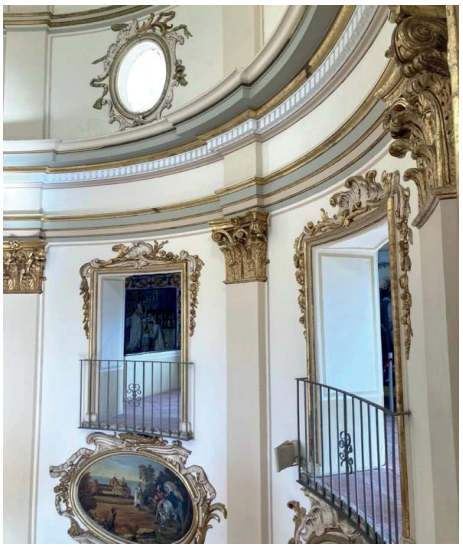


Imagen 8. Fotografía interior desde uno de los balcones
Image 8. Interior photograph from one of the balconies



Imagen 9. Fotografía interior de la cúpula
Image 8. Interior photograph of the dome



Imagen 10. Foto del paraje colindante
Image 10. Photo of the adjoining area



Imagen 11. 2024 Ermita
Image 10. 2024 Hermitage

Conclusiones

Las disposiciones legales patrimoniales de la Ley 4/1989 de Patrimonio Cultura Valenciana: aplicable al caso que nos ocupa: Artículo 26 Es el lugar vinculado a acontecimientos pasados, tradiciones populares o creaciones culturales de valor histórico, etnológico o antropológico. Por lo que se refiere al Yacimiento de Pintarrafes, hay que decir que forma parte de un entorno muy estimable como es la llanura de la Ribera, de altos valores paisajísticos que rodean a una arquitectura académica ilustrada y que su protección está claramente ligada a la del bien arquitectónico y en definitiva se trata de un espacio muy vinculado a la figura de San Bernardo y sus hermanas y a la conmemoración de su martirio, que se materializa en una arraigada tradición popular que traspasa los límites y abarca la región.

BLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- Aloy, José. La Diputación de la Generalidad del Reino de Valencia, Martínez Valencia, 1924
- Esquilache Martí, F., Capitulo de libro de Carlet. Historia, Geografía, Arte y Patrimonuio. Titulado: La alquería de Carlet en época andalusí. Valencia, 2015
- Hidalgo Mora, J. Capitulo de libro del Carlet. Historia, Geografía, Arte y Patrimonio. titulado: Patrimonio religioso. La Ermita de sant Bernat de Carlet. Ed. Universitat de València, Facultat de Geografia i Història, Valencia, 2015
- Martínez, A. (1982): Carta Arqueológica de la Ribera (Valencia), trabajo mecanografiado Alzira
- Monsen Nogués, A. Sang a la Ribera. Sants Bernat, Maria i Gràcia, Valencia, Torre, 1959.
- Pinius, J. en Acta Sanctorum quotquot toto orbe coluntur vel a catholicis scriptoribus celebrantur, Amberes, Bolandistas, 1739
- Plan General de Ordenación Urbana y Catálogos de Protección del municipio de Carlet.
- VVAA. Sants Bernat, Maria i Gràcia, màrtirs d'Alzira, Alzira, Ajuntament d'Alzira, 1997.
- ORELLANA, M.A. (1924) "Valencia antigua y moderna". Acción Bibliográfica valenciana, Valencia. Tomo II, pp. 332-333.

REINTERPRETANDO EL PATRIMONIO DEL MOVIMIENTO MODERNO VALENCIANO: CREACIÓN DE UNA BASE DE DATOS BIM PARA EL EDIFICIO GRAN VÍA MARQUÉS DEL TURIA 29

REINTERPRETING THE HERITAGE OF THE VALENCIAN MODERN MOVEMENT: CREATION OF A BIM DATABASE FOR THE BUILDING AT GRAN VÍA MARQUÉS DEL TURIA 29

Pablo Ariel Escudero
Investigador en el Centro de investigación de la Arquitectura, el Patrimonio y la Gestión para el Desarrollo Sostenible (PEGASO). Contratado FPI, Universitat Politècnica de València; Camino de s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: pabes@arq.upv.es

Jorge García Valldecabres
Investigador en el Centro de investigación de la Arquitectura, el Patrimonio y la Gestión para el Desarrollo Sostenible (PEGASO). Profesor Titular de Universidad, adscrito al Dpto. Expresión Gráfica Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València; Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: jgvallde@ega.upv.es

Concepción López González
Investigadora en el Centro de investigación de la Arquitectura, el Patrimonio y la Gestión para el Desarrollo Sostenible (PEGASO). Catedrática de Escuela Universitaria, adscrita al Dpto. Expresión Gráfica Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València; Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: mlopezge@ega.upv.es

Luis Cortés Meseguer
Investigador en el Centro de Investigación de Tecnología de la Edificación. Profesor Contratado Doctor, adscrito al Dpto. de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València; Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: luicorme@upv.es

Abstract

This work aims to develop a methodology for digitizing the graphical documentation of significant architectural heritage buildings from the Valencian Modern Movement by applying BIM (Building Information Modeling) technology. The objective is to reinterpret the architectural values of these assets by creating a comprehensive BIM database, represented through a digital model of the residential building at Gran Vía Marqués del Turia 29, designed by Joaquín García Sanz in 1958. This study seeks to demonstrate the effectiveness of this methodology in digitization and analysis, ensuring the preservation of knowledge, thorough documentation, and facilitating future interventions.

Furthermore, the research aims to establish a systematic process for constructing a digital database aligned with the guidelines of the National Plan for the Conservation of 20th-Century Cultural Heritage, alongside various guides and charters related to 20th-century heritage, including DOCOMOMO publications. The ultimate goal is to create a centralized, chronological repository of data that serves as a historical archive of the building, safeguarding its original features for future generations.

Keywords
BIM; Heritage; Modern Movement; Valencia

Introduction

The architectural heritage of the Valencian Modern Movement, despite its relative youth, presents a significant challenge in terms of recognition and preservation. These structures, which embody the political, economic, and social thought of their era, were realised through the rational use and evolution of industrialised materials, leading to a profound aesthetic and functional transformation. In recent decades, the heritage of the Modern Movement has gained increasing relevance, driving the need for advanced methodologies to ensure in-depth analysis and effective conservation.

In this context, digitalisation, using technologies such as BIM (Building Information Modelling), emerges as a crucial tool for the documentation and recognition of these works. This study focuses on the reinterpretation of this heritage through the creation of a BIM database for the residential building located at Gran Vía Marqués del Turia 29, designed in 1958.

The BIM methodology, a fundamental digital tool for the organisation, management, and maintenance of projects in the construction and engineering industries, allows for the centralisation and integration of project information in an orderly and standardised manner via a digital model. The primary aim of this study is to establish a systematic process for constructing a digital database that not only aligns with the guidelines of the National Plan for the Conservation of 20th Century Cultural Heritage but also adheres to the principles and charters of the Modern Movement's heritage, including those published by DOCOMOMO (Documentation and Conservation of buildings, sites, and neighbourhoods of the Modern Movement). This initiative seeks to create a centralised and chronological data repository that functions as a historical archive for the building, preserving its original features and ensuring its conservation for future generations.

The architecture of the Modern Movement, as exemplified by the building at Gran Vía Marqués del Turia 29, reflects the social, political, and economic needs of the post-war context. In Spain, the impact of the Civil War and the massive migration to urban centres heightened the demand for housing, influenced by industrialisation and rationalist principles. The ideas of figures such as Le Corbusier, Gropius, and the CIAM shaped the transition towards functional and standardised architecture.

In Valencia, the urban expansion following the demolition of the city walls in 1865 resulted in the development of the Ensanche, regulated by ordinances that defined building heights and setbacks based on street width. During the construction boom from 1945 to 1965, the Valencia Planning Scheme and the Land Act of 1956 promoted residential construction. However, many housing projects veered away from modernist ideals, retaining traditional styles. In the 1950s, the Valencian Modern Movement gained momentum as architects trained in Barcelona and Madrid introduced rationalist principles, gradually transforming the city's architectural landscape.

This research is part of the R&D project titled Analysis and Development of HBIM Integration into GIS for the Creation of a Cultural Heritage Tourism Planning Protocol (PID2020-119088RB-I00), funded by the Ministry of Science and Innovation. This article highlights some of the applications of new technologies for the documentation, maintenance, and dissemination of the architectural heritage of Valencia's historic centre.

Problem Statement

The Modern Heritage of the 20th century faces significant challenges that jeopardise its preservation and recognition. The rapid cultural production during the industrial era has made it difficult to establish clear criteria for determining which works should be considered heritage, largely due to the absence of an adequate temporal perspective. Additionally, state and regional legislation lack the specific and consistent attention necessary to protect these assets effectively.

Moreover, the preservation of these buildings is particularly vulnerable due to the diversity of materials, techniques, and construction systems employed, complicating the application of appropriate intervention strategies. This challenge is further exacerbated by a lack of social awareness regarding the historical and cultural value of these works, which diminishes interest from both public administrations and society at large in safeguarding them.

The heritage of the Modern Movement, in particular, is exposed to numerous risks, including neglect, destruction, functional obsolescence, and irreversible modifications caused by inadequate conservation processes. The threat of falsifications also distorts its true significance and value, endangering its integrity as cultural heritage. These issues are compounded by the lack of a clear and agreed-upon definition of its patrimonial character, deficiencies in protective regulations, the diversity of materials and techniques used, and the limited social appreciation of its historical and cultural importance.

Justification

In today's globalised society, digital technologies have profoundly transformed how information is transmitted and heritage is disseminated. These tools have facilitated the recognition and preservation of the architectural legacy of the 20th century, a task that is becoming increasingly relevant. This recognition is closely linked to the principles of sustainability, which advocate for an ethical approach to cultural heritage conservation.

However, the obsolescence of these constructions, accelerated by the lack of sufficient historical distance, poses a significant challenge for their interpretation and preservation. To address this issue, it is essential to engage society in valuing the cultural significance these works embody.

In this context, Building Information Modelling (BIM) emerges as a crucial tool for the preservation and adaptation of 20th-century heritage. Designed for standardised works, BIM is particularly well-suited to this type of heritage, characterised by repetitive, industrialised, or rationalised elements. This methodology not only facilitates detailed documentation and efficient management but also enables the planning of interventions that respect the architectural and historical integrity of the buildings.

Objectives

1. **Digitise the documentation**
   Obtain and digitise the original graphic documentation of the Gran Vía Marqués del Turia 29 building, ensuring its compatibility with the existing state of the property.

2. **Create a BIM database**
   Develop a BIM database to document the general characteristics of the building, including geometric information, materials, and structural systems.

3. **Contribute to the preservation of architectural heritage**
   Utilise the BIM database as a tool for the efficient conservation and management of the architectural heritage of the Modern Movement. The digital model will support informed decision-making to ensure the building's proper preservation, relying on precise and up-to-date information.

4. **Facilitate research and dissemination**
   Promote access to information about the Gran Vía Marqués del Turia 29 building through the BIM database, encouraging academic research and public dissemination of the history and significance of the Modern Movement in Valencian architecture.

Methodology

The methodology developed focuses on the use of advanced technologies, such as Building Information Modelling (BIM), to address the challenges of documenting, preserving, and managing the architectural heritage of the Modern Movement. It is structured in three main sections:

Building Information Modelling (BIM) has its roots in the evolution of CAD (Computer-Aided Design) technologies, developed at the Massachusetts Institute of Technology (MIT) in 1955. These technologies were initially created to optimize design times in the Architecture, Engineering, and Construction (AEC) industry, evolving over time into what we now know as BIM.

Although the concept of BIM emerged in the 1970s, its effective implementation has gained significant relevance in recent decades. BIM is defined as the digital representation of construction processes, enabling interoperability and the exchange of information in digital formats. This system integrates the geometric, physical, and functional characteristics (Fig. 5) of a building into a digital model that can be used throughout the entire project lifecycle: from design to operation and maintenance (Eastman, 1999).

One of the main advantages of BIM is its parametric capacity: changes made to one component automatically update all related elements, ensuring consistency and accuracy across all views and data of the model. This approach significantly enhances efficiency and coordination between disciplines such as architecture, engineering, and construction by integrating all information into a single digital model.

BIM models allow for advanced simulations, such as energy performance analysis, detection of construction conflicts, and logistical planning. These simulations are key to anticipating problems and optimizing the design before the construction phase. Additionally, BIM extends beyond the construction process by providing an updated database that optimizes building operation and maintenance, helping to extend its lifespan and reduce operating costs.

BIM for the Digitalization of Modern Movement Heritage

The application of BIM in the architectural heritage of the Modern Movement is an indispensable tool for documenting, analyzing, and preserving historical buildings. Although initially conceived for contemporary construction, BIM has been adapted as a comprehensive solution for heritage studies, enabling the creation of virtual models that integrate detailed information about materials, structures, and installations.

This capability is crucial for ensuring that future interventions are precise and based on a thorough understanding of the building, promoting the preservation of its architectural integrity. In the case of the Modern Movement, where repetitive and industrialized elements predominate, BIM's functionalities perfectly align with conservation needs, facilitating the identification, diagnosis, and maintenance of these buildings.

Furthermore, BIM contributes to social involvement in the appreciation and preservation of cultural heritage, promoting its adaptation to new citizen demands and encouraging responsible use. As a tool for dissemination and preservation, BIM strengthens the efficient management of 20th-century architectural heritage, providing technological solutions for documenting and conserving historical buildings in a precise and sustainable manner.

Application Methodology

The specific methodology for the conservation of the architectural heritage of the Modern Movement is based on the National Conservation Plan for 20th Century Cultural Heritage, the Spanish

regulatory framework on heritage, and the objectives of DOCOMOMO. The process is structured in the following phases:

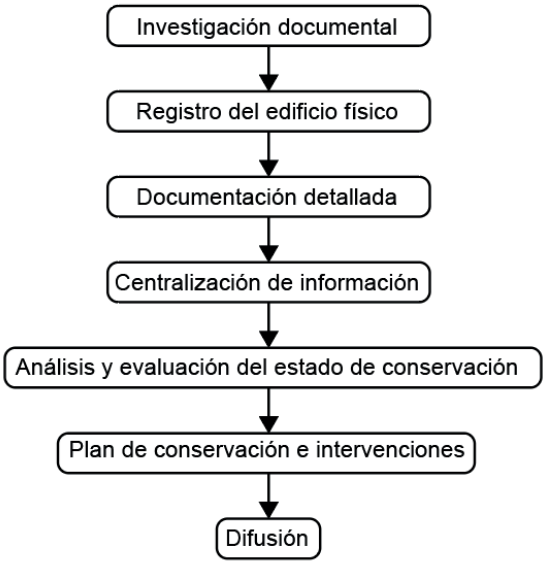


Imagen 1. Fases metodológicas. Image 1. Methodological Phases

Case Study: Residential Building at Gran Vía Marqués del Turia 29

This building was selected primarily for its uniqueness as a corner construction in the expansion area of Valencia. It is one of the earliest examples of the work of García Sanz, whose original design from 1958, contemporary with that of Santa María Micaela, reflects the reduction of architecture to its essential elements. Despite being a freshly graduated architect at the time, García Sanz achieved a design and construction resolution that is on par with his contemporaries. Furthermore, this work has survived to this day in excellent condition, with minimal modifications, allowing for a detailed and faithful analysis of the original conception.

The building marked one of his first significant works before partnering with architect Vicente Valls Abad. Located in the L'Eixample district, in the El Pla del Remei neighbourhood (Figure 14), at the intersection of Gran Vía Marqués del Turia and Pizarro Street in Valencia, it stands as a prominent example of the rationalist architecture of the time (Pérez Mengual, 2016).



Imagen 2. Localización del edificio de viviendas de Gran Vía Marqués del Turia 29. Google Earth 2024.
Image 2. Location of the residential building at Gran Vía Marqués del Turia 29. Google Earth 2024.



Imagen 3. Alzados del edificio de viviendas de Gran Vía Marqués del Turia 29, Valencia, J. García Sanz (1956).
Image 3. Elevations of the residential building at Gran Vía Marqués del Turia 29, Valencia, J. García Sanz (1956).

Detailed Documentation: Based on the information obtained from the documentary research and photographic recording of the building, the digitisation of the floor plans contained in the file is carried out, using the original plans and data collected in the field. Initially, the floor plans were developed in CAD format (Image 4), which served as the foundation for the creation of the 3D BIM model (Image 5).



Imagen 4. Proceso de digitalización en Autodesk AutoCAD y Revit 2024 de la planimetría del edificio.
Image 4. Digitisation process in Autodesk AutoCAD and Revit 2024 of the building's plans.

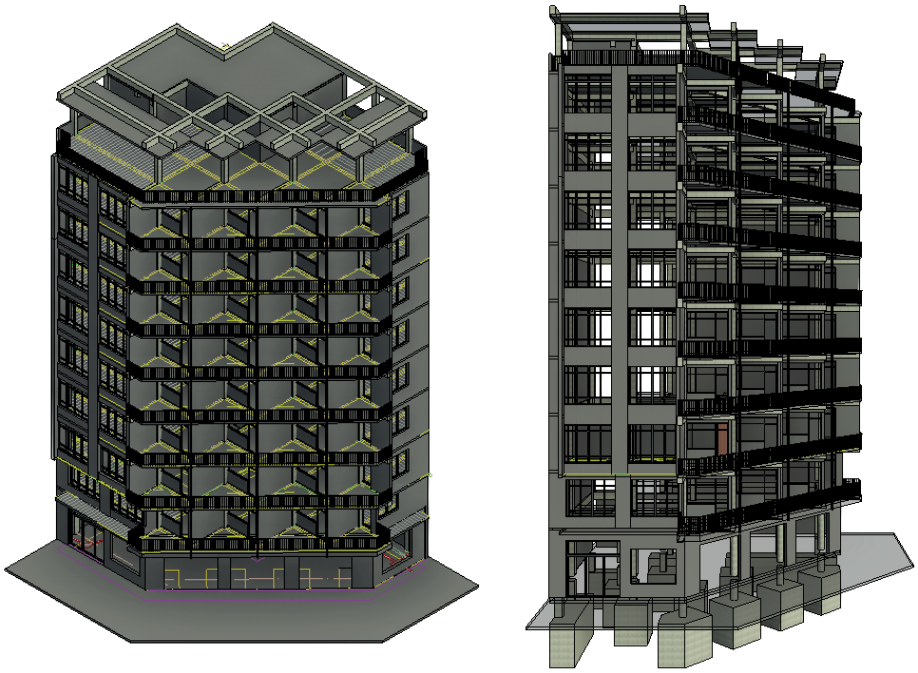


Imagen 5. Proceso de modelado BIM en Autodesk Revit 2024 del edificio.
Image 5. BIM modeling process in Autodesk Revit 2024 of the building.

Centralisation of Information: A database has been designed in Microsoft Access, linked to the BIM model, which serves as a comprehensive digital repository for the building. This database connects the BIM model with the information from the documentary research and images of its current state. To achieve this, an organised BIM database has been developed, facilitating the consultation and registration of new information (Image 6).

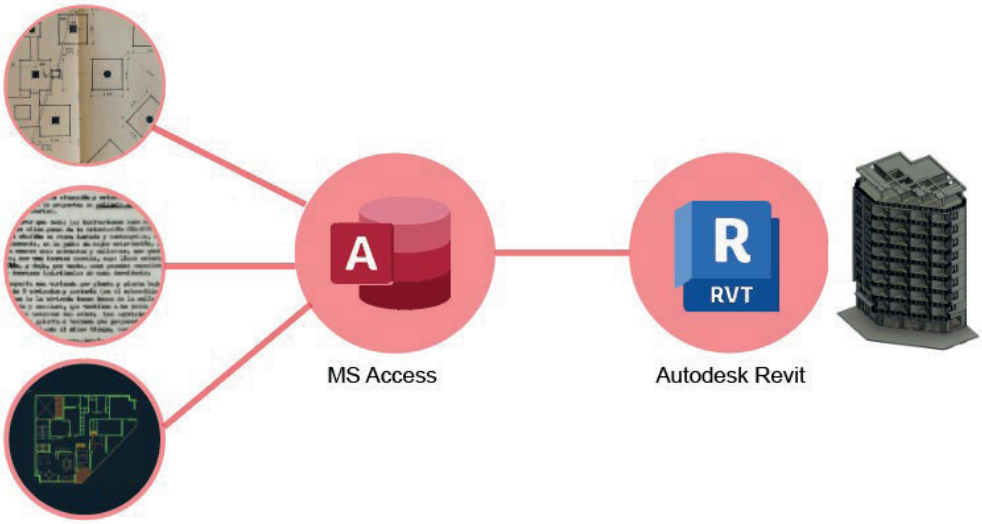


Imagen 6. Esquema del repositorio digital.
Image 6. Diagram of the digital repository.

The digitization of the building into 3D BIM geometries enables more efficient information retrieval through a graphical interface, making the database information more accessible. The creation of a file containing the building's general data and the digitalization of the municipal file contribute to a better understanding of the building's history, its construction process, and the modifications it has undergone over time (Figure 27). Additionally, using the BIM model to visualize the state of

conservation, modifications, and current issues facilitates building management by providing a comprehensive view of its condition and the challenges it faces (Image 7).

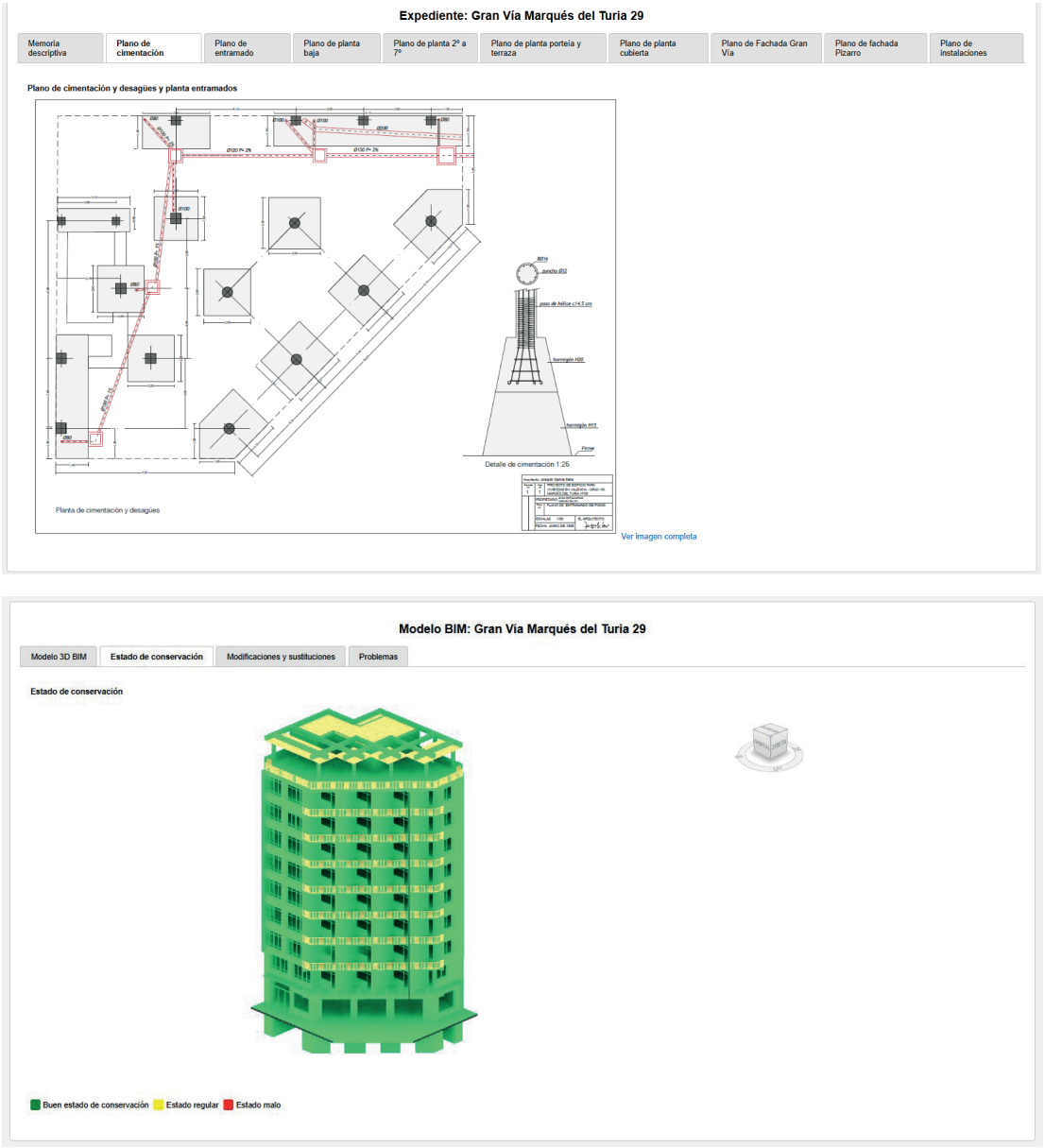


Imagen 7. Visualización de la base de datos BIM.
Image 7. Visualization of the BIM database.

Conclusions

The preservation of cultural heritage, particularly that related to the Modern Movement, requires active societal involvement in recognizing and valuing its cultural significance. Conservation not only enriches our historical understanding but also reflects the technological and social advancements that defined a pivotal era in architecture.
The legacy of the Modern Movement, exemplified by the work of García Sanz and based on the teachings of Le Corbusier, has left an indelible mark on European residential architecture. This movement transformed the way housing design and construction are conceived, integrating efficiency, technology, and functional aesthetics. Thanks to these advances, not only was the quality and speed of construction improved, but access to high-quality housing was also facilitated for a larger number of people. Furthermore, the influence of the Bauhaus and Modernist principles continues to be

fundamental in contemporary architecture, demonstrating how innovation can coexist with functionality and efficient design.
The integration of advanced technologies, such as BIM, has become an essential tool for the conservation of 20th-century heritage. The digitalization and centralization of information in a digital repository act as a "medical history" of the building, facilitating its maintenance and preventing the loss of its identity.
However, beyond management and conservation, the development of digital platforms that centralize and link information serves not only as a practical tool but also plays a crucial role in disseminating the cultural value of these buildings. By making part of the digitized documentation accessible, these platforms contribute to the visibility of the work and raise awareness about its importance. This process has a direct impact on long-term preservation, ensuring that the heritage remains appreciated and protected by future generations.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- Cassinello, P. (2008). Eduardo Torroja y la industrialización de la machine à habiter 1949-1961. Informes De La Construcción, 60(512), 5–18. https://doi.org/10.3989/ic.08.031
- Colomer Sendra, V. (2002) Registro de Arquitectura del s. XX, Comunidad Valenciana. Valencia, Colegio Oficial de Arquitectos de la Comunidad Valenciana, Consejería de Obras Públicas, Urbanismo y Transporte, Instituto Valenciano de la Edificación.
- Cortés, J. A. (2009). Modernidad y vivienda en España, 1925-1965. En La vivienda moderna. Registro DOCOMOMO ibérico. 1925-1965 (pp. 11-34). Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos/DOCOMOMO Ibérico.
- DOCOMOMO Iberico. Registro: La vivienda Moderna http://www.DOCOMOMOiberico.com/
- Gaja, F. (1999). *La Promoción Pública de la Vivienda en Valencia (1939-1976)*. COPUT. Valencia: ETSAM.
- Eastman, C. M. (1999). Building Product Models: Computer Environments Supporting Design and Construction. Flroida: Boca Ratón.
- García Sanz, J. (1961) "Edificio para viviendas en Valencia," Arquitectura 34 (1961): 15-17.
- González Capitel, A. Hacia la modernidad. Madrid, 1940-1980. Notas sobre cuatro décadas en la enseñanza de proyectos y en la arquitectura de la ciudad. En *Madrid y sus arquitectos. 150 años de la Escuela de Arquitectura*. TF Editores.
- Jordá Such, C., Martínez Medina, A., & Prior i Llombart, J. (2012). *Arquitectura moderna y contemporánea de la Comunidad Valenciana*. Colegio de Arquitectos de la Comunitat Valenciana, Consellería de Infraestructures, Territori i Media Ambient.
- Jordá Such, C. (2007). *Vivienda moderna en la Comunidad Valenciana*. Colegio Oficial de Arquitectos de la Comunidad Valenciana, Consejería de Medio Ambiente, Agua, Urbanismo y Vivienda.
- Ministerio de Educación, Cultura y Deporte (MECD). (2015). Plan Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural del Siglo XX. ISBN 978-92-0-000293-9.
- Pérez Igualada, J. (2005). La ciudad de la Edificación Abierta. Valencia, 1946-1988 (Tesis doctoral). UPV.
- Pérez Mengual, J. F. (2016). Impulsores de la modernidad en la Arquitectura. La Arquitectura de Valls y García Sanz. Aportaciones a la estandarización, normalización y prefabricación (1952-1982) (Tesis doctoral). CEU.

APROXIMACIÓN MATERIAL DE LA PANDA ESTE DEL CLAUSTRO MAYOR, ANTIGUO CONVENTO DE SANTO DOMINGO (VALENCIA)

MATERIAL APPROXIMATION OF THE EAST SIDE OF THE MAIN CLOISTER, FORMER CONVENT OF SANTO DOMINGO (VALENCIA)

S. Kröner
Doctor en Geología, especializado en Conservación y restauración del Patrimonio Cultural. PhD in Geology specialised in Conservation and restoration of Cultural Heritage. E-mail: stephan.kroner2013@gmail.com
E. Arias-Valera
Arquitecta Técnica. Graduada en Conservación y Restauración de Bienes Culturales. Universidad Politécnica de Valencia./ Building Engineer. Graduated in Conservation and Restoration of Cultural Heritage. E-mail:engracia05@gmail.com
L. Osete-Cortina
I*nvestigadora en el Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio. Universitat Politècnica de València. Profesora Asociada en el Dpto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, Facultad de Bellas Artes, UPV. Doctora en Química por la UV. Researcher in the Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio. Associate Professor at the Department of Conservation and Restoration of Cultural Assets, Faculty of Fine Arts, UPV. PhD in Chemistry. E-mail: losete@crbc.upv.es*
X. Mas-Barberà
Investigador en el Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio. Universitat Politècnica de València (UPV). Profesor Catedrático de Universidad, Conservador y restaurador de escultura y ornamentos. Doctor en Bellas Artes por la UPV. Researcher in the Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio. Senior Professor at the UPV, Conservator and restorer of sculpture and ornaments. PhD in Fine Arts. E-mail: jamasbar@upvnet.upv.es

Abstract

This study examines the stone materials utilised in the east wall of the main cloister of the former Convent of Santo Domingo, a Gothic monument of significant renown in Valencia. The findings are derived from the research conducted as part of the preliminary studies on the east side of the cloister, which were commissioned by the Colonel Governor of the High Readiness Land Headquarters to the University Institute of Heritage Restoration of the Universitat Politècnica de València. During the course of the work, the lithotypes and their varieties from historical quarries in the Crown of Aragon region were identified, some of which were original and others the result of later replacements. This diversity of materials reveals the logistical complexity and resources invested in construction during the medieval period in this typology of mendicant buildings. Furthermore, the most salient properties of the natural stone materials are addressed, providing pivotal information for the diagnosis and planning of conservation treatments aimed at ensuring their resistance to environmental deterioration. Finally, the research suggests that the ancient builders may have utilised the stone resources available in the region to achieve a work with a certain stylistic coherence adapted to the architectural arcade.

Keywords
Former Convent of Santo Domingo (Valencia), gothic tracery, Blue Girona stone, tosca de Rocafort stone.

Introducción

El presente estudio recoge los resultados obtenidos de los análisis llevados a cabo sobre los materiales pétreos presentes en la panda este del Claustro Mayor, Antiguo Convento de Santo Domingo de Valencia (Figura 1). Actualmente, se ubica en el mencionado convento el Cuartel General Terrestre de Alta Disponibilidad de Valencia (CGTAD), conocido aún como Capitanía General tras la exclaustración de los dominicos hace más de 175 años. El CGTAD es dependiente del Ministerio de Defensa en cuya Dirección de Infraestructura de la Inspección General del Ejército de Tierra recae el cuidado y la salvaguarda de este patrimonio cultural catalogado.

Por este Antiguo Convento de Santo Domingo transitaron figuras históricas destacadas como Miguel de Fabra, Pedro Boil, San Vicente Ferrer, San Luis Beltrán, los Reyes de Aragón Alfonso V el Magnánimo y su esposa María de Castilla, el Papa Luna, el Rey Felipe II y, otros religiosos y personajes de la cultura y política local y centroeuropea. La importancia de esta construcción medieval fue distinguida por Jerónimo Münzer, ilustre humanista alemán que, en 1504, se refería al convento como "magnífica fábrica con grandes huertas y claustros" (Zaragozá Catalán, 1995). Este convento, cargado de historia y simbolismo, se erige como uno de los monumentos más importantes, aunque también más desconocido, de la ciudad de Valencia (Puig Nebot, 2018).

En la fábrica objeto de estudio se evidencia diferentes tipos de materiales: i) pétreos naturales; ii) morteros de cal; iii) morteros de yeso; y, iv) materiales cerámicos. El método de trabajo de toma de datos se concretó en: a) Documentar fotográficamente y observar áreas específicas con microscopio USB; así como, b) Analizar muestras representativas de los materiales mediante MO y SEM/EDX. En este texto sólo se hace referencia exclusivamente a los materiales pétreos naturales.

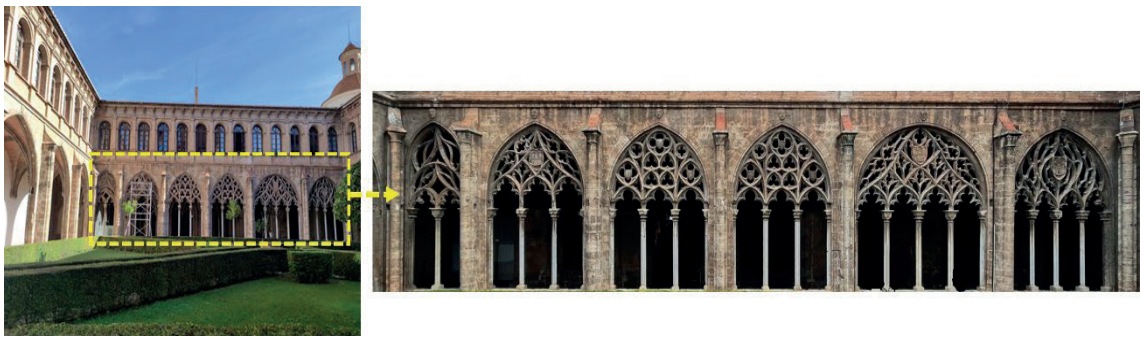


Figura 1. Vista general del Claustro Mayor y de detalle de la panda este objeto de estudio. **Figure 1.** General view of the main cloister and detail view of the east side of the cloister.

Materiales pétreos naturales

La piedra empleada en la construcción de la tracería de los arcos de la panda este del claustro corresponde básicamente con piedras de origen sedimentario. Son piedras del tipo carbonático, con sillares de piedra caliza relativamente vulnerable a determinados factores de deterioro (humedades, contaminación, temperatura, sales entre otros) (Tabla 1).

Introduction

This study presents the results obtained from the analyses carried out on the stone materials present on the east side of the east wall of the Main Cloister, Former Convent of Santo Domingo in Valencia (Figure 1). The convent is currently home to the High Availability Terrestrial Headquarters of Valencia (CGTAD), still known as the Captaincy General after the secularisation of the Dominicans more than 175 years ago. The CGTAD is dependent on the Ministry of Defence, whose Directorate of Infrastructure of the General Inspectorate of the Army is responsible for the care and safeguarding of this listed cultural heritage.

This Old Convent of Santo Domingo was visited by outstanding historical figures such as Miguel de Fabra, Pedro Boil, San Vicente Ferrer, San Luis Beltrán, the Kings of Aragon Alfonso V the Magnanimous and his wife Maria of Castile, Pope Luna, King Philip II and other religious and cultural figures and local and Central European politicians. The importance of this mediaeval construction was noted by Hieronymus Münzer, an illustrious German humanist who, in 1504, referred to the convent as a 'magnificent factory with large gardens and cloisters' (Zaragozá Catalán, 1995). This convent, steeped in history and symbolism, stands as one of the most important, although also the most unknown, monuments in the city of Valencia (Puig Nebot, 2018).

Different types of materials are evident in the factory under study: i) natural stone; ii) lime mortars; iii) gypsum mortars; and, iv) ceramic materials. The working method of data collection consisted of: a) photographic documentation and observation of specific areas with USB microscopy; as well as, b) analysis of representative samples of the materials by means of MO and SEM/EDX. In this text only reference is made exclusively to natural stone materials.

Natural stone materials

The stone used in the construction of the tracery of the arches on the east side of the cloister corresponds basically to stones of sedimentary origin. They are carbonate stones, with limestone ashlars relatively vulnerable to certain deterioration factors (humidity, contamination, temperature, salts, etc.) (Table 1).

Tabla 1. Materiales pétreos detectados en las áreas objeto de estudio a partir de los estudios macroscópicos in situ.
Table 1. Stone materials detected in the study areas from macroscopic studies in situ.

Geological period	***Stone material***	***Extraction area***	**Estimated period of use on site**
Miocene	tosca de Rocafort limestone	Rocafort (Valencia)	s. XIV-XV s. XVIII-XIX
	Biocalcarenite from Novelda "Bateig"	Novelda (Alicante)	s. XX
Eocene	Girona limestone	Girona (Gerona)	s. XV-XVI s. XVIII-XIX

La **piedra tosca de Rocafort** se define, desde el punto de vista petrológico, como una roca sedimentaria carbonatada de la familia de las calizas que posee una estructura travertínica. La piedra tosca de Rocafort ha sido denominada históricamente piedra de Godella debido a la vecindad entre ambos términos y porque Rocafort, señorío adscrito a la Batlía de Moncada, desdibujaba los lindes de su territorio. Situada en el término de Rocafort, (Mapa Geológico Nacional, hoja 696, Burjassot, E. 1:50000) sus frentes se emplazan por varios puntos del término, desde el actual casco urbano hasta la urbanización de Santa Bárbara. En ésta se encuentra la Pedrera del Badall (actualmente en los terrenos del Club de Campo) una de las partidas más históricas y de la que salió la piedra con la que se edificaron el Miguelete, las torres de Serranos y la mayor parte de las edificaciones públicas antiguas de Valencia. Cronológicamente, las canteras de Rocafort fueron inicialmente explotadas por los romanos para sus construcciones en Valencia en el siglo I. Así mismo, en el siglo XIII siguieron explotándose de forma masiva (la Catedral, el Miguelete, las Torres de Serranos, la Lonja, el Palau de la Generalitat, el Torreón...) hasta finales del siglo XVIII (el Temple, la Basílica de la Virgen...) en que se agotan.

Se trata de una roca caliza de tipo travertino en tonos beige claro, ligera, y que ocasionalmente contiene inclusiones localizadas de materiales arcillosos. Por su naturaleza es una roca esparítica constituida por agregados microcristalinos cuyo desarrollo posibilita una intensa porosidad al conjunto rocoso. Los poros, con frecuencia, están intercomunicados (porosidad abierta > 20 %) y presentan tapizadas sus paredes de cristales transparentes de calcita de tonos claros. Al microscopio electrónico de barrido se observa cómo, en este material uniforme, se dispone aleatoriamente restos de precipitaciones orgánicas de tipo algal, y microplanos de deposición sedimentaria. La piedra tosca de Rocafort se ha empleado en las zonas de sillería y en la tracería flamígera de los arcos ojivales tanto de la panda este del claustro como de la fachada del Aula Capitular (Figura 2).

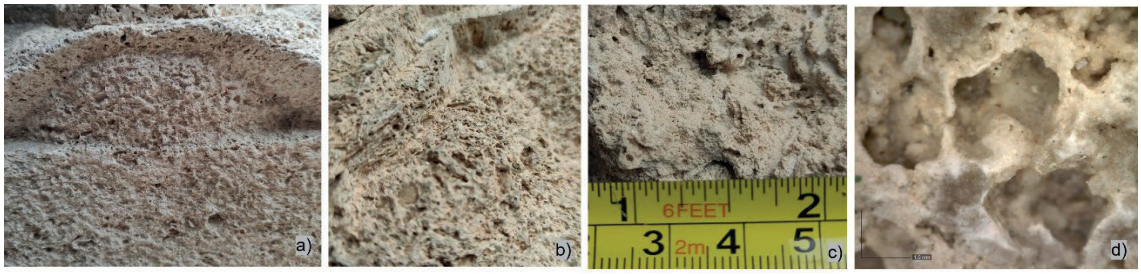


Figura 2 (a-d). Piedra caliza tosca de Rocafort. a-c) Vista de detalle de la textura superficial del litotipo de una de las bases de la panda este. d) Detalle del pétreo visto al microscopio Digital USB DinoLite AM4113T. **Figure 2 (a-d).** Coarse limestone from Rocafort. a-c) Detail view of the surface texture of the lithotype of one of the bases of the east panel. d) Detail of the stone as seen under the DinoLite AM4113T USB Digital Microscope.

La **piedra de Girona** es conocida con el nombre de caliza nummulítica por la presencia masiva de fósiles de foraminíferos (nummulites). Las áreas de extracción se localizan en la zona occidental de la ciudad de Girona y es un tipo de piedra caliza compacta, coherente y de color variable, de blanquecino a gris oscuro.

Para este trabajo se han tenido en consideración los resultados petrológicos obtenidos por Rosa María Esbert y su equipo durante los estudios petrofísicos de la piedra de Girona (Esbert, et al. 2001) con motivo de la restauración de la fachada de la Catedral de Girona, dada la misma tipología de material empleado en los elementos arquitectónicos del Claustro Mayor objeto de este estudio. Asimismo, de este trabajo resulta interesante la comparativa entre la piedra de Girona primitiva (canteras históricas), procedente del monumento, con respecto a la piedra de Girona de extracción más reciente. En este sentido, se advierten diversas variedades que exhiben diferencias de tipo composicional (con niveles más margosos o arenosos) así como textural (mayor o menor abundancia de fósiles, diferencias de color y compacidad). Los colores varían desde los tonos claros, blanco-amarillentos hasta los tonos grises o azulados.

From a petrological point of view, the **Tosca de Rocafort** stone is defined as a carbonate sedimentary rock of the limestone family with a travertine structure. The Tosca de Rocafort stone has historically been called Godella stone due to the proximity between the two municipalities and because Rocafort, a lordship attached to the Batlía de Moncada, blurred the boundaries of its territory.

Located in the municipality of Rocafort, (National Geological Map, sheet 696, Burjassot, E. 1:50000) its fronts are located in various parts of the municipality, from the current town centre to the Santa Bárbara housing estate. This is the site of the Pedrera del Badall (currently in the grounds of the Club de Campo), one of the most historic quarries, from which the stone used to build the Miguelete, the Serranos towers and most of the old public buildings in Valencia was quarried. Chronologically, the Rocafort quarries were initially exploited by the Romans for their constructions in Valencia in the 1st century. Likewise, in the 13th century they continued to be exploited on a massive scale (the Cathedral, the Miguelete, the Serranos Towers, the Lonja, the Palau de la Generalitat, the Torreón...) until the end of the 18th century (the Temple, the Basílica de la Virgen...) when they were exhausted.

It is a travertine-type limestone in light beige tones, light and occasionally containing localised inclusions of clayey materials. By its nature, it is a sparitic rock made up of microcrystalline aggregates whose development allows for an intense porosity in the rocky complex. The pores are often interconnected (open porosity > 20 %) and their walls are lined with transparent, light-coloured calcite crystals. Scanning electron microscopy shows how, in this uniform material, traces of algal-like organic precipitates and micro layers of sedimentary deposition are randomly arranged. The tosca de Rocafort stone has been used in the ashlar areas and in the flamboyant tracery of the pointed arches both on the east side of the cloister and on the façade of the Chapter House (Figure 2).

The **Girona stone** is known as nummulitic limestone due to the massive presence of foraminiferal fossils (nummulites). The extraction areas are located in the western part of the city of Girona and it is a type of limestone that is compact, coherent and variable in colour, from whitish to dark grey.

For this work we have taken into consideration the petrological results obtained by Rosa María Esbert and her team during the petrophysical studies of the Girona stone (Esbert, et al. 2001) on the occasion of the restoration of the façade of the Cathedral of Girona, given the same typology of material used in the architectural elements of the Major Cloister that are the object of this study. Also of interest in this work is the comparison between the primitive Girona stone (historical quarries) from the monument and the more recently quarried Girona stone.

In this sense, there are several varieties that exhibit compositional differences (with more loamy or sandy levels) as well as textural differences (greater or lesser abundance of fossils, differences in colour and compactness). The colours vary from light, yellowish-white to grey or bluish tones. Overall, three varieties can be distinguished according to colour and appearance: i) white, with light yellowish tones; ii) blue, with bluish-grey tones; and iii) ray, which combines both colours in an irregular way. There is also a clear difference between the type of stone that was extracted from historic quarries and stone from present-day quarries. The historical quarries (Les Pedreres and areas of the mountain of Montjuïc, among others) supplied the material for the manufacture of pieces in the Proto-Augustan period and, later, in monumental buildings from the Middle Ages (walls and Cathedral of Girona, Santes Creus, Poblet, among others) until well into the 18th century, when extraction progressively decreased and meant their total or partial abandonment (Esbert, et al. 1991). Currently, there are active mines of nummulitic limestone similar to the Girona stone for new construction; this is the Sant Vicenç stone, which comes from Sant Vicenç de Castellet and other localities in the Bages region.

En conjunto, se distinguen tres variedades según color y apariencia, i) la blanca, de tonos claros amarillentos; ii) la azul, de tonos gris azulados; y iii) el rayo, que combina ambos colores de forma irregular. Asimismo, se aprecia una clara diferencia entre el tipo de piedra que fue extraída de canteras históricas y la piedra de canteras actuales. Las canteras históricas (Les Pedreres y zonas de la montaña de Montjuïc, entre otras) suministraron el material para la fabricación de piezas en época protoaugusta y, posteriormente, en edificaciones monumentales desde la edad media (muralla y Catedral de Girona, Santes Creus, Poblet, entre otros) hasta bien entrado el siglo XVIII, donde fue progresivamente disminuyendo la extracción y significando su abandono total o parcial (Esbert, et al. 1991). Actualmente, se encuentran en activo explotaciones de calizas nummulíticas similares a la piedra de Girona para nueva construcción; se trata de la piedra de Sant Vicenç, que procede de Sant Vicenç de Castellet y otras localidades de la comarca del Bages.

Asimismo, según Esbert (2001) el componente mineral mayoritario de la caliza de Girona es la calcita, aunque también presenta componentes terrígenos minoritarios constituidos por cuarzo y, en menor proporción, por minerales arcillosos, óxidos de hierro y materia orgánica. La piedra procedente de las canteras actuales presenta mayor cantidad de terrígenos (granos de cuarzo), tal y como se aprecia en los análisis mediante microscopio USB, in situ. En general, la textura esqueletal es clástica, granosoportada, de grano muy grueso, debido del tamaño de los nummulites, y como fase de unión presenta matriz heterogranular. Los granos son mayoritariamente nummulites y miden alrededor de 1 cm, y también son frecuentes los de 2 mm (Figura 3). Entre la disposición intersticial a los nummulites, y en distinta proporción, se presenta una matriz arenosa (tamaño del grano, 500 micras), constituida mayoritariamente por restos fósiles (pequeños fragmentos de nummulites y foraminíferos) y, en menor cantidad, grandes terrígenos (cuarzo), todos rodeados en una matriz más fina.

Texturalmente, se observan diferencias entre las distintas variedades de piedra Girona. En las canteras actuales apenas incluyen nummulites de mucho tamaño (1 cm), y la fase de unión es más abundante, más gruesa (tamaño arena 500 micra) y rica en terrígenos (Figura 4). En cambio, las piedras de las canteras históricas presentan grandes nummulites (superior a 1 cm) junto con otros más pequeños (2 mm), fuertemente empaquetados, con escasos granos de unión, del tipo micrita y partículas de cuarzo de tamaño lodo (50 micras). En este caso, debido a la escasez de matriz y el grado de empaquetamiento, la orientación de la roca es mayor. También es reseñable indicar que la piedra tiene un aspecto compacto y no se aprecian poros ni microporos. En general, se trata de una roca de baja porosidad, localizada mayoritariamente con disposición intersticial con respecto a los granos, con tendencia a formar fisuras. Finalmente, la diferencia de color entre las variedades de piedra Girona se atribuye a ligeras variaciones en el contenido de minerales opacos del tipo óxidos de Fe y materia orgánica (Esbert, et al. 2001).

La piedra de Girona se ha empleado en su variedad azul, procedente de canteras históricas, en las piezas de los fustes, capiteles y basas primitivas y, en su variedad blanca y rayo, en las piezas de los capiteles repuestas, presumiblemente, en el siglo XIX tras el deterioro ocasionado por la contienda de los franceses.

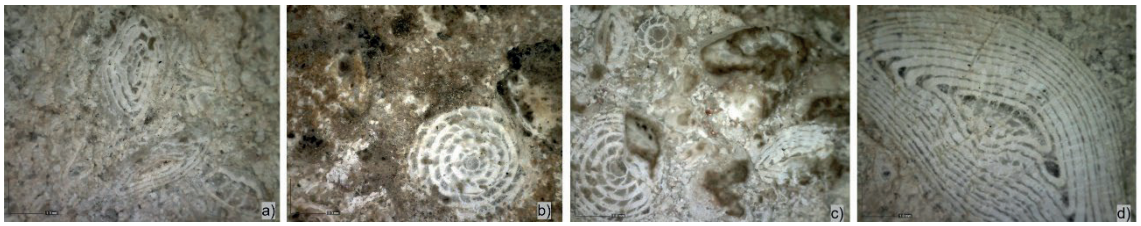


Figura 3 (a-d). Caliza de Girona azul, detalles de la textura pétrea vistas al microscopio Digital USB DinoLite AM4113T. a) Fuste 1, Arco 2; b) Fuste 5, Arco 6; c) Fuste 4, Arco 3; d) Fuste 5, Arco 4. **Figure 3 (a-d).** Blue Girona limestone, details of the stone texture as seen under the DinoLite AM4113T USB Digital Microscope. a) Base 1, Arch 2; b) Base 5, Arch 6; c) Base 4, Arch 3; d) Base 5, Arch 4.

Likewise, according to Esbert (2001), the main mineral component of the Girona limestone is calcite, although it also has minor terrigenous components made up of quartz and, to a lesser extent, clay minerals, iron oxides and organic matter. The stone from the current quarries has a higher quantity of terrigenous (quartz grains), as can be seen in the analysis by USB microscope, in situ. In general, the skeletal texture is clastic, grain-supported, very coarse-grained, due to the size of the nummulites, and as a bonding phase it has a heterogranular matrix. The grains are mostly nummulites and measure about 1 cm, and 2 mm grains are also frequent (Figure 3). Between the interstitial arrangement to the nummulites, and in different proportions, there is a sandy matrix (grain size, 500 microns), constituted mostly by fossil remains (small fragments of nummulites and foraminifera) and, to a lesser extent, large terrigenous (quartz), all surrounded in a finer matrix.

Texturally, differences can be observed between the different varieties of Girona stone. The present-day quarries hardly include any large nummulites (1 cm), and the bonding phase is more abundant, coarser (sand size 500 microns) and rich in terrigenous (Figure 4). In contrast, the stones from the historic quarries present large nummulites (larger than 1 cm) together with smaller (2 mm), tightly packed, sparsely bonded, micrite-type grains and mud-sized quartz particles (50 microns). In this case, due to the scarcity of matrix and the degree of packing, the orientation of the rock is higher. It is also noteworthy that the rock has a compact appearance and no pores or micropores are visible. In general, it is a rock with low porosity, mostly localised with an interstitial arrangement with respect to the grains, with a tendency to form fissures. Finally, the difference in colour between the Girona stone varieties is attributed to slight variations in the content of opaque minerals such as Fe oxides and organic matter (Esbert, et al. 2001).

Girona stone has been used in its blue variety, from historic quarries, in the pieces of the shafts, capitals and primitive bases and, in its white and lightning variety, in the pieces of the capitals, which were presumably replaced in the 19th century after the deterioration caused by the French conflict.



Figura 4 (a-t). Caliza de Girona blanca, detalles de la textura pétrea vistas al microscopio Digital USB DinoLite AM4113T. a) Base 1, Arco 1; b) Base 2, Arco 3; c) Base 2, Arco 4; d) Base 3, Arco 1; e) Base 3, Arco 3; f) Capitel 1, Arco 3; g) Capitel 1, Arco 4; h) Capitel 1, Arco 6; i) Capitel 2, Arco 2; j) Capitel 2, Arco 2; k) Capitel 2, Arco 4; l) Capitel 2, Arco 6; m) Capitel 3, Arco 2; n) Capitel 3, Arco 3; o) Capitel 3, Arco 4; p) Capitel 3, Arco 6; q) Capitel 4, Arco 3; r) Capitel 4, Arco 4; s) Capitel 4, Arco 6; t) Capitel 5, Arco 5. **Figure 4 (a-t).** White Girona limestone, details of the stone texture seen under the DinoLite AM4113T USB Digital Microscope. a) Base 1, Arch 1; b) Base 2, Arch 3; c) Base 2, Arch 4; d) Base 3, Arch 1; e) Base 3, Arch 3; f) Capital 1, Arch 3; g) Capital 1, Arch 4; h) Capital 1, Arch 6; i) Capital 2, Arch 2; j) Capital 2, Arch 2; k) Capital 2, Arch 4; l) Capital 2, Arch 6; m) Capital 3, Arch 2; n) Capital 3, Arch 3; o) Capital 3, Arch 4; p) Capital 3, Arch 6; q) Capital 4, Arch 3; r) Capital 4, Arch 4; s) Capital 4, Arch 6; t) Capital 5, Arch 5.

La **piedra de Novelda** se define, desde el punto de vista petrológico, como una roca carbonática del tipo biocalcarenita. Se extrae del área de Vinalopó Medio, Alicante (España oriental). Conocida desde el siglo XIII como material de construcción, es utilizada desde finales del siglo XIX hasta la actualidad para la construcción de edificios y Monumentos de Madrid, Valencia y Alicante. Las principales canteras donde se extrajo dicho tipo de piedra en tiempos pasados, se localizaban en los municipios de Monóvar (Piedra Almorquí), Sax (Piedra Portazgo) y Elda-Novelda (Piedra Bateig). Las características de los materiales extraídos variaban de unas canteras a otras. Actualmente, la actividad de extracción se sitúa en las canteras de Bateig, conocida comercialmente como Piedra Bateig y con diferentes variedades (Crema, Fantasía, Diamante, Llano y Azul) (Fort, et al 2002). Los frentes de explotación de cantera son de grandes dimensiones y en ellos se aprecian distintas tonalidades que van del beige al gris. La Piedra Bateig, gracias a su facilidad de labra, permite su uso tanto para sillería como para ornamento. Como piedra empleada en obras de restauración para sustitución de elementos alterados se pueden citar la fachada de la Universidad de Alcalá (Puché Riart, et al, 1991) y recientemente, la Catedral de la Almudena (1994) en Madrid. En obras nuevas, ejemplos como el Palacio de Linares (1873), el Banco de España (1891), el Monumento a Alfonso XII (1922), entre otras. La Piedra Bateig es una caliza con calcita de bajo contenido en magnesio, y con proporciones mínimas de detritos de dolomita, cuarzo, feldespato y filosilicatos (Ordóñez, 1994; Iglesia, 1998). Los filosilicatos son principalmente illitas con diferente grado de cristalinidad y en menor proporción de esmectitas. El término biocalcarenita o calcárea aloquímica se debe a la presencia de diferentes variedades de fósiles (foraminíferos y restos de briosos, moluscos y equinodermos) en la estructura de la Piedra Bateig. En general, presenta una porosidad abierta por encima del 15 % que la convierte en un material sensible a los efectos del agua y la contaminación ambiental (Mas-Barberà, 2006).



Figura 5 (a-c). Biocalcarenita de Novelda, detalles de la textura pétrea vistas al microscopio Digital USB DinoLite AM4113T. a) Piedra natural de cantera; b) Piedra procedente de la base 2, Arco 1; c) Piedra del fuste 2, Arco 1. Se aprecia el nivel de disolución diferencial de los elementos texturales expuestos a la intemperie. **Figure 5 (a-c).** Biocalcarenite from Novelda, details of the stone texture seen under the DinoLite AM4113T USB Digital Microscope. a) Natural quarry stone; b) Stone from base 2, Arch 1; c) Stone from shaft 2, Arch 1. The level of differential dissolution of the textural elements exposed to weathering can be seen.

Conclusiones

En el presente estudio se han examinado los materiales pétreos utilizados en la panda este del claustro gótico procedentes de canteras históricas localizadas en el Levante español. Las exploraciones han permitido identificar la existencia de tres litotipos, y sus diferentes variedades, algunos de ellos originales de la construcción medieval y otros correspondientes a reposiciones posteriores realizadas en distintas etapas. Asimismo, el reconocimiento de esta diversidad de materiales pétreos no solo pone de manifiesto la habilidad en la selección y extracción de los materiales durante el período medieval, sino también el considerable esfuerzo logístico y económico que implicó su transporte y posterior instalación en el monumento. De igual modo, el trabajo pone de relieve la diversidad de estos materiales pétreos en cuanto a propiedades físico-mecánicas, petrológicas y químicas se refiere, y que constituyen información fundamental para el diagnóstico y la propuesta de tratamientos. Todo ello, orientado a minimizar los efectos del deterioro ambiental y asegurar la durabilidad de los materiales a largo plazo. Finalmente, estos aspectos reflejan la importancia otorgada a la calidad y adecuación de los materiales de la tracería enclavada en los arcos de la construcción arquitectónica.

Novelda stone is defined, from a petrological point of view, as a carbonate rock of the biocalcarenite type. It is quarried in the area of Vinalopó Medio, Alicante (eastern Spain). Known since the 13th century as a building material, it has been used since the end of the 19th century to the present day for the construction of buildings and monuments in Madrid, Valencia and Alicante. The main quarries where this type of stone was extracted in the past were located in the municipalities of Monóvar (Piedra Almorquí), Sax (Piedra Portazgo) and Elda-Novelda (Piedra Bateig). The characteristics of the materials extracted varied from one quarry to another. Currently, the quarrying activity is located in the quarries of Bateig, known commercially as Bateig Stone and with different varieties (Crema, Fantasía, Diamante, Llano and Azul) (Fort, et al 2002). The quarry fronts are of large dimensions and different shades ranging from beige to grey can be seen. Bateig stone, thanks to its ease of working, can be used for both masonry and ornamentation. As a stone used in restoration works to replace altered elements, we can cite the façade of the University of Alcalá (Puché Riart, et al, 1991) and recently, the Almudena Cathedral (1994) in Madrid. In new works, examples include the Linares Palace (1873), the Bank of Spain (1891), the Monument to Alfonso XII (1922), among others.

The Bateig Stone is a limestone with calcite of low magnesium content, and with minimal proportions of dolomite, quartz, feldspar and phyllosilicates detritus (Ordóñez, 1994; Iglesia, 1998). The phyllosilicates are mainly illites with different degrees of crystallinity and in smaller proportions smectites. The term biocalcarenite or allochemical calcareous is due to the presence of different varieties of fossils (foraminifera and remains of bryozoans, molluscs and echinoderms) in the structure of the Piedra Bateig. In general, it has an open porosity of over 15 %, which makes it a material sensitive to the effects of water and environmental pollution (Mas-Barberà, 2006).

Specifically, this type of stone has been used in the replacement of several capitals, arches and bases (Arches 1 and 5) on the east side of the cloister, a fact that highlights the level of deterioration of the original ones (this intervention was possibly carried out in the 50s and 60s of the 20th century, given the state of the stone today) (Figure 5). In general terms, Figure 6 illustrate the different materials present in the east wall of the Main Cloister of the Old Convent of Santo Domingo in Valencia.

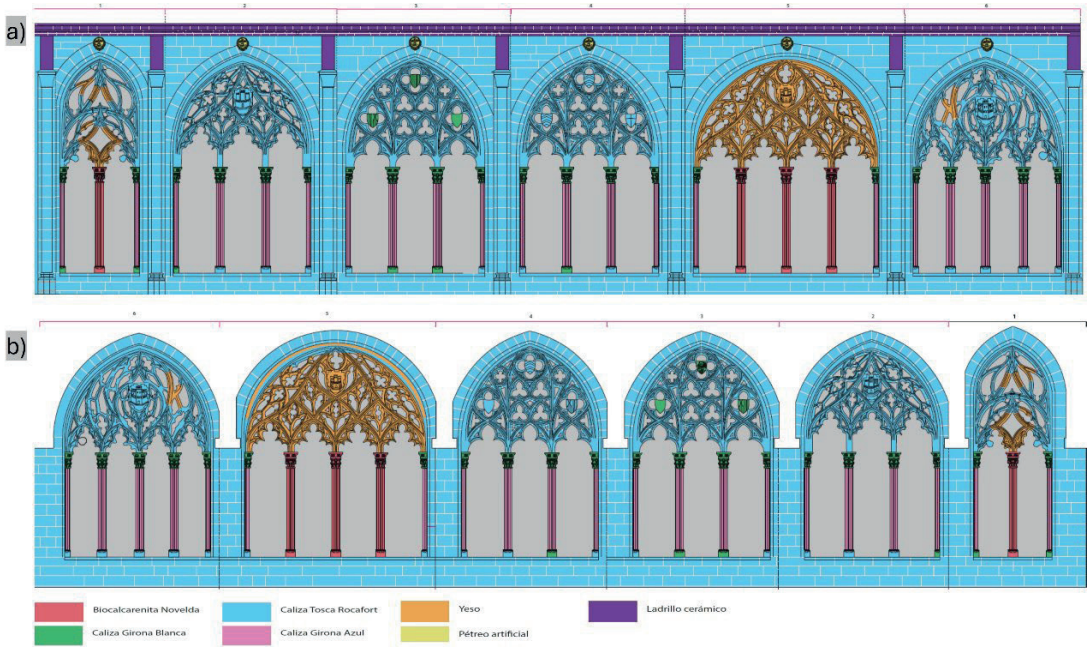


Figura 6 (a-b). Cartografía de materiales presentes en la panda este del Claustro Mayor del Antiguo Convento de Santo Domingo de Valencia. a) alzado vista exterior y, b) alzado vista interior. **Figure 6 (a-b).** Cartography of materials present in the east wall of the Main Cloister of the Old Convent of Santo Domingo in Valencia. a) elevation, exterior view and, b) elevation, interior view.

Conclusions

This study has examined the stone materials used in the east wall of the Gothic cloister from historical quarries located in the Spanish Levante region. The explorations have allowed us to identify the existence of three lithotypes and their different varieties, some of them original to the medieval construction and others corresponding to later replacements carried out at different stages. Likewise, the recognition of this diversity of stone materials not only reveals the skill in the selection and extraction of the materials during the medieval period, but also the considerable logistical and economic effort involved in their transport and subsequent installation in the monument. The work also highlights the diversity of these stone materials in terms of their physical-mechanical, petrological and chemical properties, which constitute fundamental information for diagnosis and treatment proposals. All of this is aimed at minimising the effects of environmental deterioration and ensuring the durability of the materials in the long term. Finally, these aspects reflect the importance given to the quality and suitability of the materials of the tracery embedded in the arches of the architectural construction.

Agradecimientos/ Acknowledgements

Los autores agradecen la confianza depositada por parte del Coronel Gobernador D. Juan Palau Tur y del Comandante D. José Sellés (Cuartel General Terrestre de Alta Disponibilidad de Valencia) y, especialmente a la Catédra Forum Unesco-UPV por su inestimable contribución en la protección del Patrimonio Valenciano. The authors would like to thank the Colonel Governor Juan Palau Tur and the Commander José Sellés (High Readiness Land Headquarters in Valencia) for their trust, and especially the Forum Unesco-UPV Cathedra for their invaluable contribution to the protection of Valencian Heritage.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- ESBERT, R.M.; MARCOS, R.M.; ORDAZ, J.; MONTOTO, M.; SUÂREZ DEL RIO, L.M.; RUIZ DE ARGANDOÑA, V.G.; CALLEJA, L.; ALONSO, F.J.; RODRIGUEZ REY, A. (1991). "Petrografía, propiedades físicas y durabilidad de algunas rocas utilizadas en el patrimonio monumental de Cataluña, España (2" parte)". Materiales de Construcción, Yol. 41, mlm. 222, p. 49-59.
- ESBERT, ROSA M.; JORGE ORDAZ; F. J. ALONSO; FRANCISCO DÍAZ P.; FÉLIX MATEOS. (2001). Caracterització petrofísica de la pedra de Girona: el seu ús en edificació. Revista La Punxa, nº 31, pp. 30-45.
- FORT, R; BERNABEU, A.; GARCÍA DEL CURA, M. A.; LÓPEZ DE AZCONA, M. C.; ORDÓÑEZ, S.; MINGARRO, F. (2002) La Piedra de Novelda: una roca muy utilizada en el patrimonio arquitectónico. Materiales de Construcción, Vol. 52, nº 266, pp: 19, CSIC, abril/mayo/junio.
- IGLESIA, A.; GARCÍA DEL CURA, M. A.; ORDÓÑEZ, S.; BERNABEU, A. (1998) Estudio de los filosilicatos de la Piedra Bateig (Neógeno de la Provincia de Alicante), Geogaceta, 23, pp: 79- 83.
- MAS I BARBERA, X. (2010). Conservación y restauración de materiales pétreos. Universidad Politécnica de Valencia, ISBN 10: 8483635836ISBN 13: 9788483635834.
- ORDÓÑEZ, S.; CARCÍA DEL CURA, M. A.; FORT, R.; LOUIS, M.; LÓPEZ DE AZCONA, M. C.; MINGARRO, M. (1994) Physical properties and petrographic characteristics of some Bateig stone varieties. En 7th Int. Cong. International Association of Engineering Geology, pp: 3595-3603, Rotterdam.
- PUCHE RIART, O., GARCÍA DE MIGUEL, J. M., SÁNCHEZ CASTILLO, L., MATA PERELLÓ, J. M., y GONZÁLEZ AGUADO, M. T. (1991). El uso de las piedras de corte en los monumentos y en la construcción. 1. Areniscas y calizas. Materiales De Construcción, 41(223), 41–52. https://doi.org/10.3989/mc.1991.v41.i223.739
- PUIG NEBOT, AGUSTÍN (2018). EL EJÉRCITO EN EL CONVENTO DE SANTO DOMINGO DE VALENCIA. 175 ANIVERSARIO, Ministerio de Defensa. Secretaría General Técnica. (Consulta 28-03-2022 en índice: https://publicaciones.defensa.gob.es/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FFile-1530604734.pdf).
- ZARAGOZÁ CATALÁN, A. (1995). "Antiguo Convento de Santo Domingo, Valencia". Valencia, arquitectura religiosa, Generalitat Valenciana, Conselleria de Cultura, Educació i CiènciaI, SBN 84-482-1071-0, págs. 114-129.

ASPECTOS FORMALES Y COMPOSITIVOS DE LA TRACERÍA GÓTICA DEL CLAUSTRO MAYOR EN EL ANTIGUO CONVENTO DE SANTO DOMINGO DE VALENCIA

FORMAL AND COMPOSITIONAL ASPECTS OF THE GOTHIC TRACERY OF THE MAIN CLOISTER IN THE FORMER CONVENT OF SANTO DOMINGO OF VALENCIA

E. Arias-Valera
Arquitecta Técnica. Graduada en Conservación y Restauración de Bienes Culturales. Universidad Politécnica de Valencia./ Building Engineer. Graduated in Conservation and Restoration of Cultural Heritage. E-mail:engracia05@gmail.com
S. Kröner
Doctor en Geología, especializado en Conservación y restauración del Patrimonio Cultural. PhD in Geology specialised in Conservation and restoration of Cultural Heritage. E-mail: stephan.kroner2013@gmail.com
L. Osete-Cortina
I*nvestigadora en el Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio. Universitat Politècnica de València. Profesora Asociada en el Dpto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, Facultad de Bellas Artes, UPV. Doctora en Química por la UV. Researcher in the Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio. Associate Professor at the Department of Conservation and Restoration of Cultural Assets, Faculty of Fine Arts, UPV. PhD in Chemistry. E-mail: losete@crbc.upv.es*
X. Mas-Barberà
Investigador en el Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio. Universitat Politècnica de València (UPV). Profesor Catedrático de Universidad, Conservador y restaurador de escultura y ornamentos. Doctor en Bellas Artes por la UPV. Researcher in the Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio. Senior Professor at the UPV, Conservator and restorer of sculpture and ornaments. PhD in Fine Arts. E-mail: jamasbar@upvnet.upv.es

Abstract

The Main Cloister of the former Convent of Santo Domingo is an outstanding historical monument in the group of Valencia's Immovable Cultural Heritage. The work itself has been the object of multiple interventions over the centuries and this work details the formal and compositional aspects of the east wing that are unnoticed and are fundamental for establishing, among other aspects, the criteria in the decision-making phases. The results presented are the result of the work carried out within the framework of the Preliminary Studies on the Main Cloister, Former Convent of Santo Domingo (Valencia) for its diagnosis and restoration proposal: i) Arches of the Gothic tracery, east side and, ii) Arches of the façade of the Chapter House, a request made by the Colonel Governor of the High Availability Land Headquarters to the University Institute of Heritage Restoration of the Universitat Politècnica de València. The study illustrates how the cloister has been maintained in accordance with the context of religious, military, social and cultural tutelage experienced at any given time.

Keywords
Main Cloister of the Former Convent of Santo Domingo in Valencia, east side, Gothic ogival tracery.

Introducción

El presente trabajo ilustra los aspectos más sobresalientes obtenidos tras el análisis llevado a cabo en los arcos de la tracería gótica, panda este, del Claustro Mayor en el Antiguo Convento de Santo Domingo, ubicado en Plaza de Tetuán, nº 22 de Valencia (Figura 1) el marco de los estudios preliminares llevados a cabo para el diagnóstico y propuesta de restauración de la panda este y fachada del aula capitular. El conjunto está catalogado, según Patrimonio Histórico, como Bien de Interés Cultural (RI-51-0000975) y, clasificado en el Inventario General del Patrimonio Cultural Valenciano (46.15.250-011). La custodia y gestión del Claustro Mayor del Antiguo Convento de Santo Domingo de Valencia, actual Cuartel General Terrestre de Alta Disponibilidad, recae en el Ejército de Tierra del Ministerio de Defensa que, durante más de 175 años, ha venido manteniendo conforme a las disposiciones vigentes de protección del patrimonio.



Figura 1 (a-c). Vista general de las fábricas objeto de estudio. a) Panda este del Claustro Mayor, vista exterior; b) Panda este del Claustro Mayor, vista interior o paso de Levante del claustro; c) Detalle del Arco 1, vista exterior. **Figure 1 (a-c).** General view of the factories under study. a) East wing of the Great Cloister, exterior view; b) East wing of the Great Cloister, interior view or East passage of the cloister; c) Detail of Arch 1, exterior view.

Aproximación histórica

El edificio, declarado Monumento Histórico-Artístico Nacional el 3 de junio de 1931, fue la antigua Capitanía de Valencia, nombre que aún conserva. Su origen se remonta al Convento de Predicadores, cuya primera piedra fue colocada el 11 de abril de 1239 por el propio rey Jaime I. Esta fundación fue impulsada por fray Miguel de Fabra, un fraile dominico, confesor del rey y discípulo de Santo Domingo de Guzmán. En sus inicios, el conjunto albergaba una pequeña iglesia, reemplazada en 1250 por otra de mayor sencillez, a la que siguió un tercer templo construido en 1382; sin embargo, este último fue demolido en el siglo XIX.

Aunque la mayoría de las edificaciones originales fueron derribadas, el Claustro Mayor y la Sala Capitular, ambos del siglo XIV, han llegado hasta nuestros días. Este conjunto, cargado de historia y simbolismo, se erige como uno de los monumentos más importantes, aunque también más desconocido, de la ciudad de Valencia (Puig Nebot, 2018).

Introduction

This paper illustrates the most outstanding aspects obtained after the analysis carried out on the arches of the Gothic tracery, east side, of the Main Cloister in the Old Convent of Santo Domingo, located in Plaza de Tetuán, nº 22 in Valencia (Figure 1) within the framework of the preliminary studies carried out for the diagnosis and proposal for the restoration of the east side and façade of the chapter house. The complex is listed, according to Historical Heritage, as an Asset of Cultural Interest (RI-51-0000975) and classified in the General Inventory of Valencian Cultural Heritage (46.15.250-011). The custody and management of the Main Cloister of the Former Convent of Santo Domingo in Valencia, currently the High Readiness Land Headquarters, is the responsibility of the Army of the Ministry of Defence, which, for more than 175 years, has been maintaining it in accordance with the provisions in force for the protection of heritage.

Historical approach

The edifice was designated a National Historic-Artistic Monument on 3 June 1931 and continues to bear the appellation of the Captaincy of Valencia, dating back to its origins as the Convent of Preachers, whose foundation stone was laid on 11 April 1239 by King James I himself. The foundation was promoted by Friar Miguel de Fabra, a Dominican friar, confessor to the king and disciple of Saint Dominic de Guzmán. The site was originally home to a modest ecclesiastical structure, which was superseded in 1250 by a more austere iteration. This was subsequently replaced in 1382 by a third church, which was unfortunately demolished in the 19th century.

Despite the demolition of most of the original structures, the Main Cloister and the Chapter House, both dating from the 14th century, have endured to the present day. This complex, imbued with history and symbolism, stands as one of the most significant yet least recognised monuments in the city of Valencia (Puig Nebot, 2018).

The Dominican convent buildings are of particular importance, with the Great Cloister and the magnificent Chapter House (Figure 2) being of particular note. Constructed during the first years of the 14th century (1300-1320), these Gothic structures are of great monumentality and contrast, given that their construction, extensions and renovations were undertaken as donations were received from the wealthiest families. The tracery, which was mounted and attached to the arches as an ornamental sculptural decorative element, was added from the 15th century onwards. Subsequent to this, during the late 17th century and early 18th century, the cloister above the primary cloister was constructed, featuring arches, pilasters, and brick cornices in the Classicist style. This work is attributed to the architect Francisco Padilla (Zaragozá Catalán, 1995).

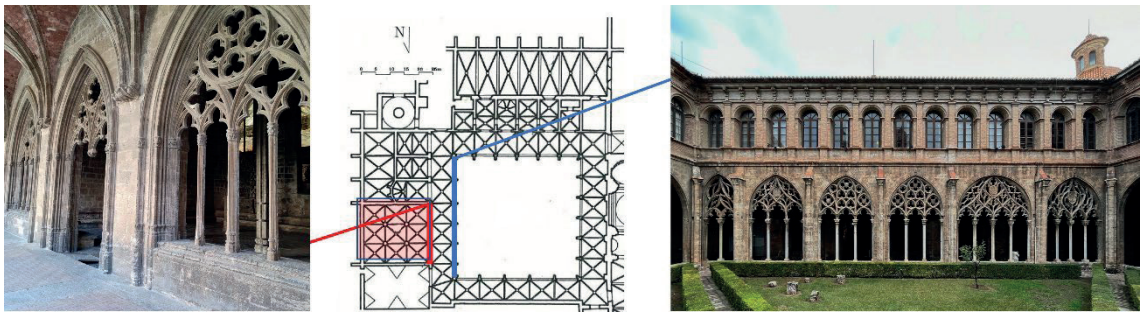


Figura 2. Zona claustral, localización en planta de la panda este y aula capitular. **Figure 2.** Cloister area, location in plan of the east wing and chapter house.

En el conjunto de construcciones que forman el convento de dominicos cobra especial relevancia el Claustro Mayor y la magnífica Aula Capitular (Figura 2). Construidos durante los primeros años del siglo XIV (1300-1320), se trata de dos fábricas arquitectónicas de estilo gótico de gran monumentalidad y contrastes dado que sus construcciones, ampliaciones y renovaciones se acometieron conforme se recibían los donativos de las familias más pudientes. Se observa que las tracerías fueron montadas y adosadas en los arcos a modo de complemento decorativo escultórico ornamental a partir del siglo XV. Posteriormente, a finales del siglo XVII-principios s. XVIII, se edificó el sobreclaustro sobre el claustro mayor con arcos, pilastras y cornisas de ladrillo de estilo clasicista; obra atribuida al arquitecto Francisco Padilla (Zaragozá Catalán, 1995).

En el siglo XIX, con motivo de la Guerra de la Independencia (1808-1812) y, posteriormente, con la exclaustración (desamortización de Mendizábal, 1835), el convento sufre destrucciones, adaptaciones (Figura 3 a-b), y reparaciones constantes que modificaron substancialmente el conjunto conventual. En principio, se destinó a parque de artillería y talleres de maestranza (Figura 3 c); posteriormente, se estableció Capitanía General (1839). Finalmente, ante los avatares y el peligro de pérdida irreversible de edificios del convento, la Real Academia de Bellas Artes de San Carlos solicitó protección dictándose una Real Orden de 23 de enero de 1844. A pesar de ello, en 1865 la primitiva iglesia, que servía de contrafuerte de la panda norte del claustro, fue demolida.

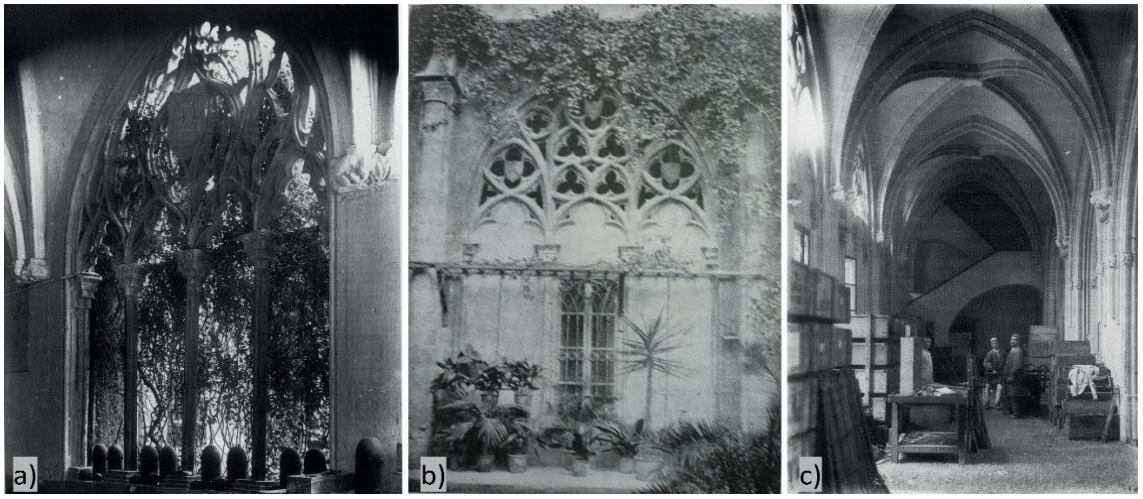


Figura 3 (a-c). Panda este del Claustro Mayor destinado a parque de artillería. a-c) Diferentes etapas de la historia del ala este o de levante, sin y con tabiquería (posterior a 1850), y repleta de armamento (Imágenes cortesía Archivo Capitanía). **Figure 3 (a-c).** East wing of the Main Cloister used as an artillery park. a-c) Different stages in the history of the east or east wing, without and with partitions (after 1850), and full of armaments (Images courtesy of the Capitanía Archive).

En el siglo XX, con la Guerra Civil Española (1936), el convento sufre los bombardeos y la destrucción que afectaron a varios edificios importantes, entre ellos la torre campanario, la capilla de San Vicente y partes del claustro. Asimismo, entre los años 1950-54 el General D. Gustavo Urrutia inicia una destacada actuación de rehabilitación integral del antiguo convento dominico acondicionando el estado del claustro, retirando los tabiques y reconstruyéndose las tracerías (Puig Nebot, 2018), entre otras acciones, tal y como se evidencia en la Figura 4.

De igual modo, y no menos importante, cabe reseñar junto a todos estos avatares históricos, las inundaciones sufridas a lo largo de los siglos XIII-XX en Valencia (documentadas más de una veintena, Gonzalo de Andrés, 2003) debido a las riadas del río Turia, y que afectaron drásticamente al convento; especialmente destacable es la acontecida en el año 1957 que superó los dos metros de altura sobre la cota cero del claustro, visible hoy en día en la portada de la Sala Capitular.

During the 19th century, the convent underwent significant alterations due to the War of Independence (1808-1812) and the exclaustration (disentailment of Mendizábal, 1835). These events led to the destruction and adaptation of the convent complex, as evidenced in Figures 3a-b. Initially, the convent was utilised as an artillery park and workshops (Figure 3 c); subsequently, the Captaincy General's Office was established (1839). Ultimately, in view of the vicissitudes and the danger of irreversible loss of the convent buildings, the Royal Academy of Fine Arts of San Carlos requested protection, and a Royal Order was issued on 23 January 1844. Despite this, in 1865, the original church, which had served as a buttress to the north side of the cloister, was demolished.

In the 20th century, during the Spanish Civil War (1936), the convent was bombed and destroyed, affecting several important buildings, including the bell tower, the chapel of San Vicente and parts of the cloister. Likewise, between 1950-54 General D. Gustavo Urrutia initiated an outstanding action of integral rehabilitation of the old Dominican convent by conditioning the state of the cloister, removing the partitions and rebuilding the tracery (Puig Nebot, 2018), among other actions, as evidenced in Figure 4.

Equally important, and no less important, are the floods suffered throughout the 13th-20th centuries in Valencia (more than twenty documented, Gonzalo de Andrés, 2003) due to the floods of the River Turia, which drastically affected the convent; particularly noteworthy is the one that occurred in 1957, which exceeded two metres in height above the ground level of the cloister, visible today on the front of the Chapter House.

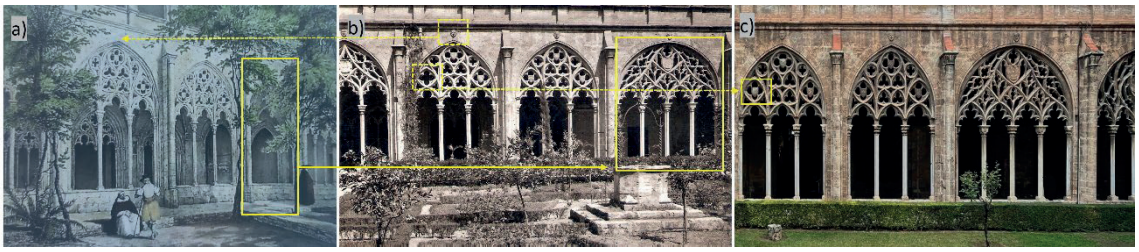


Figura 4 (a-c). Panda este del Claustro Mayor. a) Dibujo de Girault de Prangey en Le Moyen Age Monumental et Archéologique, hacia 1845, se aprecia el arco 5 sin tracería ni parteluces, tampoco aparecen los mascarones (Puig Nebot, 2018); b) Estado de las arcadas después de la restauración del General Urrutia sin los tabicados; el arco 3 carece del escudo nº1, aunque se repone posteriormente (Imágenes cortesía Archivo Capitanía); c) Estado actual, 2024. **Figure 4 (a-c).** East wing of the Main Cloister. a) Drawing by Girault de Prangey in *Le Moyen Age Monumental et Archéologique*, circa 1845, showing arch 5 without tracery or mullions, nor do the masks appear (Puig Nebot, 2018); b) State of the arcades after General Urrutia's restoration without the partitions; arch 3 lacks coat of arms no. 1, although it was later replaced (Images courtesy of Archivo Capitanía); c) Current state, 2024.

Formal and compositional analysis

The Main Cloister began to be built around the year 1300 on the initiative of Don Pedro Boil, Steward, Treasurer and Ambassador of King James II; it is in the Gothic Gothic Gothic style, with a square floor plan, with a length of approximately 34 metres on each side (approximately 37 Valencian rods). It is a perimeter gallery, with four sides or pandas, formed by wide pointed arcades of heterogeneous width, and a small central garden. The gallery gives access to different side chapels on its east and south sides. Likewise, the east, south and west wings have six arches, while the north wing has five arches of greater width (these differences are justified because they were built as the convent received alms). The vaults are of simple ribbed vaulting, with stone cross ribs, topped with keystones and brick partitioning, leaving the wider face exposed (Navarro Fajardo, 2004; Bodnar, 2015).

Análisis formal y compositivo

El Claustro Mayor comenzó a construirse alrededor del año 1300 por iniciativa de Don Pedro Boil, Mayordomo, Tesorero y Embajador del Rey Jaime II; Es de estilo gótico ojival, de planta cuadrada, con una longitud de 34 metros aproximadamente por cada lado (37 varas valencianas aproximadamente). Se trata de una galería perimetral, con cuatro lados o pandas, formada por amplias arcadas apuntadas y de amplitud heterogénea, y un pequeño jardín central. La galería da acceso a diferentes capillas laterales en sus pandas este y sur. Asimismo, la panda Este, Sur y Oeste coinciden con seis arcos, mientras que la panda Norte contiene cinco arcos de amplitud mayor (-estas desigualdades se justifican porque se iban construyendo conforme el convento recibía las limosnas). Las bóvedas son de crucería simple, con nervios de piedra, en cruz, rematados con claves y plementería tabicada con ladrillo dejando a la vista su cara más ancha (Navarro Fajardo, 2004; Bodnar, 2015). Concretamente, las arcadas del lado este, con distinta amplitud, poseen tracerías de estilo gótico flamígero con diseño desigual para cada arco (Figura 5). El arco 5 es el único de medio punto, el resto son arcos ojivales. Asimismo, en estas claraboyas caladas (de formas lobuladas y labradas en piedra caliza Tosca de Rocafort) se aprecian los escudos heráldicos de las familias donantes (Castellví Figura 6; Codinats y Esplugues, Figura 7), los escudos de armas de la Corona de Aragón y las dos Sicilias y, los blasones del Reino de Valencia (Figura 8).

Las tracerías descansan sobre capiteles, estos a su vez sobre fustes y bases, formando un conjunto a modo de parteluz. La procedencia de estos elementos arquitectónicos manufacturados son las canteras del entorno de la localidad de Girona (Cataluña). Se trata de piezas realizadas sobre piedra caliza nummulítica en el seno de talleres familiares siguiendo unos modelos estandarizados que, desde el período bajo medieval hasta bien entrado el s. XX, se han venido produciendo e instalando en multitud de palacios, conventos, iglesias, cartujas y monasterios en el amplio territorio por el que se difundieron (Cataluña, Valencia, Rosellón, Mallorca, Aragón, Sicilia, Nápoles, entre otros) (Español, 2009).

En Valencia, se han documentado envíos de elementos arquitectónicos con estos diseños y con esta particular caliza para varias construcciones, como el Palacio Real de Valencia (años 1342-1345, reinado de Pedro el Ceremonioso; años 1421-1423, reinado de Alfonso el Magnánimo) (Español, 2009), o el Monasterio de la Valldigna (1409); estos datos demuestran que las piezas de la panda este fueron traídas de esta localidad, por vía marítima, desde el puerto de San Feliu de Guíxols a Valencia. Se trata de una piedra de buena calidad que permitía el pulimentado con una apariencia final marmórea, especialmente la caliza Girona azul.

Los rasgos característicos de los parteluces son su reducido diámetro y una mayor esbeltez puesto que, a comienzos del siglo XV, se empezó a extraer un material pétreo de Girona más duro que permitió reducir progresivamente el grueso de las columnas y obtener mayor altura, con perfiles gallonados más elaborados; esto hace pensar que fueran transportados por aquella época, aprovechándose los envíos al Reino de Valencia, bien para el Palacio Real, Valldigna o Peñíscola. Asimismo, los diseños de los capiteles combinan dos niveles, uno inferior con hojas de lirio o de palmera muy esquematizados y, otro superior, que lo complementa con un cimacio o mesa decorada de rosetas; generalmente, en la construcción se instalaban alternativamente (Figura 9). En cuanto a las bases, el diseño refiere a una moldura convexa apoyado sobre un plinto cuadrado y con esferas en sus ángulos.

En la actualidad, la panda este del claustro no sigue una alternancia en los capiteles a lo largo de las arcadas; se observa una instalación de piezas siguiendo un patrón heterogéneo, con piezas de distinto nivel de deterioro con otras repuestas de nueva creación, pero manteniendo los diseños medievales. Se percibe un aprovechamiento de varios capiteles que presentaban un mejor estado con otras piezas labradas recientemente durante las sucesivas tentativas de restauración.

Specifically, the arcades on the east side, with different widths, have tracery in the Flamboyant Gothic style with unequal designs for each arch (Figure 5). Arch 5 is the only semicircular arch, the rest are pointed arches. Also, in these openwork skylights (lobed and carved in Tosca limestone from Rocafort) we can see the heraldic coats of arms of the donor families (Castellví, Figure 6; Codinats and Esplugues, Figure 7), the coats of arms of the Crown of Aragon and the two Sicilies, and the coats of arms of the Kingdom of Valencia (Figure 8). The tracery rests on capitals, which in turn rest on shafts and bases, forming a mullion-like ensemble. The origin of these manufactured architectural elements is the quarries around the town of Girona (Catalonia). These are pieces made on nummulitic limestone in family workshops following standardised models which, from the late medieval period until well into the 20th century, were produced and installed in a multitude of palaces, convents, churches, Carthusian monasteries and monasteries in the vast territory over which they spread (Catalonia, Valencia, Roussillon, Majorca, Aragon, Sicily, Naples, among others) (Español, 2009). In Valencia, shipments of architectural elements with these designs and with this particular limestone have been documented for several constructions, such as the Royal Palace of Valencia (1342-1345, reign of Peter the Ceremonious; 1421-1423, reign of Alfonso the Magnanimous) (Español, 2009), or the Monastery of La Valldigna (1409); these data show that the pieces from the eastern side were brought from this locality, by sea, from the port of San Feliu de Guíxols to Valencia. It is a good-quality stone that could be polished to a marble-like appearance, especially the blue Girona limestone.

The characteristic features of the mullions are their reduced diameter and greater slenderness, since at the beginning of the 15th century, a harder stone material from Girona began to be quarried, which made it possible to progressively reduce the thickness of the columns and obtain greater height, with more elaborate rounded profiles; this suggests that they were transported at that time, taking advantage of the shipments to the Kingdom of Valencia, either for the Royal Palace, Valldigna or Peñíscola. Likewise, the designs of the capitals combine two levels, a lower one with highly schematic lily or palm leaves and an upper one, which complements it with a cymatium or table decorated with rosettes; generally, they were installed alternately in the construction (Figure 9). As for the bases, the design refers to a convex moulding supported on a square plinth with spheres at its corners.

At present, the east side of the cloister does not follow an alternation of capitals along the arcades; a heterogeneous pattern of pieces is observed, with pieces of different levels of deterioration with other newly created replacements but maintaining the medieval designs. Several capitals that were in better condition were used with other pieces that were recently carved during successive attempts at restoration. On the other hand, other details detected on the east side, with a decorative intention, are the masks located at the top of the arcades, probably installed between 1945 and 1950 (Figure 10). Finally, the masonry wall is made up of ashlars also of Tosca de Rocafort limestone of different sizes, of approximately 23, 46 and 138 cm (from one to three Valencian palms), although there are others of even five palms in the area of the plinth. The joints vary in thickness, between one and two centimetres approximately, with the ashlars joining each other and the rows of ashlars locking together.

Conclusions

This study explores the formal and compositional aspects of the east wall of the main cloister of the Old Convent of Santo Domingo in Valencia, recognised for its flamboyant openwork tracery and the presence of heraldic coats of arms linked to the donor families which, as a whole, enrich this part of the cloister. The research highlights the original elements that make up the ornamental structure and evidences the artistic value in the continuous social and cultural adaptation of its time. The study reveals how this east side of the cloister embodies a complex interplay of form, architectural structure, composition and decoration in keeping with the framework of religious and cultural patronage that characterised the Gothic period.

Por otro lado, otros detalles detectados en la panda este, con una intención decorativa, han sido los mascarones ubicados en la parte alta de las arcadas, instalados probablemente entre 1945 y 1950 (Figura 10).

Finalmente, el muro de fábrica está formado por sillares también de piedra caliza tosca de Rocafort de distinta dimensión, de 23, 46 y 138 cm aprox. (de uno a tres palmos valencianos), aunque hay otros incluso de cinco palmos en la zona del zócalo. Las juntas tienen un espesor variable, entre uno y dos centímetros aprox., uniéndose los sillares entre sí y, trabando las hiladas a rompejunta.

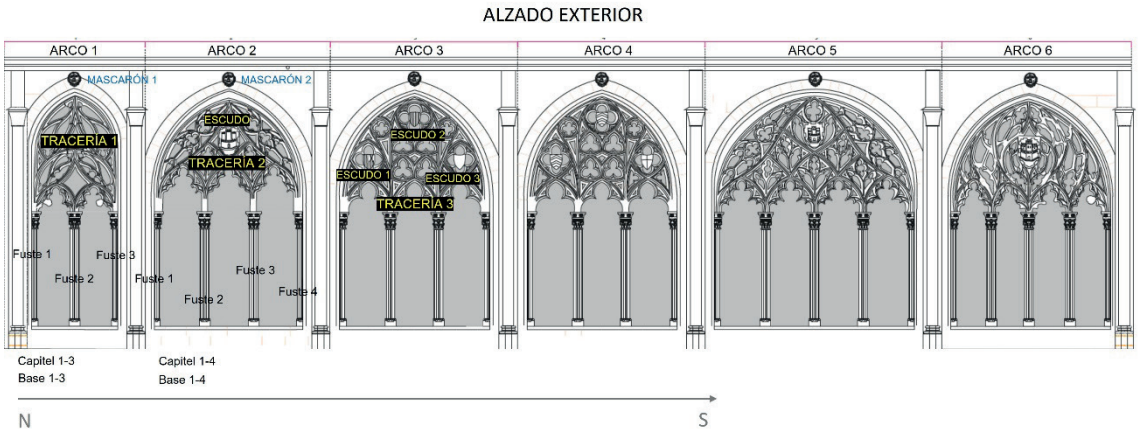


Figura 5. Alzado exterior de la panda este del claustro y distribución de elementos para su codificación (evidentemente, las reseñas a los elementos se repiten conforme al número de arcos). **Figure 5.** Exterior elevation of the east side of the cloister and distribution of elements for coding (of course, the descriptions of the elements are repeated according to the number of arches).



Figura 6 (a-f). Escudo de los Castellví. a-b) Arco 2, anverso-reverso; c-d) Arco 5, anverso-reverso; e-f) Arco 6, anverso-reverso. (Ilustración blasón cortesía De Cadenas y Vicent, 1994). **Figure 6 (a-f).** Coat of arms of the Castellví family. a-b) Arch 2, recto-reverse; c-d) Arch 5, recto-reverse; e-f) Arch 6, recto-reverse. (Illustration of coat of arms courtesy of De Cadenas and Vicent, 1994).



Figura 7 (a-f). Escudo de los Codinats y Esplugues. a-b) Arco 4, escudo 1, anverso-reverso; c-d) Arco 4, escudo 2 -centro-, anverso-reverso; e-f) Arco 4, escudo 3, anverso-reverso. (Ilustración blasón cortesía de Cadenas y Vicent, 1994). **Figure 7 (a-f).** Coat of arms of the Codinats and Esplugues families. a-b) Arch 4, coat of arms 1, obverse-reverse; c-d) Arch 4, coat of arms 2 -centre-, obverse-reverse; e-f) Arch 4, coat of arms 3, obverse-reverse. (Illustration of coat of arms courtesy of Cadenas and Vicent, 1994).



Figura 8 (a-f). Escudos de armas. a-b) Arco 3, escudo 1, anverso-reverso; c-d) Arco 3, escudo 2 -centro-, anverso-reverso; e-f) Arco 3, escudo 3, anverso-reverso. Asimismo, a, f) Blasón de armas de la Corona de Aragón y dos Sicilias; c, e) Blasón con las barras de Aragón; b-d) Blasón del Reino de Valencia. **Figure 8 (a-f).** Coats of arms. a-b) Arch 3, shield 1, obverse-reverse; c-d) Arch 3, shield 2 -centre-, obverse-reverse; e-f) Arch 3, shield 3, obverse-reverse. Also, a, f) Coat of arms of the Crown of Aragon and Two Sicilies; c, e) Coat of arms with the bars of Aragon; b-d) Coat of arms of the Kingdom of Valencia.



Figura 9 (a-e). Vista general y de detalle de los elementos arquitectónicos de la panda este. a) Arcada 4, cimacio, capitel, fuste y basa, panda este; b) Arcada 6, panda este; c) Capitel de hoja de palmera y cimacio decorado con rosetas, arco 1, panda este; d) Capitel de hoja de lirio, arco 5, panda este; e) Alternancia de capiteles de hoja de lirio y hoja de palmera, galería claustral del convento franciscano de Mallorca (s. XIV) (Fotografía F. Español, 2009). **Figure 9 (a-e).** General and detail view of the architectural elements of the east side. a) Arcade 4, crest, capital, shaft and base, east wing; b) Arcade 6, east wing; c) Palm-leaf capital and crest decorated with rosettes, arch 1, east wing; d) Lily-leaf capital, arch 5, east wing; e) Alternation of lily-leaf and palm-leaf capitals, cloister gallery of the Franciscan convent of Mallorca (14th century) (Photograph by F. Español, 2009).



Figura 10 (a-b). Panda este del Claustro Mayor. a) Dibujo de Girault de Prangey en Le Moyen Age Monumental et Archéologique, hacia 1845, no aparecen los mascarones (Puig Nebot, 2018); b) Mascarones en el estado actual, 2024; el único mascaron que no lleva alcayata en la zona bucal es el correspondiente al Arco 5 que, casualmente, tampoco tenía tracería conforme al dibujo de Girault. Esto hace pensar que fueron instalados con la intención decorativa de sujetar algún tipo de sistema de iluminación con anterioridad a 1950; la tracería del Arco 5 es recuperada posteriormente por el coronel Urrutia y, por ende, no aparece el clavo porque no había nada que iluminar al faltar la tracería. **Figure 10 (a-b).** East wing of the Great Cloister. a) Drawing by Girault de Prangey in *Le Moyen Age Monumental et Archéologique*, around 1845, the masks do not appear (Puig Nebot, 2018); b) Masks in their current state, 2024; the only mask that does not have a clamp in the mouth is the one corresponding to Arch 5 which, coincidentally, also did not have tracery according to Girault's drawing. This suggests that they were installed with the decorative intention of attaching some kind of lighting system prior to 1950; the tracery of Arch 5 was later recovered by Colonel Urrutia and, therefore, the nail does not appear because there was nothing to illuminate as the tracery was missing.

Conclusiones

Este estudio explora los aspectos formales y compositivos de la panda este del Claustro Mayor del Antiguo Convento de Santo Domingo de Valencia reconocida por su tracería calada flamígera y la presencia de escudos heráldicos vinculados a las familias donantes que, en su conjunto, enriquecen esta parte del claustro. La investigación destaca los elementos originales que integran la estructura ornamental y evidencia el valor artístico en la continua adaptación social y cultural de su momento. El estudio revela cómo este lado este del claustro encarna una interacción compleja de la forma, de la estructura arquitectónica, de la composición y de la decoración en consonancia con el marco del mecenazgo religioso y cultural que caracterizó el periodo gótico.

Agradecimientos/ Acknowledgements

Los autores agradecen la confianza depositada por parte del Coronel Gobernador D. Juan Palau Tur y del Comandante D. José Sellés (Cuartel General Terrestre de Alta Disponibilidad de Valencia) y, especialmente a la Catédra Forum Unesco-UPV por su inestimable contribución en la protección del Patrimonio Valenciano. The authors would like to thank the Colonel Governor Juan Palau Tur and the Commander José Sellés (High Readiness Land Headquarters in Valencia) for their trust, and especially the Forum Unesco-UPV Cathedra for their invaluable contribution to the protection of Valencian Heritage.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- DE CADENAS Y VICENT, V. (1994). Fundamentos de Heráldica (ciencia del blasón). Editorial Hidalguía, 2º edición, Instituto Salazar y Castro, Madrid, ISBN 84-87204-64-3.
- ESPAÑOL, F. (2009). Las manufacturas arquitectónicas en piedra de Girona durante la Baja Edad Media y su comercialización. Anuario de Estudios Medievales (AEM) 39/2, julio-diciembre de 2009, pp. 963-1001, ISSN 0066-5061, Universitat de Barcelona.
- GONZALO DE ANDRÉS, C. (2003). Las riadas del Turia en Valencia 2003. En https://www.tiempo.com/ram/1178/las-riadas-del-turia-en-valencia/
- NAVARRO FAJARDO, J. C. (2004). Bóvedas valencianas de crucería de los siglos XIV al XVI. Traza y montea. Tesis Doctoral Universitat de València. I.S.B.N.:84-370-0988-X
- BODNAR, N (2016). Estudio histórico – constructivo del Claustro Mayor del Convento de Santo Domingo de Valencia. Trabajo Final de Grado, ETS de Ingeniería de Edificación, Universitat Politècnica de València.
- PUIG NEBOT, AGUSTÍN (2018). EL EJÉRCITO EN EL CONVENTO DE SANTO DOMINGO DE VALENCIA. 175 ANIVERSARIO, Ministerio de Defensa. Secretaría General Técnica. (Consulta 28-03-2022 en índice: https://publicaciones.defensa.gob.es/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FFile-1530604734.pdf).
- ZARAGOZÁ CATALÁN, A. (1995). "Antiguo Convento de Santo Domingo, Valencia". Valencia, arquitectura religiosa, Generalitat Valenciana, Conselleria de Cultura, Educació i CiènciaI, SBN 84-482-1071-0, págs. 114-129.

OBRAS PROYECTADAS EN LA IGLESIA DE SAN JUAN APÓSTOL Y EVANGELISTA DE MASSAMAGRELL EN EL S. XX.
PROJECTED WORKS IN THE CHURCH OF SAINT JOHN THE APOSTLE AND EVANGELIST OF MASSAMAGRELL IN THE 20TH CENTURY

Valentina Ciaffoni
PhD student in Restoration of Architecture at Sapienza University of Rome,E-mail: valentina.ciaffoni@uniroma1.it
Jorge García Valldecabres
Investigador del Centro de Investigación Arquitectura, Patrimonio y Gestión del Desarrollo Sostenible PEGASO; Universitat Politècnica de València, España. Profesor Titular de Universidad. Researcher at the PEGASO Research Centre for Architecture, Heritage, and Sustainable Development Management; Universitat Politècnica de València, Spain. Professor Associate Professor. E-mail: jgvallde@ega.upv.es
Luis Cortés Meseguer
Investigador en el Dpto. Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València, Spain. Professor Associate Professor. E-mail:
Researcher in the Dept.Architectural Constructions; University of Alicant Associate Professor, E- mail: antonio.galiano@ua.es
María Concepción López González
Investigador del Centro de Investigación Arquitectura, Patrimonio y Gestión del Desarrollo Sostenible PEGASO; Universitat Politècnica de València, España. Profesor Titular de Universidad. Researcher at the PEGASO Research Centre for Architecture, Heritage, and Sustainable Development Management; Universitat Politècnica de València, Spain. Professor Associate Professor. E-mail: jgvallde@ega.upv.es

Abstract

The theoretical framework of heritage conservation provides a guide to understanding currentpractices and doctrines in this field, which is relevant for comprehending interventions carried out inemblematic places like the Church of San Juan Apóstol and Evangelista in Massamagrell. The first restoration efforts of the church were carried out in the second half of the 19th century.

This contribution aims to explore the restoration interventions carried out in the 20th centuryand the historical framework that emerged through the research conducted concurrently. The evaluation revealed numerous cavities and deterioration in the façades, which justified the intervention in the plaster and the exposed stone walls. These actions and projects have allowed the conservation and comprehensive protection of the historical heritage, following the criteria and procedures established by the Territorial Services of Culture of the Generalitat.

The actions carried out are in line with the theory and practice of heritage recovery, as well as the sensitivity of the regional authorities in declaring numerous buildings as Assets of Local Relevance.

Additionally, the research highlights the importance of municipal inventories as instruments for preserving local cultural values.

Keywords
Heritage, conservation, intervention, history

Introducción y antecedentes

El marco teórico de la conservación del patrimonio histórico proporciona una guía para entender las prácticas y doctrinas actuales en este campo, lo cual es relevante para comprender las intervenciones realizadas en lugares emblemáticos como la iglesia de San Juan Apóstol y Evangelista de Massamagrell (Imag.1).

Los antecedentes de las acciones llevadas a cabo en la iglesia de San Juan Apóstol y Evangelista se sitúan en el contexto del desarrollo de la legislación y la práctica relacionadas con laprotección y conservación del patrimonio cultural arquitectónico.

A lo largo de la segunda mitad del siglo XIX, todo el siglo XX y especialmente después de la Segunda Guerra Mundial, se establecieron y desarrollaron criterios para la valoración, protección, conservación y protección del patrimonio cultural. Se hace referencia al marco legal internacional del Estado español, el autonómico de la Comunidad Valenciana y el municipal de Massamagrell, queestablecen medidas específicas y coherentes para la defensa del patrimonio cultural y para prevenir abusos y prácticas perjudiciales que podrían causar pérdidas irreparables.

El marco historiográfico

La catedral de León fue el primer monumento protegido en España por el Real Decreto Ley del 28 de agosto de 1844, lo que supuso el inicio de la práctica de restauración en el estado español.Fue en 1865 cuando se reguló y delimitó jurídicamente por primera vez el patrimonio de la Corona de España con la ley del 12 de mayo. Esta ley distinguía con claridad los bienes que pertenecían a los reyes y al Estado. A lo largo del siglo XX, se establecieron diferentes medidas para proteger las obras de arte y el valor histórico, como el Real Decreto de 1 de junio de 1900, que decidió la formación de un Catálogo monumental y artístico de la Nación.

Al inicio del siglo XX, se creó la Dirección General de Bellas Artes, encargada de todo lo relacionado con el Patrimonio. Bajo su impulso se redactaron leyes sobre defensa, conservación, promoción y enriquecimiento del patrimonio histórico, artístico y cultural, reflejando un avance en latutela de estos bienes. En el primer cuarto del siglo XX, Vicente Lampérez Romea impulsó la restauración siguiendo las teorías violletianas, buscando devolver la vida al monumento. Sus postulados se aplicaron en las catedrales de Burgos y Cuenca, sentando las bases de la restauración románica y la racionalidad estructural constructiva.

El estado de la iglesia y su entorno urbano antes de la Guerra Civil (1936-1939) mostraba una plaza central, la plaza de la Constitución, que albergaba la iglesia, el ayuntamiento y el conventode las Hermanas Terciarias Capuchinas (Imag. 1), así como el mercado ambulante. Otros espacios, como la plaza del Campanario y la plaza de Jesús, también formaban parte del entorno. La presencia del antiguo cementerio y otros edificios históricos, como la oficina de correos, contribuían a la riqueza histórica del lugar. La instalación del reloj en 1878 y la actividad del mercado se destacan en fotografías de la época (Imag. 2).



Imagen 1. Fotografía de la iglesia, con el remate del campanario (Ca. 1920)
Image 1. Photograph of the church, with the bell tower's completion. (Ca. 1920)

Introduction and background

The city, defined by its urban structure and the buildings that comprise it, is fundamental in people's lives, reflecting their history and bearing witness to their existence. The European Urban Charter of 1992 highlights the importance of balancing modern development with the preservation of historical heritage, integrating the new without destroying the old, and promoting sustainable development.

The theoretical framework of heritage conservation provides a guide to understanding current practices and doctrines in this field, which is relevant for comprehending interventions carried out in emblematic places such as the Church of San Juan Apóstol and Evangelista of Massamagrell. The background of the actions carried out in the Church of San Juan Apóstol and Evangelista is situated within the context of the development of legislation and practices related to the protection and conservation of architectural cultural heritage.

Throughout the second half of the 19th century, the entire 20th century, and especially after the Second World War, criteria were established and developed for the assessment, protection, conservation, and safeguarding of cultural heritage. Reference is made to the international legal framework of the Spanish State, the regional framework of the Valencian Community, and the municipal framework of Massamagrell, which establish specific and coherent measures for the defense of cultural heritage and to prevent abuses and harmful practices that could cause irreparable losses.

The historiographical framework

The Cathedral of León was the first monument protected in Spain by the Royal Decree Law of August 28, 1844, which marked the beginning of the restoration practice in the Spanish state. It was in 1865 when the heritage of the Crown of Spain was first regulated and legally delimited with the law of May 12. This law clearly distinguished the assets belonging to the kings and the State. Throughout the 20th century, different measures were established to protect works of art and historical value, such as the Royal Decree of June 1, 1900, which decided on the formation ofa monumental and artistic Catalog of the Nation.

At the beginning of the 20th century, the Directorate General of Fine Arts was created, responsible for everything related to Heritage. Under its impetus, laws were drafted on the defense, conservation, promotion, and enrichment of historical, artistic, and cultural heritage, reflecting an advancement in the guardianship of these assets. In the first quarter of the 20th century, Vicente Lampérez Romea promoted restoration following Viollet-le-Duc's theories, seeking to bring life back to the monument. His postulates were applied in the cathedrals of Burgos and Cuenca, laying the foundations for Romanesque restoration and structural constructive rationality.

The state of the church and its urban environment before the Civil War (1936-1939) showeda central square, the Plaza de la Constitución, which housed the church, the town hall, and the convent of the Capuchin Tertiary Sisters (Imag. 1), as well as the traveling market. Other spaces, such as the Campanario square and the Plaza de Jesús, were also part of the environment. The presence of the old cemetery and other historical buildings, such as the post office, contributed to thehistorical wealth of the place. The installation of the clock in 1878 and the market activity are highlighted in photographs of the time (Imag. 2).



Imagen 2. Mercado de los martes a principios del siglo XX
Image 2 Tuesday market at the beginning of the 20th century



Imagen 3. Fotografía de 1937 en la que se aprecia la fachada del convento de las Hermanas Terciarias Capuchinas ocupado como ayuntamiento
Image 3. Photograph from 1937 showing the facade of the convent of the Capuchin Tertiary Sisters being used as town hall

El periodo de la Guerra Civil 1936-1939

Durante el periodo de la Guerra Civil española, que abarcó desde 1936 hasta 1939, se produjo la destrucción de una gran parte del patrimonio religioso en la zona republicana. En Massamagrell, poco después del inicio de la guerra, se decretó la pena de muerte para quienes poseyeran imágenes religiosas y se destruyeron todo tipo de imágenes en lugares de culto públicos y privados. La iglesia de Massamagrell sufrió la pérdida de su patrimonio mueble y documental, incluyendo retablos, órganos, esculturas sagradas, ornamentos y archivos eclesiásticos. Durante la guerra, la iglesia se utilizó como mercado, almacén y taller militar.

En una fotografía de 1937 (Imag. 3), se muestra el convento de las Hermanas Terciarias Capuchinas, utilizado como ayuntamiento y sede del comité ejecutivo local. Después de la guerra, enuna imagen de los años 40, se ve el antiguo ayuntamiento y una procesión religiosa en la plaza (Imag. 4).

Trabajos urgentes y reapertura al culto después de la Guerra Civil

La Junta Parroquial para la restauración del templo se formó en Massamagrell el 7 de agostode 1939, según consta en un documento del Archivo parroquial firmado por el cura párroco D. José Gascó Meliá. Vicente Traver Tomás fue designado arquitecto diocesano de Valencia en 1939 y formó parte de la Junta Diocesana encargada de restaurar los templos de Valencia, incluida la iglesiaparroquial de Massamagrell.

Traver estableció medidas urgentes para consolidar y rehabilitar los templos diocesanos parasu reapertura al culto. La reconstrucción interior de la iglesia de Massamagrell contó con la colaboración de los vecinos y feligreses, quienes ofrecieron servicios voluntarios y donativos para devolver al templo su dignidad y ornamento. Los trabajos incluyeron limpieza, restauración parcial del pavimento, enlucido de paredes, reparación de daños urgentes, pintura, reposición de instalaciones y mantenimiento.

Proyectos en torno a la iglesia en la segunda mitad del siglo XX

En la segunda mitad del siglo XX, se llevaron a cabo varios proyectos alrededor de la iglesia. Una fotografía de mediados de siglo muestra el antiguo campo de fútbol que ocupaba los terrenos al sureste de la iglesia (Imag. 5), destacando la cúpula y otros elementos arquitectónicos. Serealizaron intervenciones en los años 50 para retejar la cúpula y los faldones laterales de la nave.

En 1954, se erigió un monumento en la plaza de la Constitución en honor al obispo D. Luis Amigó, obra del escultor José Esteve Edo, representando un hito del humanismo renacentista (Imag.6). A principios de los años 60, se construyó el Teatro-Cine del Patronato Parroquial para albergar actividades culturales y pastorales. Este proyecto se replicaba en varias parroquias de Valencia. A finales de los años 60, se erigieron los edificios del colegio de enseñanza primaria y media, configurando la plaza de Jesús. Este proyecto fue promovido por las Hermanas Terciarias Capuchinas y se remonta a la fundación del asilo de la Inmaculada Concepción y de San Franciscode Asís en 1885.



Imagen 4. Fotografía de los años 40 del siglo XX, con el viejo ayuntamiento del siglo XIX y el lado sur de la plaza con la procesión del Sagrado Corazón

Image 4. Photograph from the 1940s, featuring the old 19th-century town hall and the south side of the square with the Sacred Heart procession

The period of the Spanish Civil War 1936-1939

During the period of the Spanish Civil War, which spanned from 1936 to 1939, a large part of the religious heritage in the Republican zone was destroyed. In Massamagrell, shortly after the war began, the death penalty was decreed for those who possessed religious images, and all kinds of images in public and private places of worship were destroyed. The church of Massamagrell suffered the loss of its movable and documentary heritage, including altarpieces, organs, sacred sculptures, ornaments, and ecclesiastical archives. During the war, the church was used as a market, warehouse, and military workshop.

In a photograph from 1937 (Imag. 3), the convent of the Capuchin Tertiary Sisters is shown, used as the town hall and headquarters of the local executive committee. After the war, in an image from the 1940s, the old town hall and a religious procession in the square can be seen (Imag. 4).

Urgent works and reopening for worship after the Civil War

The Parish Board for the restoration of the temple was formed in Massamagrell on August7, 1939, as recorded in a document from the parish archive signed by the parish priest D. José Gascó Meliá. Vicente Traver Tomás was appointed diocesan architect of Valencia in 1939 and was part of the Diocesan Board responsible for restoring the temples of Valencia, including the parish church of Massamagrell.

Traver established urgent measures to consolidate and rehabilitate the diocesan temples for their reopening for worship. The interior reconstruction of the church of Massamagrell had the collaboration of neighbors and parishioners, who offered voluntary services and donations to restore the dignity and ornamentation of the temple. The works included cleaning, partial restoration of the pavement, plastering of walls, repair of urgent damages, painting, replacement of facilities, and maintenance.

Projects around the church in the second half of the 20th century

In the second half of the 20th century, several projects were carried out around the church.A photograph from the mid-20th century shows the old soccer field (Imag. 5) that occupied the land southeast of the church, highlighting the dome and other architectural elements. Interventions were carried out in the 1950s to re-roof the dome and the lateral slopes of the nave. In 1954, a monument was erected in Constitution Square in honor of Bishop D. Luis Amigó, a work by sculptor José Esteve Edo, representing a milestone of Renaissance humanism (Imag. 6).In the early 1960s, the Theater-Cinema of the Parish Patronage was built to host cultural andpastoral activities. This project was replicated in several parishes in Valencia. In the late 1960s, the buildings of the primary and secondary school were erected, shaping Jesus Square. This project was promoted by the Capuchin Tertiary Sisters and dates to the founding of the Immaculate Conception and San Francisco de Asís asylum in 1885.



Imagen 5. Fotografía del antiguo campo de fútbol
Image 5. Photograph of the old soccer field



Imagen 6. Fotografía de la plaza año 2022 con la escultura Obispo D. Luis Amigó, 1954, realizada por Esteve Edo
Image 6. Photograph of the square in 2022 with the sculpture of Bishop D. Luis Amigó, 1954, created by Esteve Edo

Relación de actuaciones y proyectos en torno al templo y actuaciones que configuran el espacioy el paisaje urbano de las plazas

Desde la década de los ochenta se han llevado a cabo diversas acciones y proyectos en tornoal templo y las plazas de la Constitución, el Campanario y de Jesús. Estas iniciativas fueron impulsadas por la Oficina Técnica Municipal, incluso antes de que el área fuera declarada Bien de Relevancia Local.

El objetivo ha sido proteger este entorno, considerado un monumento protegido en su totalidad según el inventario del Plan General de Ordenación Urbana de 1982. Posteriormente, en 1989, el ayuntamiento intensificó la protección sobre laiglesia, que ya estaba catalogada como monumento protegido en el inventario del Plan General de Ordenación Urbana de 1982.

El párroco, D. Juan Celda, quien tenía experiencia en gestión de obras, promovió varias acciones en el interior de la iglesia, incluyendo series pictóricas realizadas por él mismo y la unificación estilística de las capillas laterales. Además, impulsó el proyecto de restauración de las fachadas y la finalización del campanario, llevado a cabo por los arquitectos José Luis Gisbert, Juan Otegui y Francisco Noguera en 1990 (Image 7). Esta restauración parcial del campanario fue necesaria despuésde que el ayuntamiento interviniera para retejar una sección de la cúpula. El proyecto incluyó la restauración y consolidación de las fachadas exteriores de la iglesia,el remate del campanario y la reposición de tejas en la cúpula. También se realizaron diversas intervenciones en las cubiertas para evitar filtraciones de agua.

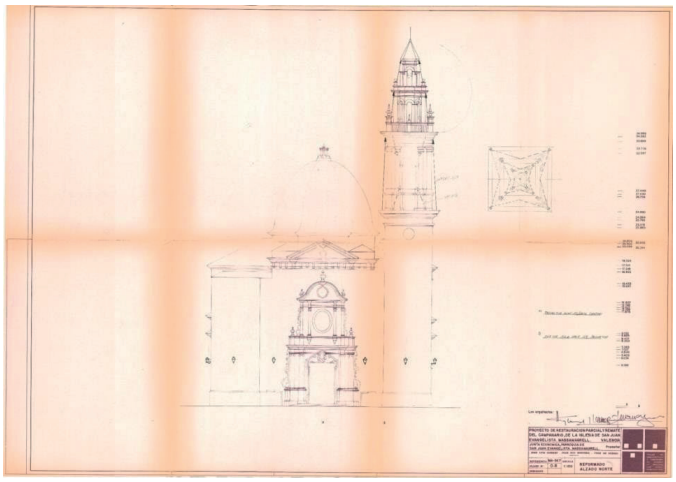


Imagen 7. Plano proyecto de fachada de Gisbert, Otegui y Noguera (1990)
Image 7. Plan of the facade project by Gisbert, Otegui, and Noguera (1990)

La práctica común durante esta época era documentar las intervenciones municipales mediante una Memoria Valorada, junto con planos generales en algunos casos, como requisito mínimo para obtener ayudas de rehabilitación y mantenimiento de edificios, según la normativa de la Diputación Provincial. Sin embargo, este proyecto no se limitó a los requisitos mínimos, sino que se trató de un proyecto completo que incluía todos los documentos necesarios. Por primera vez, se dibujó gráficamente la totalidad del exterior de la iglesia y sus dependencias, utilizando un equipo topográfico. La memoria justificativa describía el templo como una iglesia de cruz latina, de tres naves, con cabecera poligonal y cúpula con un pequeño tambor sobre el crucero, adscribiéndola al estilo barroco valenciano tardío.

La memoria del proyecto constaba de tres partes: descripción del templo y estado deconservación, obras de restauración realizadas y propuesta para el remate del campanario. Se especificaban los oficios y materiales necesarios, así como un Pliego General de Condiciones y un cuadro de precios descompuestos junto con las mediciones. En 2019, tras el derrumbe del sector sur de la cúpula, se elaboró un informe y estudio previo, junto con una extensa documentación gráfica del estado de la misma, como requisito para redactar un proyecto de intervención sobre la totalidad de la cúpula. Este proyecto fue realizado por un equipo interdisciplinar de arquitectos, historiadores del arte, restauradores y documentalistas. El proyecto fue redactado por los arquitectos Luis Cortés Meseguer y José Pardo Conejero en octubre de 2019, y la finalización de la obra fue certificada en mayo de 2022.

Las imágenes muestran el estado final de la fachada principal, el campanario y los muros exteriores de la iglesia (Imag. 8). El proyecto de restauración se basó en un profundo conocimiento del edificio y su entorno, respetando su función original y proponiendo un uso adecuado.

List of actions and projects around the temple and actions shaping the space and urban landscape of the squares

Since the 1980s, various actions and projects have been carried out around the temple and the squares of Constitution, Campanario, and Jesús.

These initiatives were driven by the Municipal Technical Office, even before the area was declared a Site of Local Relevance. The objective has been to protect this environment, considered a fully protected monument according to the inventory of the General Urban Planning Plan of 1982. Subsequently, in 1989, the municipality intensified protection over the church, which was already classified as a protected monument in the inventory of the General Urban Planning Plan of 1982.

The parish priest, Mr. Juan Celda, who had experience in construction management, promoted various actions within the church, including pictorial series made by himself and the stylistic unification of the side chapels. Additionally, he promoted the restoration project of the facades and the completion of the bell tower, carried out by architects José Luis Gisbert, Juan Otegui, and Francisco Noguera in 1990 (Image 7). The project included the restoration and consolidation of the church's exterior facades, the completion of the bell tower, and the replacement of tiles on the dome. Various interventions were also carried out on the roofs to prevent water leakage.

The common practice during this time was to document municipal interventions through a Valued Report, along with general plans in some cases, as a minimum requirement to obtain rehabilitation and maintenance aids for buildings, according to the regulations of the Provincial Council. However, this project was not limited to the minimum requirements, but it was a comprehensive project that included all necessary documents. For the first time, the entirety of the exterior of the church and its dependencies were graphically drawn, using a topographic team. The justifying report described the temple as a Latin cross church, with three naves, a polygonal apse, and a dome with a small drum on the transept, attributing it to the late Valencian baroque style.

The project report consisted of three parts: description of the temple and its conservation status, restoration works carried out, and proposal for the completion of the bell tower. The necessary trades and materials were specified, as well as a General Conditions Specification and a breakdown price table along with measurements. In 2019, after the collapse of the south sector of the dome, a preliminary report and study were prepared, along with extensive graphic documentation of its condition, as a requirement to draft an intervention project for the entire dome. This project was carried out by an interdisciplinary team of architects, art historians, restorers, and documentarians. It was drafted by architects Luis Cortés Meseguer and José Pardo Conejero in October 2019, and the completion of the work was certified in May 2022.

The images show the final state of the main facade, the bell tower, and the exterior walls of the church (Imag. 8). The restoration project was based on a deep knowledge of the building and its surroundings, respecting its original function and proposing appropriate use.



Image 8. Fotografía de la fachada principal antes y después de la intervención
Image 8. Photograph of the main facade before and after the intervention

Conclusiones

La preocupación y aprecio de los vecinos de Massamagrell por su patrimonio arquitectónico, especialmente en torno a la iglesia de San Juan Apóstol y Evangelista, ha sido fundamental para su preservación. Sin este constante cuidado, habría sido imposible reparar y recuperar esta joya que representa la identidad del pueblo. Las acciones realizadas se alinean con la teoría y práctica de recuperación y restauración delpatrimonio en España, promovidas tanto por las administraciones como por los agentes del patrimonio.

La inclusión de los edificios en inventarios públicos permite su identificación, clasificación y protección, lo que facilita la tutela por parte de la administración. La sensibilidad de la autoridad autonómica al declarar como Bienes de Relevancia Local un gran número de edificios y monumentos tradicionales es destacable. Sin esta declaración previa, las autoridades municipales y autonómicas no pueden intervenir en un edificio.

Esto resalta la importancia de los inventarios y catálogos municipales como instrumentos para preservar los valores culturales de la comunidad, como el Catálogo Arquitectónico de Massamagrell. Aquellos que creen que la restauración de monumentos antiguos se reduce a la simplecolocación de piedra sobre piedra no comprenden la complejidad del estudio e interpretación que conlleva este proceso.



Imagen 9. Fotografía aérea de la fachada oeste año 2020 con el campanario
Image 9. Aerial photograph of the west facade in 2020 with the bell tower



Imagen 10. Fotografía de la fachada principal en el año 2022 con el campanario
Image 10. Photograph of the main façade in 2022 with the bell tower

Conclusions

The concern and appreciation of the residents of Massamagrell for their architectural heritage, especially around the church of San Juan Apóstol y Evangelista, have been fundamental forits preservation. Without this constant care, it would have been impossible to repair and recover this gem that represents the identity of the town.The actions taken align with the theory and practice of heritage recovery and restoration in Spain, promoted by both administrations and heritage agents.

The inclusion of buildings in public inventories allows for their identification, classification, and protection, facilitating oversight by the administration. The sensitivity of the autonomous authority in declaring many traditional buildings and monuments as Local Relevance Assets is remarkable. Without this prior declaration, municipal and regional authorities cannot intervene in a building.

This highlights the importance of municipal inventories and catalogs as instruments for preserving the cultural values of the community, such as the Architectural Catalog of Massamagrell. Those who believe that the restoration of ancient monuments is reduced to simply placing stone upon stone do not understand the complexity of the study and interpretation involved in this process.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- BARON ABAD, Sofia y NAVARRO GARCÍA, Judith. *Catálogo del patrimonio arquitectónico de Massamagrell*. Coord. ZURIAGA, V.F. Cronista de Massamagrell, Ed. Ayuntamiento de Massamagrell y Diputación de Valencia. Valencia, 2003.
- CALAMA RODRÍGUEZ, José María. "La restauración de construcción medieval. El caso español. (1800-1936)". En GRACIANI, Amparo, *La técnica de la arquitectura medieval,* colección *Árbol académico*. Ed. Universidad de Sevilla. Sevilla, 2001.
- ESTEBAN CHAPAPRÍA, Julián y GARCÍA CUETOS, Mª.Pilar. *Alejandro Ferrant y la conservación monumental en España (1929-1939): Castilla y León y la primera zona monumental.* Ed. Junta de Castilla y León, Consejería de Cultura y Turismo, Valladolid. 2007.
- ESTEBAN CHAPAPRÍA, J. (Coords.) *Bajo el signo de la victoria: la conservación del patrimonio durante el primer franquismo (1936-1958)*. Ed. Pentagraf, Valencia, 2008.
- GARÍN Y ORTIZ DE TARANCO, Felipe Mª*, Catálogo Monumental de la provincia de Valencia*. Ed. Caja de Ahorros de Valencia., Valencia, 1986.
- GONZÁLEZ TORNEL, Pablo. "Un modelo romano para la arquitectura eclesiástica española del siglo XVIII: La planta claustral en Valencia", *Quintana: Revista de estudios do Departamento de Historia da Arte*, Nº. 10, Ed. Universidad de Santiago. Santiago de Compostela, 2011.
- LAMPÉREZ ROMEA, Vicente. 1896. Apuntes para un estudio sobre las catedrales españolas. En *El Nacional*. Discurso leído en el Ateneo Mercantil de Madrid, leída el día 17 de marzo de 1896. Madrid, 1896.
- MASSAMAGRELL. *Plan General de Ordenación Urbana de Massamagrell.* Coord. Rivera Herráez, Rafael. Aprobación definitiva el día 30 de noviembre de 1982.
- RIBERA BLANCO, Javier. Teoría e historia de intervención en monumentos españoles hasta el Romanticismo. Discurso de ingreso en la Real Academia de Bellas Artes de la Purísima Concepción de Valladolid, Valladolid, 1989.
- ZURIAGA SENENT, Vicent Francesc, "Església de Sant Joan Evangelista de Massamagrell.Aspectes Històrics, estilístics iconogràfics del S XVIII" *Torrens: Estudis i Investigacions de Torrent i Comarca,* Nº. 14, 2003.
- ZURIAGA SENENT, Vicent Francesc, "La Iglesia de San Juan Apostol y Evangelista de Massamagrell. Historia e intervecion", Universitat Politecnica de Valencia, Valencia, 2023.

RESTAURACIÓN DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE SAN JUAN APÓSTOL Y EVANGELISTA DE MASSAMAGRELL

REHABILITATION ON THE DOME OF THE CHURCH OF SAN JUAN APÓSTOL AND EVANGELISTA IN MASSAMAGRELL

Valentina Ciaffoni
PhD student in Restoration of Architecture at Sapienza University of Rome,E-mail: valentina.ciaffoni@uniroma1.it
Jorge García Valldecabres
Investigador del Centro de Investigación Arquitectura, Patrimonio y Gestión del Desarrollo Sostenible PEGASO; Universitat Politècnica de València, España. Profesor Titular de Universidad. Researcher at the PEGASO Research Centre for Architecture, Heritage, and Sustainable Development Management; Universitat Politècnica de València, Spain. Professor Associate Professor. E-mail: jgvallde@ega.upv.es
Luis Cortés Meseguer
Investigador en el Dpto. Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València, Spain. Professor Associate Professor. E-mail:
Researcher in the Dept.Architectural Constructions; University of Alicant Associate Professor, E- mail: antonio.galiano@ua.es
María Concepción López González
Investigador del Centro de Investigación Arquitectura, Patrimonio y Gestión del Desarrollo Sostenible PEGASO; Universitat Politècnica de València, España. Profesor Titular de Universidad. Researcher at the PEGASO Research Centre for Architecture, Heritage, and Sustainable Development Management; Universitat Politècnica de València, Spain. Professor Associate Professor. E-mail: jgvallde@ega.upv.es

Abstract

The church of St. John the Apostle and Evangelist and its dependencies date back to the 18th century, being considered Local Relevance Assets. The dome was built in 1950 by the master builder Mr. Manuel Lledó Garces. It is characterized by blue tiles, a distinctive element in the Valencian urban profile and a symbol of regional architecture.

On Thursday, October 8, 2020, after 8:00 p.m., a loud noise occurred due to the slipping of the covering tiles of one of the eight slopes of the church dome. Days later, on Thursday, October 21, another part of the southern sector came loose.

The Technical Services of the City Council acted promptly, opening an emergency file to ensure the stability of the dome and prevent risks of falling material. The parish priest requested the coordination of a technical team, led by Professor Jorge García Valldecabres of the Polytechnic University of Valencia. A multidisciplinary team was formed, including archaeologists, restorers, architects, and a local chronicler.

Their objective was to define the processes to restore the stability of the dome and preserve the monument.

Keywords
Heritage, conservation, intervention, history

Introducción

Costruido en 1767, el templo parroquial de San Juan Apóstol y Evangelista es una de las manifestaciones más singulares del estilo rococó. Fue impulsado por el sacerdote ilustrado Felipe Beltrán, párroco de Massamagrell en la segunda mitad del siglo XVIII y consagrado en 1908 por el venerable Luis Amigó (1854-1934), fraile capuchino nacido en Massamagrell. La Cúpula se construyó en el año 1950 por el maestro de obras D. Manuel Lledó Garces. Se caracteriza por tejas azules es un elemento distintivo en el perfil urbano valenciano, siendo un símbolo de la arquitectura regional. La iglesia y sus dependencias siendo consideradas Bien de Relevancia Local.

El jueves 8 de octubre de 2020, después de las 20:00 horas, se produjo un estruendo debido al deslizamiento de las tejas de cubrición de uno de los ocho faldones de la cúpula de la iglesia. Días más tarde, el jueves 21 de octubre, otra parte del sector sur se desprendió (Imag.1-2). Los Servicios Técnicos del Ayuntamiento actuaron con rapidez, abriendo un expediente de emergencia para asegurar la estabilidad de la cúpula y prevenir riesgos de caída de material (Imag.3).

El cura párroco solicitó la coordinación de un equipo técnico, liderado por el profesor de la Universitat Politècnica de València, Jorge García Valldecabres. Se formó un equipo multidisciplinar que incluía arqueólogos, restauradores, arquitectos y un cronista local. Su objetivo era definir los procesos para restaurar la estabilidad de la cúpula y preservar el monumento.



Imagen 1. Fotografía detalle del derrumbe de las tejas del sector sur. Foto tomada mediante dron el día 19/10/20
Image 1. Detail photograph of the collapse of the tiles in the southern sector. Photo taken by drone on 10/19/20

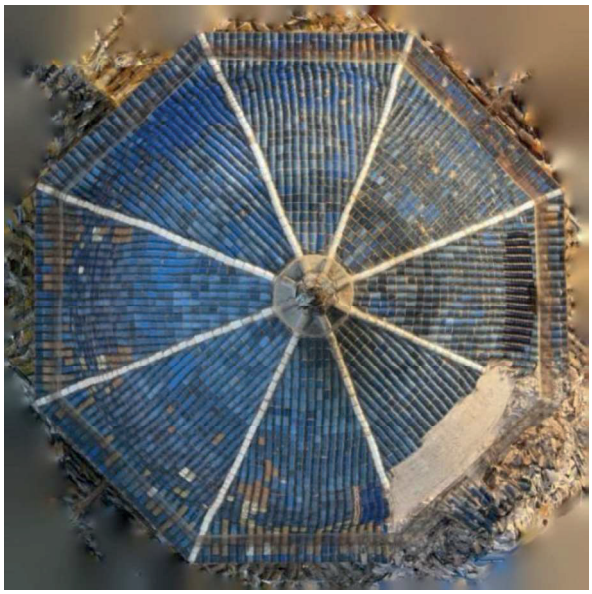


Imagen 2. Planta cenital en verdadera magnitud de la cúpula, el día 19/10/2020 (Josep Mª Congots i Enrique Estevens)
Image 2. True-scale overhead plan of the dome



Imagen 3. Actuación de los bomberos (Luis Cortés Meseguer, José Pardo Conejero 2023)
Image 3. Firefighters' intervention

Introduction

Built in 1767, the parish church of San Juan Apostle and Evangelist is one of the most unique manifestations of the Rococo style.

It was promoted by the enlightened priest Felipe Beltrán, parish priest of Massamagrell in the second half of the 18th century and consecrated in 1908 by the venerable Luis Amigó (1854-1934), a Capuchin friar born in Massamagrell. The Dome was constructed in 1950 by the master builder D. Manuel Lledó Garces. It is characterized by blue tiles and is a distinctive element in the Valencia urban skyline, being a symbol of regional architecture. The church and its dependencies are considered Local Heritage.

On Thursday, October 8, 2020, after 8:00 p.m., a loud noise occurred due to the slipping of the roofing tiles of one of the eight slopes of the church dome. Days later, on Thursday, October 21, another part of the southern sector detached (Imag.1-2). The Technical Services of the City Council acted quickly, opening an emergency file to ensure the stability of the dome and prevent the risk of falling material (Imag.3).

The parish priest requested the coordination of a technical team, led by the professor of the Universitat Politècnica de València, Jorge García Valldecabres. A multidisciplinary team was formed that included archaeologists, restorers, architects, and a local chronicler. Their goal was to define the processes to restore the stability of the dome and preserve the monument.



Imagen 4. Montaje de andamios
Image 4. Scaffolding during assembly



Imagen 5. Vista general del andamio colocado
Image 5. General view of the installed scaffold

Informes y estudios previos

La Orden de Ejecución de Emergencia obligaba a comenzar los trabajos de inmediato en aras de la seguridad de los viandantes, pero al mismo tiempo no eximía de las obligaciones derivadas del carácter patrimonial del edificio. Este tipo de intervenciones arquitectónicas en edificios de carácter patrimonial requiere una serie de acciones previas, como informes y/o estudios preliminares, que se adjuntan a la solicitud de autorización de los trabajos por parte de la Dirección General de Cultura.

En estos documentos se definen los valores intrínsecos de carácter patrimonial y se tramitan con anterioridad o de manera simultánea a la obtención de la licencia municipal de obras. El informe mencionado fue redactado por los expertos en patrimonio Jorge García Valldecabres, arquitecto, y Vicent F. Zuriaga Senent, historiador y cronista municipal. Este informe sirvió de base para el Estudio Previo que se redactó y que se acompañó con la documentación técnica restante que se presentó como instancia para iniciar la intervención.

Además, se proporcionó copia de estos documentos a los diferentes organismos que tutelan el bien edilicio: los servicios técnicos del arzobispado de Valencia, la Dirección General de Cultura de la Generalitat Valenciana y los servicios técnicos del ayuntamiento.

El informe avanzaba un primer estado de las manifestaciones patológicas de la cúpula a partir de inspecciones oculares realizadas tanto en el exterior como en el interior de la misma. Se reconoció el desplome de tres cuartas partes del sector sur, así como numerosas alteraciones ocurridas en el resto de los sectores de la cubierta de la calota. Se observó en el sector suroeste, que da a la plaza del Campanario, el desprendimiento y pérdida de las tejas de las cobijas de un tercio de una de las hiladas, dejando al descubierto y sin protección la superficie exterior de la calota, lo que permite el acceso del agua de lluvia y su filtración al interior de la iglesia.

En todos los sectores de la cubierta de la cúpula se observaron numerosas intervenciones parciales que suponen la introducción de materiales, tanto de agarre como de cubrición, heterogéneos, como resultado de las reposiciones de tejas desprendidas. Se verificó la existencia de reposiciones significativas de las tejas, así como desplazamientos de las mismas, tanto de cobijas como de canales o ríos. También se observó un elevado número de tejas rotas que amenazan con caer.

En el interior del templo, en la zona de la cúpula por el lado este, se apreciaban humedades en zonas próximas a las pinturas. A partir de lo expuesto, se afirmó que se había producido un colapso parcial debido a la pérdida de las condiciones de resistencia de los materiales de agarre y de los sistemas de sujeción de las tejas, lo cual evidenciaba el agotamiento de la capacidad portante de los materiales de agarre.

Se evaluó que, como consecuencia de la rotura por deslizamiento debido a tensiones de corte, esta circunstancia podría repetirse en el resto de los sectores.

Por su parte, la alcaldía recordó el deber de los propietarios de restablecer el bien dañado a su estado original, de acuerdo con el artículo 10 del Decreto 62/2018 de mayo del Consell, por el cual se regula el procedimiento de los bienes de relevancia local.

Por ello, se propuso la redacción urgente de un proyecto técnico de intervención sobre la totalidad de la cubierta de la cúpula, que garantice la estabilidad y las condiciones de ornato, con un revestimiento homogéneo de teja vidriada azul cobalto similar al existente.



Imagen 6. Inciso que reseña la obra de retejado de 1950 así como los nombres del arquitecto (José María Gómis y el maestro de obras y operarios)

Image 6. Parenthetical statement that reviews the re-roofing work of 1950, as well as the names of the architect (José María Gómis) and the master builder and workers

Reports and Preliminary Studies

The Emergency Execution Order required the immediate start of works for the safety of pedestrians, but at the same time did not exempt from obligations arising from the heritage character of the building. This type of architectural intervention in heritage buildings requires a series of preliminary actions, such as reports and/or preliminary studies, which are attached to the request for authorization of works by the General Directorate of Culture. In these documents, the intrinsic values of heritage are defined and processed prior to or simultaneously with the obtaining of the municipal construction license.

The mentioned report was drafted by heritage experts Jorge García Valldecabres, architect, and Vicent F. Zuriaga Senent, historian and municipal chronicler. This report served as the basis for the Preliminary Study that was drafted and accompanied by the remaining technical documentation presented as an application to initiate the intervention. Additionally, copies of these documents were provided to the various bodies overseeing the building: the technical services of the Archbishopric of Valencia, the General Directorate of Culture of the Valencian Government, and the technical services of the municipality.

The report advanced an initial state of the pathological manifestations of the dome based on ocular inspections carried out both outside and inside it. The collapse of three-quarters of the southern sector was recognized, as well as numerous alterations occurring in the rest of the sectors of the dome's cover. It was observed in the southwest sector, facing the Bell Tower Square, the detachment and loss of tiles from the eaves of one-third of a row, leaving the outer surface of the dome exposed and unprotected, allowing rainwater to enter and filter into the church.

Numerous partial interventions were observed in all sectors of the dome's cover involving the introduction of heterogeneous materials, both for grip and covering, as a result of the replacement of detached tiles. Significant tile replacements were verified, as well as displacements of the same, both of eaves and channels or rivers. A high number of broken tiles threatening to fall were also observed. In the interior of the temple, in the dome area on the east side, dampness was observed in areas near the paintings.

Based on the above, it was affirmed that a partial collapse had occurred due to the loss of the grip materials' resistance conditions and the tile fastening systems, indicating the exhaustion of the load-bearing capacity of the grip materials.

It was assessed that, as a consequence of the breaking due to sliding caused by shear stresses, this circumstance could be repeated in the rest of the sectors.

On the other hand, the city council reminded property owners of their duty to restore the damaged property to its original state, in accordance with Article 10 of Decree 62/2018 of May of the Consell, which regulates the procedure for goods of local relevance.

Therefore, the urgent drafting of a technical intervention project for the entire dome cover was proposed to guarantee stability and ornamental conditions, with a homogeneous coating of cobalt blue glazed tiles similar to the existing ones.



Imagen 7. Espacio entre bóvedas de la cupula. Diciembre de 2020
Image 7. Space between the domes of the cupola. December 2020

El proyecto

Se determinó que los dos sectores adyacentes al que ya había colapsado estaban separados de la estructura, y su cubierta no presentaba ningún elemento de sujeción al soporte. Además, al colapsar una parte del tejado, las áreas colaterales mostraban grietas en las tejas que indicaban la dirección de un posible futuro colapso hacia el sector caído.

La intervención propuesta contempló la reparación de la cubierta con teja vidriada azul en las cobijas y teja curva sin vidriar en los ríos, así como la consolidación de las cornisas. Se procedió al desmontaje de las tejas, su almacenamiento y limpieza, incluso de aquellas tejas que, aunque estaban deterioradas, podrían servir para recortes y encuentros.

Lamentablemente, el uso de clavos de hierro convencionales en la reforma de 1950 causó la fractura de la mayoría de las tejas, ya que la oxidación de estos elementos y su aumento de volumen las habían dañado. El desmontaje de la teja se realizó en la totalidad de la cúpula simultáneamente para evitar arrastrar los defectos de replanteo e inexactitudes que se derivan de las sucesivas reparaciones. El pronóstico de abundantes lluvias aconsejó proteger provisionalmente la cúpula, aplicando dos manos de resina vinílica en base acuosa.

Se descubrió una capa de grava entre el mortero original y el añadido en los años 1950, la cual facilitó el derrumbe de las tejas y fue retirada. En su lugar, se dispuso una capa de hormigón con cal hidráulica y se reconstruyeron las partes salientes perdidas de la cornisa. Posteriormente, se extendió una capa de mortero de cal con malla de fibra y se replantearon los cursos de agua de la cúpula desde el centro.

La colocación de las tejas se realizó con mortero mixto de cal y cemento, permitiendo absorber las tensiones provocadas por la inercia térmica de la cerámica. Las tejas de las áreas verticales se anclaron con clavos resistentes de acero inoxidable con vainas de polipropileno de alta resistencia para evitar tensiones internas en la punta. El replanteo y la ejecución comenzaron desde el meridiano central de uno de los faldones, trazando líneas paralelas como guías para el resto de las canalizaciones. Posteriormente, se procedió al replanteo de los cursos de agua paralelos, teniendo en cuenta el efecto "bola" para corregir los defectos de ejecución de las láminas de los faldones.

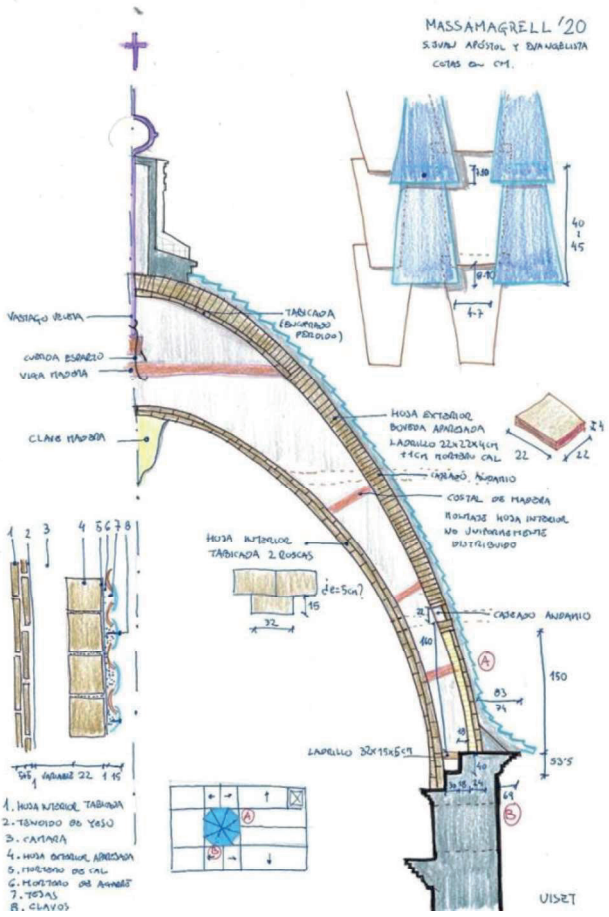


Imagen 8. Croquis de la sección constructiva de la cúpula (Luis Cortés 2021)
Image 8. Sketch of the construction section of the dome

Conclusión

La intervención de restauración, completada el 11 de mayo de 2021(Imag.11), fue una oportunidad para asegurar la cúpula y profundizar en el conocimiento del patrimonio arquitectónico a preservar. Durante la ejecución de la consolidación se llevó a cabo un proceso exhaustivo de catalogación y documentación de la cúpula. A través de fotografías y notas detalladas se comprendió la consistencia material y la tecnología de construcción de la fábrica de la cúpula.

La intervención realizada ha asegurado la estabilidad del bien, mediante la consolidación de la cúpula y la preservación de sus partes. La acción sobre el bien también ha sido un momento fundamental para el conocimiento del mismo, documentado y catalogado gracias al trabajo del equipo que ha colaborado.



Imagen 9. Taladro para anclar la teja al soporte. Enero de 2021
Image 9. Drill to anchor the tile to the support. January 2021



Imagen 10. Se asienta la teja y con unos golpecitos, con el mismo puño en este caso, se acomoda. Enero de 2021
Image 10. The roof tile settles in with a few taps, using the same fist in this case. January 2021

The project

It was determined that the two adjacent sectors to the one that had already collapsed were detached from the structure, and their covering did not present any fastening element to the support. Additionally, as a part of the roof collapsed, the collateral areas showed cracks in the tiles indicating the direction of a possible future collapse towards the fallen sector.

The proposed intervention included the repair of the covering with glazed blue tiles on the eaves and curved tiles without glazing on the valleys, as well as the consolidation of the cornices. The tiles were removed, stored, and cleaned, even those that, although deteriorated, could be used for cuts and joints. Unfortunately, the use of conventional iron nails in the 1950s renovation caused the fracture of most tiles, as the oxidation of these elements and their volume increase had damaged them. The tile removal was carried out simultaneously throughout the dome to avoid dragging the layout defects and inaccuracies resulting from successive repairs. The forecast of abundant rainfall advised temporarily protecting the dome by applying two coats of water-based vinyl resin.

A layer of gravel was discovered between the original mortar and the added one in the 1950s, which facilitated the collapse of the tiles and was removed. In its place, a layer of concrete with hydraulic lime was placed, and the missing protruding parts of the cornice were rebuilt.

Subsequently, a layer of lime mortar with fiber mesh was applied, and the watercourses of the dome were redefined from the center.

The tiles were installed using a mixed mortar of lime and cement, allowing to absorb the tensions caused by the thermal inertia of the ceramic. The tiles in the vertical areas were anchored with resistant stainless-steel nails with high-strength polypropylene sheaths to avoid internal tensions at the tip.

The layout and execution started from the central meridian of one of the slopes, tracing parallel lines as guides for the rest of the gutters. Subsequently, the layout of the parallel watercourses was carried out, considering the "ball" effect to correct the execution defects of the slopes' sheets.

Conclusions

The restoration intervention, completed on May 11, 2021 (Imag.11), was an opportunity to secure the dome and deepen the understanding of the architectural heritage to be preserved. During the consolidation process, an exhaustive cataloging and documentation of the dome was carried out. Through photographs and detailed notes, the material consistency and construction technology of the dome structure were understood.

The intervention carried out has ensured the stability of the asset, through the consolidation of the dome and the preservation of its parts. The action on the asset has also been a fundamental moment for its understanding, documented and cataloged thanks to the work of the collaborating team.



Imagen 11. Vista final de la intervención desde la Plaza de Jesús. Abril de 2021
Image 11. Final view of the intervention from the Plaza de Jesús. April 2021

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- BARON ABAD, Sofia y NAVARRO GARCÍA, Judith. *Catálogo del patrimonio arquitectónico de Massamagrell*. Coord. ZURIAGA, V.F. Cronista de Massamagrell, Ed. Ayuntamiento de Massamagrell y Diputación de Valencia. Valencia, 2003.
- DE SAN NICOLÁS, FRAY L. *Tratado de Arquitectura: Arte y uso de arquitectura: primera y segunda*, Ed. Barco López, P., Madrid, 1796.
- FORTEA LUNA, M. Y LÓPEZ BERNAL, V. Bóvedas de Ladrillo. *Proceso constructivo y análisis estructural de bóvedas de aristas.* Ed. De los Oficios, S.L. (2 edición), Badajoz, 2001.
- GARCÍA-VALLDECABRES, J. y ZURIAGA SENENT, V. *Informe sobre la necesidad de realizar una intervención de emergencia sobre la cubierta de la cúpula del templo parroquial de San Juan Apóstol y Evangelista de Massamagrell*. 23 de octubre de 2020.
- GAZZOLA, P., & PANE, R. *Proposte per una carta internazionale del restauro*. Il monumento per l'uomo Atti del II Congresso Internazionale del Restauro. ICOMOS. Venezia,1964.
- GIL SAURA, Y. "*Recorrido Histórico por las cúpulas valencianas ss.XVI-XVIII*" en Las cúpulas Azules de la Comunidad Valenciana. Ed. Generalitat Valenciana, Valencia 2006.
- GENERALITAT VALENCIANA. Ley 5/2007, de 9 de febrero, de la Generalitat, de modificación de la Ley 4/1998, de 11 de junio, del Patrimonio Cultural Valenciano.
- MOYA BLANCO, L. *Bóvedas tabicadas*. Ed. Ministerio de gobernación. Madrid, 1947.
- REDONDO MARTÍNEZ, E. *La bóveda tabicada en España en el siglo XIX: La transformación de un sistema constructivo*, tesis doctoral, leída UPM, Madrid, 2013. SOLER-VERDÚ, R. y SOLER-ESTRELA, A. "Tipología de cúpulas tabicadas. Geometría y construcción en la Valencia del siglo XVIII" en Informes de la Construcción, 67 (538). CSIC, 2015.
- SOLER VERDÚ, R., SOLER ESTRELA, A. y CORTÉS MESEGUER, L. "*Tipología de cúpulas. Estudio de los proyectos académicos de la Real Academia de BB. AA. de San Carlos de Valencia. España. 1768-1846*" en II Congreso Internacional Hispanoamericano y X Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Instituto Juan de Herrera, San Sebastián, 2017.

VIABILIDAD DE LAS FACHADAS INDUSTRIALIZADAS EN LA REHABILITACIÓN DE EDIFICIOS

FEASIBILITY OF INDUSTRIALIZED FACADES IN BUILDING REHABILITATION

Milagro Iborra Lucas
Investigador en el Dpto. Construcciones Arquitectónicas-CITE; Universitat Politècnica de València; Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. PDI de Universidad, Ingeniero de Materiales, Ingeniero de Edificación, Arquitecto técnico, Doctor en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje por la UPV. E-mail: miborra1@upvnet.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions-CITE; Universitat Politècnica de València, Lecturer, Materials Engineer, Building Engineer, PhD Architecture, Building, Urban Planning and Landscape by the UPV. E-mail:

John Jairo Zambrano Alcivar
Ingeniero Civil por la PUCE, Máster Universitario en Edificación en la Especialidad de Gestión de la edificación por la UPV. E-mail: jjzamalc@edificacion.upv.es
Civil Engineering by the PUCE, Master's Degree in Building Constructions with the Specialization in Building Management by the UPV. E-mail: jjzamalc@edificacion.upv.es

Resumen

Actualmente, el parque edificatorio es uno de los principales responsables del impacto ambiental, debido a su elevado consumo de recursos y generación masiva de residuos. En España, un gran porcentaje de edificaciones requieren intervenciones urgentes, ya que han superado su vida útil mínima. Estas acciones son necesarias para prolongar su funcionalidad y rendimiento, además de alinearlas con los objetivos de Desarrollo Sostenible.

Este trabajo de investigación está orientado a realizar un estudio de viabilidad técnica, considerando los distintos sistemas modulares de fachadas industrializadas existentes en el sector, centrándonos en su compatibilidad y comportamiento estructural por la repercusión de las cargas adicionales, tomando en cuenta que cuyo enfoque son edificaciones obsoletas y por lo que requiere un mejoramiento energético, ya que están construidos con requerimiento técnicos distintos a los actuales.

En resumen, de las fachadas industrializadas lo que se quiere es llevar a cabo una evaluación, comparación y verificación en cuanto a su viabilidad, permitiendo emitir juicios críticos soportados en una base técnica de unos sistemas con respectos a otros adaptando el concepto de industrialización a la rehabilitación energética

Palabras clave

Edificios Residenciales, Rehabilitación Energética, Fachadas Industrializadas, Sistemas Modulares, Eficiencia Energética, Viabilidad Técnica, Industrialización.

Abstract

The building stock is currently one of the main contributors to environmental impact due to its high resource consumption and massive waste generation. In Spain, a significant percentage of buildings urgently require interventions as they have exceeded their minimum useful life. These actions are essential to prolong their functionality and performance while aligning them with Sustainable Development Goals.

This research focuses on conducting a technical feasibility study, considering the various industrialized modular facade systems available in the sector. It emphasizes their compatibility and structural behavior under the influence of additional loads, targeting obsolete buildings that require energy upgrades due to having been constructed under outdated technical requirements.

In summary, the aim is to evaluate, compare, and verify the feasibility of industrialized facades. This involves issuing critical assessments supported by a technical foundation to compare these systems against one another, adapting the concept of industrialization to energy rehabilitation.

Keywords

Residential Buildings, Energy Rehabilitation, Industrialized Facades, Modular Systems, Energy Efficiency, Technical Feasibility, Industrialization.

Introducción

Los conocimientos con los que hemos construido nos dan una clara respuesta que la humanidad no podrá afrontar y vivir a largo plazo de la misma manera. Recordemos que es ahí donde el parque edificatorio tiene mayor participación en cuanto a la concentración de impactos medioambientales más importantes por el gran consumo de recursos y por ende mayores emisiones de residuos hacia el medio ambiente.

Según el CTE (Código Técnico de la Edificación) [1] estima y determina un periodo de vida útil o de servicio de una edificación mínima de 50 años posterior a dicha fecha se recomienda una evaluación del Edificio, para verificar su accesibilidad y principalmente su eficiencia energética, debido al deterioro de sus características constructivas, las cuales variarían dependiendo de su diseño y ejecución de distintas soluciones constructivas, y así como también de su habitual uso y mantenimiento preventivos del mismo con el pasar de los años debido a su deterioro natural.

En las edificaciones, uno de los puntos más vulnerables y expuestos al deterioro y pérdida de sus propiedades constructivas iniciales es las envolventes, debido al contacto con el exterior, tolerando los distintos cambios climáticos, agrietamientos, fisuras, etc. Las fachadas realmente son un componente de gran importancia en la conservación y rehabilitación de los edificios existentes ya que son elementos que protegen y reduce la vulnerabilidad de otros componentes o materiales internos de la edificación, permitiendo mantener en buen estado y operativo con el pasar de los años. Además, juegan adicionalmente un papel importante en el campo de eficiencia energética, consiguiendo reducir el gasto energético y a su vez económico.

Respecto al parque edificatorio de toda España, existe carencia de información técnica y características específicas de las distintas fachadas existente en las edificaciones más antiguas, para otorgar una renovación por medio de sistemas industrializados, motivo por el cual este trabajo ha sido desarrollado para tener una visión más clara de cómo se comportan estos elementos innovadores frente a la rehabilitación en edificaciones catalogadas como obsoletas [2].

Esta necesidad de abordar las limitaciones inherentes en el sector de la construcción en España, que actualmente caracterizado por el predominio de métodos tradicionales y una limitada eficiencia en la gestión de recursos, enfrenta desafíos críticos relacionados con la sostenibilidad y la rehabilitación energética del parque edificatorio existente, particularmente en viviendas construidas antes de las normativas actuales. Dado que estas edificaciones presentan un alto consumo energético y escasa eficiencia, la adopción de sistemas de fachadas industrializadas se plantea como una solución innovadora para mejorar el rendimiento energético, reducir emisiones y optimizar los procesos constructivos mediante tecnologías prefabricadas y metodologías más sostenibles [3].

Metodología

El estudio se justifica en la necesidad de evaluar la compatibilidad técnica y estructural de estos sistemas, considerando principalmente el aspecto de la carga adicional en estructuras existente. Asimismo, se busca validar cómo estas soluciones pueden ser aplicadas de manera efectiva en rehabilitaciones a gran escala, reduciendo costos y tiempos de ejecución, cumpliendo con estándares de sostenibilidad ambiental y normativas energéticas.

La metodología aplicada en esta investigación se representa en la tabla 1 y se desarrolla en 6 capítulos de manera alineada con la estructura general del trabajo:

- El primer capítulo aborda los objetivos generales, la estructura y el contenido de la investigación, ofreciendo una visión general de los principales aspectos tratados en el estudio.
- El capítulo 2, se centra en el análisis de artículos científicos y literatura especializada, profundizando en los fundamentos teóricos y el estado del arte relacionado con la investigación.
- Los capítulos 3 y 4 presentan una cronología de la evolución de la normativa técnica aplicada a las edificaciones, además de un estudio y análisis de los distintos sistemas de fachadas industrializadas en el mercado como soluciones para mejorar la eficiencia energética en las rehabilitaciones.
- El quinto capítulo, se centra en la definición y desarrollo de un modelo/prototipo o arquetipo edificatorio de una etapa constructiva de referencia para verificar el comportamiento actual de la estructura y un planteamiento para aplicarlo como solución de rehabilitación, verificación de la propuesta y resultados.
- En el capítulo 6, tenemos las conclusiones de la investigación.

Introduction

The knowledge which we have built provides a clear indication that humanity cannot continue to live and operate in the long term in the same manner. It is crucial to recognize that building stock plays a significant role in environmental impacts, primarily due to its high resource consumption and, consequently, its substantial waste emissions into the environment.

According to the Spanish Building Code (CTE) [1], a building is estimated to have a minimum useful or service life of 50 years. After this period, it is recommended to conduct an evaluation of the building to assess its accessibility and, above all, its energy efficiency. This is necessary due to the deterioration of its construction characteristics, which can vary depending on the design, implementation of different construction solutions, and preventive maintenance practices carried out over the years as part of its natural aging process.

In buildings, one of the most vulnerable and exposed components to deterioration and loss of their initial construction properties is the envelope. Due to its direct exposure to external factors, it endures weather changes, cracking, fissures, and other issues. Facades are critical elements in the conservation and rehabilitation of existing buildings, as they protect and reduce the vulnerability of internal components and materials, ensuring the building remains operational and in good condition over time. Additionally, facades play a crucial role in energy efficiency by reducing energy consumption and, consequently, economic costs.

In the context of Spain's building stock, there is a lack of technical information and specific characteristics regarding the facades of older buildings, which complicates their renovation using industrialized systems. This study aims to provide a clearer understanding of how these innovative elements perform in the rehabilitation of buildings classified as obsolete [2].

Addressing the limitations inherent in Spain's construction sector currently dominated by traditional methods and limited resource management efficiency is essential. The sector faces critical challenges related to sustainability and the energy rehabilitation of the existing building stock, particularly in housing built before current regulations were implemented. These buildings typically exhibit high energy consumption and low efficiency. The adoption of industrialized facade systems is proposed as an innovative solution to enhance energy performance, reduce emissions, and optimize construction processes through prefabricated technologies and more sustainable methodologies [3].

Methodology

This study is justified by the need to evaluate the technical and structural compatibility of industrialized facade systems, focusing primarily on the additional load they impose on existing structures. Additionally, it seeks to validate how these solutions can be effectively applied in large-scale rehabilitation projects, reducing costs and execution times while adhering to environmental sustainability standards and energy regulations.

The methodology applied in this research is outlined in Table 1 and is developed across six chapters, aligned with the overall structure of the study:

- The first chapter addresses the general objectives, structure, and content of the research, providing an overview of the main aspects explored in the study.
- Chapter 2 focuses on analyzing scientific articles and specialized literature, delving into theoretical foundations and the state of the art relevant to the research.
- Chapters 3 and 4 present a chronology of the evolution of technical regulations applied to buildings, as well as a study and analysis of the various industrialized facade systems available in the market as solutions to improve energy efficiency in renovations.
- The fifth chapter focuses on the definition and development of a model/prototype or building archetype of a reference construction stage to verify the current behavior of the structure and a proposal for applying it as a rehabilitation solution, including verification of the proposal and results.
- In chapter 6, we present the conclusions of the research.

En la siguiente tabla 1 se explica la interacción entre los distintos puntos del trabajo, estas se encuentran estrechamente relacionadas unas con otras y a su vez indica como proceder.

Tabla 1. *Metodología de la investigación. Fuente: Elaboración propia.*

VIABILIDAD DE LAS FACHADAS INDUSTRIALIZADAS EN REHABILITACIÓN DE EDIFICIOS RESIDENCIALES				
C1	1,1 INTRODUCCIÓN	1,2 OBJETIVOS	1,3 ESTRUCTURA Y CONTENIDO	1,4 METODOLOGÍA
C2	ESTADO DEL ARTE			
	2,1 - 2,6 ANTECEDENTES			
	• Literatura científica			
C3	MARCO TEÓRICO			
	3,1 - 3,4 DESARROLLO HISTÓRICO DE LA NORMATIVA		3,5 SOLUCIONES TRADICIONALES (SEMI-INDUSTRIALIZACIÓN)	
	• Marco histórico y normativo de estructuras de hormigón en edificación • Desarrollo cronológico del código técnico de la edificación • Evolución de la eficiencia energética en la edificación en España		• Tipología edificatorias • Evolución técnica de edificaciones • Soluciones actuales de rehabilitación	
C4	INDUSTRIALIZACIÓN EN REHABILITACIONES DE EDIFICIOS RESIDENCIALES			
	4,1 - 4,2 SISTEMAS MODULARES INDUSTRIALIZADOS		4,3 - 4,4 BENEFICIOS Y REGULACIONES TÉCNICAS SISTEMAS	
	• Situación actual • Fachadas modulares industrializadas		• Ventajas de sistemas industrializados • Normativa y requisitos técnicos para la rehabilitación con fachadas industrializadas en España	
C5	CASO DE ESTUDIO			
	5,1 - 5,3 PRELIMINARES	5,4 - 5,5 ANÁLISIS PRELIMINAR AL DESARROLLO EXPERIMENTAL - PRÁCTICO	5,6 - 5,8 MODELIZACIÓN Y EVALUACIÓN	5,9 - 5,10 PROPUESTA Y RESULTADOS
	• Cuestionamiento • Planteamiento	• Selección y descripción del caso de estudio • Datos generales • Memoria constructiva.	• Modelización y evaluación del estado estructural actual • Modelización y evaluación del estado energético actual • Simulación y estimación de carga máxima admisible	• Prototipo del nuevo sistema. • Modelización y evaluación del estado energético futuro • Análisis comparativo • Análisis económico
C6	6,1 CONCLUSIONES		6,1 LÍNEAS FUTURAS	

Tras desarrollar y analizar las principales bases de los sistemas industrializados, y ante la ausencia de un sistema que se ajuste completamente a las necesidades actuales de la rehabilitación de edificaciones existentes, surge la necesidad de realizar una evaluación exhaustiva para determinar si es más adecuado sustituir la fachada actual o incorporar un sistema industrializado sobre ella. Este análisis requiere establecer criterios clave que guíen el proceso de decisión y permitan seleccionar la opción más conveniente y eficiente.

En este caso, la cuestión central es: ¿mantener o sustituir la fachada existente? Para ello, es imprescindible realizar un análisis detallado que permita determinar cuál de los dos enfoques ofrece mayores beneficios, tanto desde el punto de vista técnico como económico y funcional, según se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. *Pros-Contras de mantener/eliminar una fachada existente en la edificación. Fuente: Elaboración propia.*

FACHADA EXISTENTE			
MANTENER		**ELIMINAR**	
PROS	Ahorro en costes de demolición y gestión de residuos.	**PROS**	Libertad de personalizar y aplicar de un sistema modular.
	Reducción en los tiempos de intervención en la obra.		Conservación en la seguridad y estabilidad estructural del edificio.
	Supera las limitaciones energéticas iniciales.		Cumplir con los estándares actuales de eficiencia energética.
	Disminuye los riesgos por invasión interna.		. Menor mantenimiento a futuro.
MANTENER		**ELIMINAR**	
CONTRAS	Necesidad de refuerzos estructurales (según del caso).	**CONTRAS**	Generación de residuos.
	Limitación en la personalización.		Implica mayores tiempos de intervención.
	Invasión de espacio público por una ampliación		Posible daños derivados de la demolición.
	Alteración de las características arquitectónicas originales del edificios.		Costes más altos en términos de mano de obra, tiempo y gestión de residuos.

Para abordar este problema, además se desarrolló un diagrama de flujo (Figura 1) con el fin de ayudar a facilitar la toma de decisiones en la rehabilitación de un edificio.

In the following Table 1, the interaction between the different points of the work is explained. These are closely related to each other and indicate how to proceed.

Table 1. *Research Methodology. Source: Own elaboration.*

	FEASIBILITY OF INDUSTRIALIZED FACADES IN BUILDING REHABILITATION			
C1	1,1 INTRODUCTION	1,2 OBJECTIVES	1,3 STRUCTURE AND CONTENT	1,4 METHODOLOGY
C2	STATE OF THE ART			
	2,1 - 2,6 BACKGROUND			
	• Scientific literature			
C3	THEORETICAL FRAMEWORK			
	3,1 - 3,4 HISTORICAL DEVELOPMENT OF THE REGULATIONS		3,5 TRADITIONAL SOLUTIONS (SEMI-INDUSTRIALIZATION)	
	• Historical and nominative framework of concrete structures in building • Chronological development of the technical building code • Evolution of energy efficiency in building in Spain		• Building typology • Tecnical evolution of buildings • Current rehabilitation solutions	
C4	INDUSTRIALIZATION IN REHABILITATIONS OF RESIDENTIAL BUILDINGS			
	4,1 - 4,2 INDUSTRIALIZED MODULAR SYSTEMS		4,3 - 4,4 BENEFITS AND TECHNICAL REGULATIONS SYSTEMS	
	• Current situation • Industrialized modular facades		• Advantages of industrialized systems • Regulations and technical requeriments for rehabilitation with industrialized in Spain	
C5	CASO DE ESTUDIO			
	5,1 - 5,3 PRELIMINARY	5,4 - 5,5 PRELIMINARY ANALYSIS TO THE DEVELOPMENT EXPRIMENTAL - PRACTICAL	5,6 - 5,8 MODELING AND EVALUATION	5,9 - 5,10 PROPOSAL AND RESULTS
	• Questioning • Approach	• Selection and description of the case of study • General data • Constructive memory	• Status modeling and evaluation current structural • Status modeling and evaluation current energy • Simulation and maximum load estimate	• Prototype of the new system • Modeling and evaluation of the state energetic future • Comparative analysis • Economic analysis
C6	6,1 CONCLUSIONS		6,1 FUTURE LINES	

After developing and analyzing the main foundations of industrialized systems, and in the absence of a system that fully meets the current needs of rehabilitating existing buildings, the need arises to conduct a thorough evaluation to determine whether it is more appropriate to replace the current facade or incorporate an industrialized system onto it. This analysis requires establishing key criteria to guide the decision-making process and allow for the selection of the most convenient and efficient option.

In this case, the central question is: Should the existing facade be maintained or replaced? To answer this, it is essential to conduct a detailed analysis to determine which of the two approaches offers greater benefits, both from a technical, economic, and functional perspective, as shown in Table 2.

Table 2. *Pros-Cons of maintaining/eliminating an existing facade on the building. Source: Own elaboration*

EXISTING FACADE			
MAINTAIN		**ELIMINATE**	
PROS	Savings in demolition and waste management costs.	**PROS**	Freedom to customize and apply a modular system.
	Reduction in intervention times in the work.		Conservation in the safety and structural stability of the building.
	Overcomes the initial energy limitations		Comply with current energy efficiency standards.
	Reduces the risks of internal invasion.		. Less maintenance in the future.
MAINTAIN		**ELIMINATE**	
CONS	Need for structural reinforcements (as appropriate).	**CONS**	Generation of waste.
	Limitation in customization.		It implies longer intervention times.
	Invasion of public space for an expansion.		Possible damage resulting from demolition.
	Alteration of the original architectural characteristics of the buildings.		Higher costs in terms of labor, time and waste management.

To address this issue, a flowchart (Figure 1) was also developed to help facilitate decision-making in building rehabilitation.

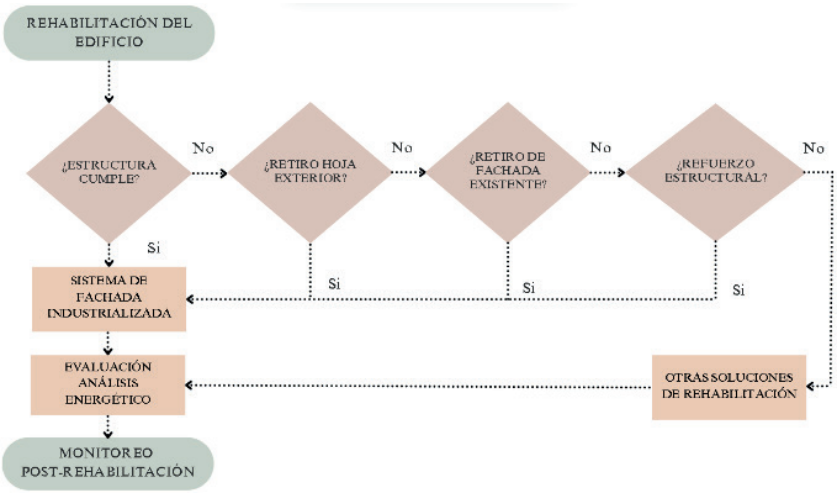


Figura 1. *Diagrama de flujo de proceso para la rehabilitación del edificio. Fuente: Elaboración propia.*

Selección del caso de estudio

El proyecto en estudio corresponde a un edificio de uso mixto (Figura 2), con una combinación de áreas residenciales y comerciales, ubicado en un entorno urbano consolidado. La edificación, construida en la segunda mitad del siglo XX, refleja una tipología característica de su época, cuyos elementos constructivos son un punto clave en la base para el análisis estructural (CYPECAD) y energético (CYPETHERM).



Figura 2. *Fotografías. Fuente: Google Maps.*

Simulación y estimación de carga máxima admisible.

El análisis se centró en las áreas de la fachada donde se proyecta adosar un sistema modular industrializado, evaluando la capacidad estructural mediante la aplicación progresiva de combinaciones de cargas actuantes hasta identificar el punto de fallo. Este enfoque metodológico permitió determinar con precisión la capacidad máxima de la estructura y establecer el peso máximo admisible para el nuevo sistema modular, garantizando su viabilidad estructural.

Según los resultados presentados en la tabla 3, la carga máxima admisible antes de la deformación es de 1 kN/m, equivalente a 101,94 kg/m, lo que corresponde a una carga de 34 kg/m² para una altura de 3 metros.

Tabla 3. *Resultados de simulación de cargas lineales. Fuente: Elaboración propia.*

SIMULACIÓN DE CARGAS						
CARGA [kN/m]	**DEFORMACIÓN [cm]**	**FLECHA ACTIVA**	**ZONA**	**AFECTACIÓN**	**RESULTADO**	**ACTUACIÓN**
2,50	0,371	L/416	Viga 83 (P1 - voladizo)	Planta 1 a Planta 5	No cumple flecha activa viga.	Añadir refuerzos que limiten la deformación Aumentar rigidez ampliando la sección
	0,294	L/473	Vigueta (P6 - voladizo)	Planta 1 a Planta 5	No cumple flecha activa vigueta.	
2,10	0,357	L/432	Viga 83 (P1 - voladizo)	Planta 1 a Planta 5	No cumple flecha activa viga.	
	0,312	L/446	Vigueta (P6 - voladizo)	Planta 1 a Planta 5	No cumple flecha activa vigueta.	
1,80	0,344	L/448	Viga 83 (P1 - voladizo)	Planta 1 a Planta 5	No cumple flecha activa viga.	
	0,297	L/469	Vigueta (P6 - voladizo)	Planta 1 a Planta 5	No cumple flecha activa vigueta.	
1,50	0,330	L/467	Viga 83 (P1 - voladizo)	Planta 1 a Planta 5	No cumple flecha activa viga.	
	0,286	L/487	Vigueta (P6 - voladizo)	Planta 1 a Planta 5	No cumple flecha activa vigueta.	
1,30	0,321	L/480	Viga 83 (P1 - voladizo)	Planta 1 a Planta 5	No cumple flecha activa viga.	
1,15	0,314	L/491	Viga 83 (P1 - voladizo)	Planta 1 a Planta 5	No cumple flecha activa viga.	
1,05	0,309	L/499	Viga 83 (P1 - voladizo)	Planta 1 a Planta 5	No cumple flecha activa viga.	
1,00	0,307	L/502	-	-	-	-

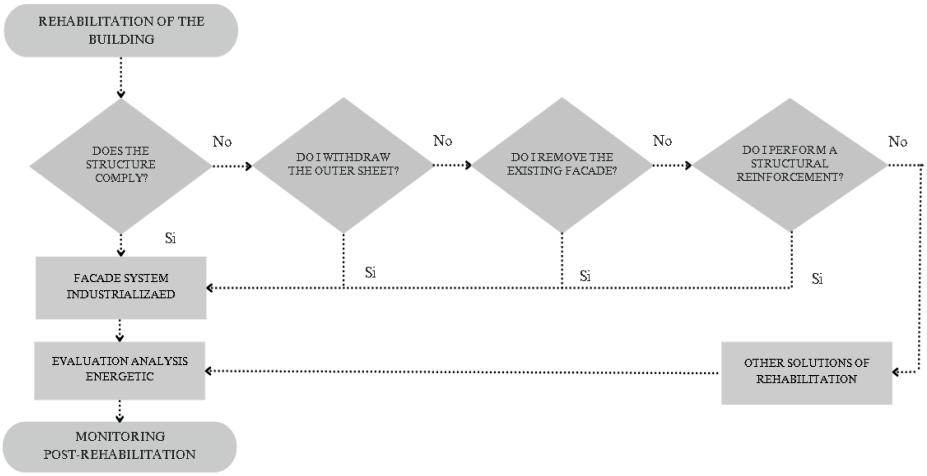


Figure 1. *Process Flowchart for Building Rehabilitation. Source: Own elaboration.*

Selection of the Case Study

The project under study involves a mixed-use (Figure 2) building combining residential and commercial areas, located in a consolidated urban environment. Built in the second half of the 20th century, the building reflects a typology characteristic of its time, with construction elements serving as a key foundation for structural analysis (CYPECAD) and energy analysis (CYPETHERM).



Figure 2*. Photographs. Source: Google Maps.*

Simulation and Estimation of Maximum Allowable Load

The analysis focused on the facade areas where an industrialized modular system is planned to be attached, evaluating the structural capacity through the progressive application of load combinations until identifying the failure point. This methodological approach allowed for a precise determination of the structure's maximum capacity and the establishment of the maximum allowable weight for the new modular system, ensuring its structural feasibility.

According to the results presented in Table 3, the maximum allowable load before deformation is 1 kN/m, equivalent to 101.94 kg/m, which corresponds to a load of 34 kg/m² for a height of 3 meters.

Table 3. *Linear load simulation results. Source: Own elaboration.*

LOADS SIMULATION						
LOAD [kN/m]	DEFORMATION [cm]	ACTIVE DEFLECTION	AREA	AFFECTATION	RESULT	PERFORMANCE
2,50	0,371	L/416	Beam 83 (P1 - voladizo)	Floor 1 a Floor 5	Active deflection of the beam is not compliant.	Add reinforcements to limit deformation Increase rigidity expanding the section
	0,294	L/473	Joist (P6 - voladizo)	Floor 1 a Floor 5	Active deflection of the joist is not compliant.	
2,10	0,357	L/432	Beam 83 (P1 - voladizo)	Floor 1 a Floor 5	Active deflection of the beam is not compliant.	
	0,312	L/446	Joist (P6 - voladizo)	Floor 1 a Floor 5	Active deflection of the joist is not compliant.	
1,80	0,344	L/448	Beam 83 (P1 - voladizo)	Floor 1 a Floor 5	Active deflection of the beam is not compliant.	
	0,297	L/469	Joist (P6 - voladizo)	Floor 1 a Floor 5	Active deflection of the joist is not compliant.	
1,50	0,330	L/467	Beam 83 (P1 - voladizo)	Floor 1 a Floor 5	Active deflection of the beam is not compliant.	
	0,286	L/487	Joist (P6 - voladizo)	Floor 1 a Floor 5	Active deflection of the joist is not compliant.	
1,30	0,321	L/480	Beam 83 (P1 - voladizo)	Floor 1 a Floor 5	Active deflection of the beam is not compliant.	
1,15	0,314	L/491	Beam 83 (P1 - voladizo)	Floor 1 a Floor 5	Active deflection of the beam is not compliant.	
1,05	0,309	L/499	Beam 83 (P1 - voladizo)	Floor 1 a Floor 5	Active deflection of the beam is not compliant.	
1,00	0,307	L/502	-	-	-	-

Resultados

En el caso de estudio seleccionado, se desarrolló un análisis basado en los principios de diseño de sistemas industrializados, con el objetivo de identificar posibles soluciones que cumplan con los requisitos de peso establecidos. Se dio prioridad a que estas opciones no excedieran los límites definidos en el análisis estructural, garantizando así la viabilidad y seguridad del sistema propuesto. Las soluciones identificadas se detallan en la tabla 4.

Tabla 4. *Prototipos de diseños. Fuente: Elaboración propia.*

SISTEMAS MODULARES INDUSTRIALIZADOS	INICIAL	PROTOTIPOS		
	0	1	2	3
	Modelo Base	Sist. Fachada Panel Sándwich	Sist. Fachada Ventilada	Sist. Fachada SATE
Ancho (m)	0,185	0,143	0,144	0,20
Peso (kg/m²)	45,00	33,03	32,03	30,65

Se realizó una simulación para evaluar las transmitancias térmicas de los diferentes sistemas propuestos para la envolvente del edificio, considerando su composición constructiva. Los resultados obtenidos fueron: 0,23 W/m²K para el prototipo N°1, 0,16 W/m²K para el prototipo N°2 y 0,13 W/m²K para el prototipo N°3. Esta evaluación permitió comparar las soluciones planteadas, todas las cuales cumplen con los valores de transmitancia exigidos por la normativa vigente (DB-HE) [4], respetando los límites establecidos para las distintas zonas climáticas**.**

Finalmente, se realizó un análisis térmico unificado de las distintas propuestas, consolidando los datos y parámetros principales de cada una para ofrecer una visión global del impacto de las intervenciones sobre indicadores clave. Los resultados reflejan una mejora significativa en la eficiencia energética al comparar los prototipos de intervención con el sistema tradicional inicial. En términos de emisiones y consumo de energía primaria, todos los prototipos lograron una recalificación energética de E a D, destacándose por una reducción superior al 30%. Además, en cuanto a la demanda de calefacción, se alcanzó una reducción notable, logrando disminuir más del 60% y pasando de letra E a C, evidenciando el impacto positivo de las soluciones propuestas.

Tabla 5. *Cuadro de resumen de emisiones y consumo energético de la edificación. Fuente: Elaboración propia.*

TIPOLOGÍA		ESTADO INICIAL		PROTOTIPOS							
				1			2			3	
			Sist. Tradicional		Sist. Fachada Panel Sándwich	% Red.		Sist. Fachada Ventilada	% Red.		Sist. Fachada SATE	% Red.
CALIFICACIÓN ENERGÉTICA	Emisiones	E	21,05	D	13,75	34,68	D	13,56	35,58	D	13,46	36,06
	Consumo de energía primaria no renovable	E	101,21	D	66,39	34,40	D	65,47	35,31	D	65,01	35,77
	Demanda de calefacción	E	33,47	C	12,76	61,88	C	12,21	63,52	C	11,93	64,36
	Demanda de refrigeración	B	7,72	B	6,62	14,25	B	6,58	14,77	B	6,59	14,64

Conclusión

- De los prototipos evaluados, el sistema de fachada ventilada con composite de aluminio destacó por su equilibrio entre aspectos técnicos, costo y rendimiento. Aunque ya cumple con el límite de transmitancia térmica (0,37 W/m²K), podría optimizarse con un rediseño y el uso de tecnologías activas para reducir aún más el consumo energético primario y mejorar su recalificación energética.
- Aunque para nuestra investigación se haya establecido una capacidad máxima de 1 kN/m, los edificios requieren de un estudio previo estructural para verificar la compatibilidad con los sistemas industrializados, debido a la variabilidad que presentan las edificaciones antiguas.
- Estas propuestas no solo contribuyen a la eficiencia energética y la sostenibilidad, sino que también agregan valor a un bien inmueble, alineándose al mismo tiempo con las metas ambientales de la Unión Europea.
- La aplicación de estas soluciones mejora la trabajabilidad ya que minimiza los impactos sobre los ocupantes y reduce los tiempos de ejecución.

Results

For the selected case study, an analysis was conducted based on the principles of designing industrialized systems to identify potential solutions that meet the established weight requirements. Priority was given to ensuring that these options did not exceed the limits defined in the structural analysis, thereby guaranteeing the feasibility and safety of the proposed system. The identified solutions are detailed in Table 4.

Table 4. *Design Prototypes. Source: Own elaboration.*

MODULAR SYSTEMS INDUSTRIALIZED	INITIAL	PROTOTYPES		
	0	1	2	3
	Base Model	Syst. Sandwich panel facade	Syst. Ventilated facade	Syst. Facade SATE
Width (m)	0,185	0,143	0,144	0,20
Weight (kg/m²)	45,00	33,03	32,03	30,65

A simulation was conducted to evaluate the thermal transmittances of the different proposed systems for the building envelope, considering their construction composition. The results obtained were: 0.23 W/m²K for prototype No. 1, 0.16 W/m²K for prototype No. 2, and 0.13 W/m²K for prototype No. 3. This evaluation allowed for a comparison of the proposed solutions, all of which meet the transmittance values required by current regulations (DB-HE) [4], adhering to the limits set for the different climatic zones.

Finally, a unified thermal analysis of the different proposals was conducted, consolidating the key data and parameters of each to provide a comprehensive view of the impact of the interventions on key indicators. The results show a significant improvement in energy efficiency when comparing the intervention prototypes with the initial traditional system. In terms of emissions and primary energy consumption, all prototypes achieved an energy recalibration from E to D, with a reduction of over 30%. Additionally, regarding heating demand, a notable reduction was achieved, decreasing by more than 60% and improving from E to C, demonstrating the positive impact of the proposed solutions.

Table 5. *Summary Table of Emissions and Energy Consumption of the Building. Source: Own elaboration.*

	TYPOLOGY	INITIAL STATE		PROTOTYPES							
				1			2			3	
			Syst. Traditional		Syst. Sandwich panel facade	% Red.		Syst. Ventilated facade	% Red.		Syst. Facade SATE	% Red.
RATING ENERGETICS	Emissions	E	21,05	D	13,75	34,68	D	13,56	35,58	D	13,46	36,06
	Non-renewable primary energy consumption	E	101,21	D	66,39	34,40	D	65,47	35,31	D	65,01	35,77
	Heating demand	E	33,47	C	12,76	61,88	C	12,21	63,52	C	11,93	64,36
	Refrigeration demand	B	7,72	B	6,62	14,25	B	6,58	14,77	B	6,59	14,64

Conclusion

- Of the evaluated prototypes, the ventilated facade system with aluminum composite stood out for its balance between technical aspects, cost, and performance. Although it already meets the thermal transmittance limit (0.37 W/m²K), it could be optimized with a redesign and the use of active technologies to further reduce primary energy consumption and improve its energy recalibration.
- Although a maximum capacity of 1 kN/m was established for our research, buildings require a prior structural study to verify compatibility with industrialized systems due to the variability found in older buildings.
- These proposals not only contribute to energy efficiency and sustainability but also add value to a property, while aligning with the European Union's environmental goals.
- The application of these solutions improves workability by minimizing impacts on occupants and reducing execution times.

Bibliografía/Bibliography

[1] CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN, «Seguridad Estructural - DB-SE-AE». Accedido: 25 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/SeguridadEstructural.html

[2] Comisión Europea, «Una ola de renovación para Europa: ecologizar nuestros edificios, crear puestos de trabajo, mejorar vidas.» Accedido: 17 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_20_1835

[3] T. Konstantinou y C. Heesbeen, «Industrialized renovation of the building envelope: realizing the potential to decarbonize the European building stock», en *Rethinking Building Skins: Transformative Technologies and Research Trajectories*, Elsevier, 2021, pp. 257-283. doi: 10.1016/B978-0-12-822477-9.00008-5.

[4] CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN, «Ahorro de energía - DB-HE». Accedido: 30 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.codigotecnico.org/

RECONSTRUCCIÓN DIGITAL DEL ARCO NABATEO BASADA EN LA INTEGRACIÓN DE DATOS 3D, IMÁGENES GRÁFICAS HISTÓRICAS Y FUENTES TEXTUALES, (SITIO DEL PATRIMONIO MUNDIAL DE PETRA, JORDANIA)

DIGITAL RECONSTRUCTION OF THE NABATAEAN ARCH BASED ON THE INTEGRATION OF 3D DATA AND HISTORICAL GRAPHIC IMAGES AND TEXTUAL SOURCES, (PETRA WORLD HERITAGE SITE, JORDAN)

Wang Yang

Participante de la Beca Programa de Cooperación al Desarrollo
Estudiante del Máster en Conservación de Patrimonio Arquitectónico, Universitat Politècnica de València; Camino de s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: ywang25y@arq.upv.es

María José Viñals Blasco
Investigadora en el Centro de investigación de la Arquitectura, el Patrimonio y la Gestión para el Desarrollo Sostenible (PEGASO). Catedrática de Escuela Universitaria, adscrita al Dpto. de Ingeniería Cartográfica Geodesia y Fotogrametría; Universitat Politècnica de València; Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: mvinals @ upv.es

Jorge García Valldecabres
Investigador en el Centro de investigación de la Arquitectura, el Patrimonio y la Gestión para el Desarrollo Sostenible (PEGASO). Profesor Titular de Universidad, adscrito al Dpto. Expresión Gráfica Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València; Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: jgvallde@ega.upv.es

Abstract

Constructed around 100 AD, the Nabataean Arch at the entrance to the Bab as-Siq in Petra was a breathtaking marvel of ancient engineering and design. Tragically, the arch was significantly damaged by an earthquake in 1895, leading to its partial collapse.

This work presents the digital reconstruction of the Nabataean Arch, integrating a variety of data sources, including 3D point cloud data acquired through laser scanning and photogrammetry, historical graphic images, traveler accounts, and architectural studies.

Through the integration of these diverse sources, the digital model offers a highly detailed and accurate representation of the Nabataean Arch, filling in gaps where physical remains no longer exist. The reconstruction provides new insights into the architectural, cultural, and historical significance of the arch, highlighting its role in the urban planning of Petra and its symbolic importance in Nabataean society. The model also serves as a critical tool for conservation, supporting future restoration efforts and preserving this significant piece of heritage.

Keywords
BIM; Heritage; Archaeological element, Petra (Jordan), Nabataean architecture

Introducción

El Arco Nabateo en la entrada del Bab as-Siq de Petra es un impresionante testimonio de la destreza arquitectónica y los logros culturales de la civilización nabatea. Construido alrededor del año 100 a.C., este monumental pórtico no solo cumplía una función estructural, sino que también servía como un umbral ceremonial y simbólico hacia una de las ciudades más icónicas del mundo antiguo. Como parte integral del tejido urbano de Petra, el arco fue diseñado con precisión para integrarse armónicamente con el paisaje circundante, demostrando la creatividad de una sociedad que prosperó en el cruce de rutas comerciales y de intercambio cultural.

Sin embargo, a lo largo de los siglos, el arco ha sufrido los estragos inevitables del tiempo. Un devastador terremoto en 1895 causó daños significativos, provocando su colapso parcial. En la actualidad, solo quedan fragmentos que evocan su antigua grandeza, dejando gran parte de su diseño original y detalles estructurales a la imaginación. A pesar de esta pérdida, el arco sigue siendo un símbolo duradero del legado nabateo y una pieza fundamental de la identidad de Petra como Sitio del Patrimonio Mundial de la UNESCO.

En este contexto, asume el desafío de reconstruir digitalmente el Arco Nabateo, devolviéndolo a la vida a través de un enfoque interdisciplinario. Al integrar diversas fuentes, como documentos históricos, relatos de viajeros, estudios arquitectónicos y tecnologías avanzadas de escaneo 3D, esta investigación busca crear una representación digital fiel del arco. El proyecto no solo contribuye al entendimiento del significado histórico y cultural del arco, sino que también aborda cuestiones críticas sobre el valor de reconstruir sitios patrimoniales, los métodos utilizados en dichos esfuerzos y sus implicaciones para la conservación futura.

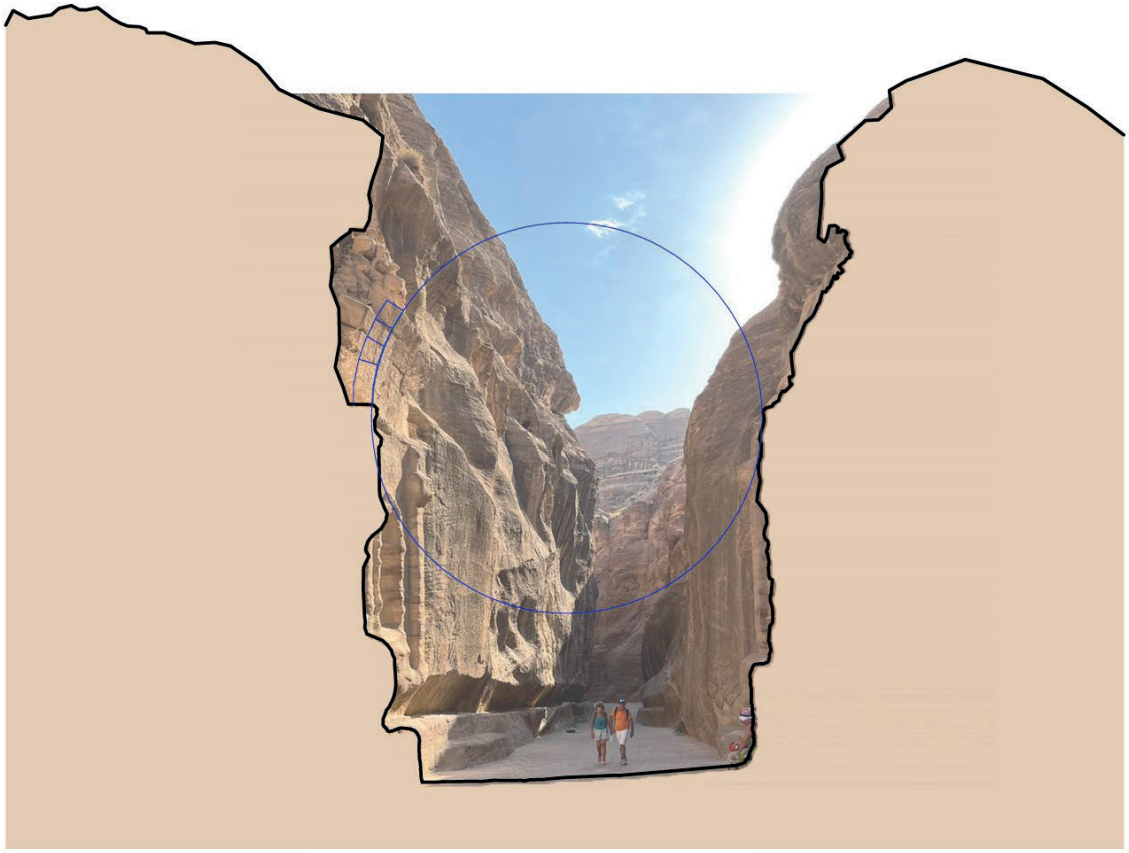


Figura 1: El siq y arco Bab as-Siq

Figure 1: The Siq and arch Bab as-Siq

La descripción

El arco Bab as-Siq es una impresionante estructura arquitectónica que marca la entrada a la antigua ciudad de Petra. Este arco monumental, construido en la roca de arenisca local, se erige como un umbral entre el desierto y el corazón de la ciudad nabatea. Con una altura estimada de 13 metros y un ancho de aproximadamente 8.5 metros, el arco Bab as-Siq se conserva actualmente solo con cinco capas de piedras del arco original, lo que subraya la fragilidad del paso del tiempo sobre este antiguo monumento. A pesar de su deterioro, las capas restantes siguen siendo testimonio de la imponente ingeniería y el diseño sofisticado que caracterizaban a los nabateos. Su construcción, realizada mediante técnicas de mampostería en seco, refleja la destreza y el conocimiento avanzado de los nabateos en ingeniería y arquitectura.

El arco no solo tiene un valor simbólico, sino que también podría haber tenido una función práctica. Algunos historiadores sugieren que, además de su papel como arco triunfal, el arco Bab as-Siq pudo haber formado parte de un sistema de acueductos, contribuyendo a la compleja red de manejo de agua que abastecía a la ciudad. Esta teoría, aunque no confirmada, resalta la conexión entre la arquitectura monumental y las necesidades cotidianas de los habitantes de Petra.

A lo largo del arco, se pueden observar dos nichos decorativos ubicados bajo la bóveda de cañón. Aunque muchos de los detalles ornamentales han desaparecido con el tiempo, se cree que estos nichos albergaban esculturas o pilastras, que daban un toque de lujo y elegancia al monumento. Además, algunos expertos sostienen que estos nichos podrían haber servido para colocar reliquias o ofrendas, añadiendo un componente religioso o ritual al diseño del arco.



Figura 2: El arco resto y ele nicho

Figure 2: The remaining arch and the niche

Introduction

The Nabataean Arch at the Bab as-Siq entrance in Petra stands as a striking testament to the architectural prowess and cultural achievements of the Nabataean civilization. Constructed around 100 BC, this monumental gateway served not only as a functional structure but also as a ceremonial and symbolic threshold to one of the ancient world's most iconic cities. As part of Petra's urban fabric, the arch was intricately designed to harmonize with the surrounding landscape, embodying the ingenuity of a society that flourished at the crossroads of trade and cultural exchange.

Over centuries, however, the arch faced the inevitable ravages of time. A devastating earthquake in 1895 caused significant damage, resulting in its partial collapse. Today, only fragments remain, leaving much of its original design and structural details to the imagination. Despite this loss, the arch remains an enduring symbol of the Nabataean legacy and a vital piece of Petra's identity as a UNESCO World Heritage Site.

This thesis undertakes the challenge of digitally reconstructing the Nabataean Arch, bringing it back to life through an interdisciplinary approach. By integrating diverse sources—such as historical documents, traveler accounts, architectural studies, and state-of-the-art 3D scanning technologies—this research aims to create a faithful digital representation of the arch. The project not only contributes to understanding the arch's historical and cultural significance but also addresses critical questions about the value of reconstructing heritage sites, the methods used in such endeavors, and their implications for future conservation efforts.

Description

The Bab as-Siq is an impressive architectural structure that marks the entrance to the ancient city of Petra. This monumental arch, built into the local sandstone rock, stands as a threshold between the desert and the heart of the Nabataean city. With an estimated height of 13 meters and a width of approximately 8.5 meters, the Bab as-Siq arch is currently preserved with only five layers of stones from the original arch, underlining the fragility of the passage of time on this ancient monument. Despite its deterioration, the remaining layers remain a testament to the imposing engineering and sophisticated design that characterized the Nabataeans. Its construction, carried out using dry masonry techniques, reflects the Nabataeans' advanced skill and knowledge in engineering and architecture.

The arch not only has symbolic value, but could also have had a practical function. Some historians suggest that, in addition to its role as a triumphal arch, the arch Bab as-Siq may have been part of an aqueduct system, contributing to the complex water management network that supplied the city. This theory, although unconfirmed, highlights the connection between monumental architecture and the daily needs of Petra's inhabitants.

Along the arch, two decorative niches can be seen located under the barrel vault. Although many of the ornamental details have disappeared over time, it is believed that these niches housed sculptures or pilaster strips, which gave a touch of luxury and elegance to the monument. In addition, some experts maintain that these niches could have served to place relics or offerings, adding a religious or ritual component to the arch's design.

Justificación

La justificación para estudiar y preservar el arco Bab as-Siq se basa en su enorme valor histórico, cultural y arquitectónico, que lo convierte en un testimonio esencial de la civilización nabatea y su habilidad en ingeniería, arquitectura y gestión del agua. Aunque solo quedan cinco capas de piedra del arco original, cada uno de estos fragmentos es una pieza clave para comprender no solo el diseño de la estructura, sino también las técnicas constructivas de los nabateos, quienes aprovecharon las propiedades de la piedra local para crear una monumental entrada a la ciudad de Petra.

Además, la preservación de este remanente es crucial porque ofrece una ventana única al pasado de una de las civilizaciones más avanzadas de la antigüedad. El arco Bab as-Siq no solo representa una obra maestra arquitectónica, sino también un símbolo de la importancia de Petra como centro comercial, cultural y religioso en el mundo antiguo. La reducción del arco a su estado actual destaca la fragilidad del patrimonio cultural ante las fuerzas de la naturaleza, el paso del tiempo y las intervenciones humanas, lo que subraya la necesidad urgente de conservación.

La conservación de los restos del arco Bab as-Siq también tiene una dimensión simbólica, al representar la resistencia del patrimonio ante las adversidades. El estudio y la documentación digital de las capas restantes, mediante tecnologías como el escaneo 3D, no solo permiten una reconstrucción virtual del monumento, sino que también facilitan futuras estrategias de conservación y protección para preservar lo que queda de este emblema histórico.

Por último, la justificación de preservar el arco Bab as-Siq se extiende a su potencial educativo y turístico. Aunque su deterioro es evidente, el estudio de sus restos sigue siendo esencial para promover el entendimiento del legado nabateo y sensibilizar al público sobre la importancia de la conservación del patrimonio cultural en un contexto global. Conservar y documentar esta estructura no solo es un deber hacia el pasado, sino también una inversión en el futuro, para garantizar que generaciones venideras puedan experimentar y aprender de la riqueza histórica de Petra.

Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es reconstruir digitalmente el Arco Nabateo de Petra mediante la integración de múltiples fuentes de datos históricos, arquitectónicos y digitales. Esto implica la síntesis de datos 3D obtenidos a partir de escaneo láser y fotogrametría, imágenes gráficas históricas, registros escritos y estudios arquitectónicos. El objetivo final es recrear una representación precisa del arco, lo que permite una comprensión más profunda de su forma y significado originales. En concreto, el proyecto pretende:

Mejorar la comprensión arquitectónica

A través del estudio de registros históricos, relatos de viajeros e investigación arqueológica, este proyecto busca mejorar la comprensión de las prácticas arquitectónicas nabateas, en particular en relación con el diseño del arco, las técnicas de construcción y su integración en el paisaje urbano de Petra. Al combinar estudios analógicos con herramientas digitales, el proyecto proporciona nuevos conocimientos sobre la tipología arquitectónica original del arco.

Apoyar los esfuerzos arqueológicos y de conservación

El modelo digital 3D servirá como un recurso valioso para los arqueólogos y conservadores que trabajan en la preservación de Petra. Al proporcionar información estructural detallada, el proyecto apoya posibles iniciativas de restauración y estrategias de conservación destinadas a estabilizar y preservar las partes restantes del arco y las estructuras cercanas.

Integrar datos históricos y tecnológicos

Este proyecto busca demostrar la eficacia de combinar la investigación histórica tradicional (por ejemplo, documentos de archivo, representaciones artísticas y relatos de viajeros) con técnicas digitales modernas (por ejemplo, datos de nubes de puntos, modelado 3D y fotogrametría). La integración de estas diversas fuentes permite una reconstrucción integral que tiene una base histórica y es tecnológicamente avanzada.

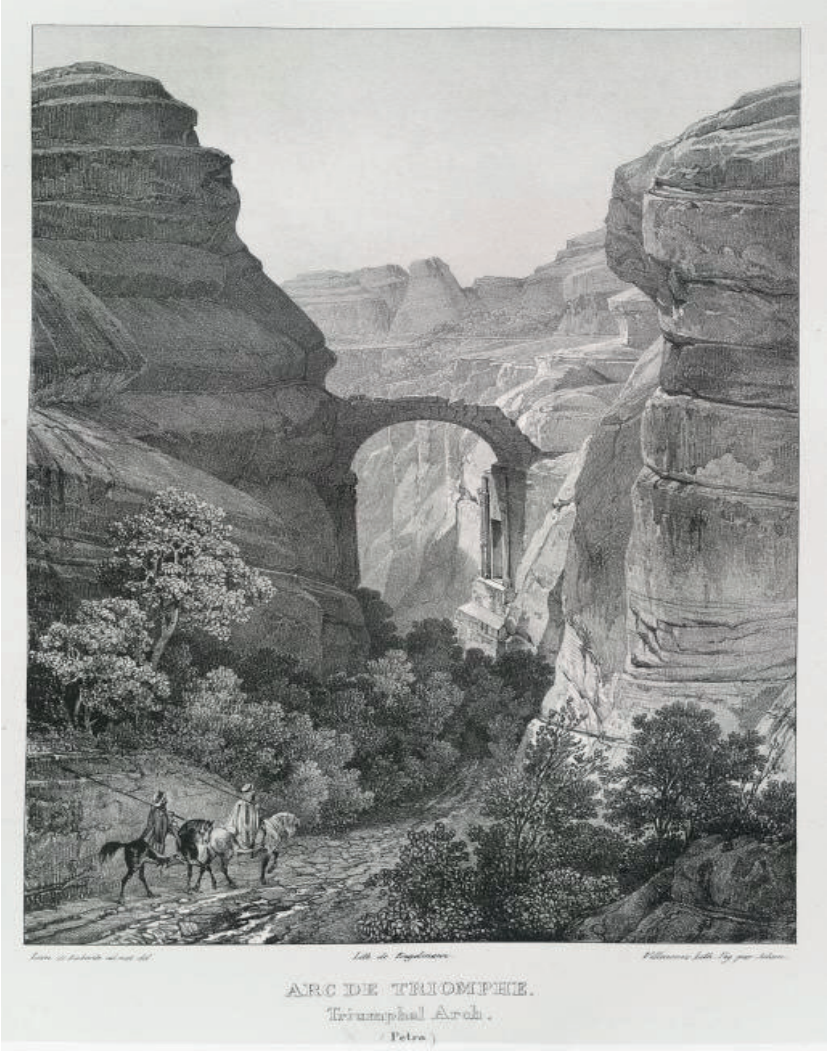


Figura 3: Léon de Laborde, Pintura de la entrada del desfiladero de Petra, 1828.

Figure 3: Léon de Laborde, Painting of the Entrance of the Gorge at Petra, 1828.

Justification

The justification for studying and preserving the arch Bab as-Siq is based on its enormous historical, cultural and architectural value, making it an essential testimony to the Nabataean civilization and its skill in engineering, architecture and water management. Although only five layers of stone remain from the original arch, each of these fragments is a key piece to understanding not only the design of the structure, but also the construction techniques of the Nabataeans, who took advantage of the properties of the local stone to create a monumental entrance to the city of Petra.

Furthermore, the preservation of this remnant is crucial because it offers a unique window into the past of one of the most advanced civilizations of antiquity. The arch Bab as-Siq not only represents an architectural masterpiece, but also a symbol of the importance of Petra as a commercial, cultural and religious center in the ancient world. The reduction of the arch to its current state highlights the fragility of cultural heritage in the face of the forces of nature, the passage of time and human interventions, underlining the urgent need for conservation.

The preservation of the remains of the arch Bab as-Siq also has a symbolic dimension, representing the resilience of heritage in the face of adversity. The study and digital documentation of the remaining layers, using technologies such as 3D scanning, not only allows for a virtual reconstruction of the monument, but also facilitates future conservation and protection strategies to preserve what remains of this historic emblem.

Finally, the justification for preserving the arch Bab as-Siq extends to its educational and tourism potential. Although its deterioration is evident, the study of its remains remains essential to promote understanding of the Nabataean legacy and raise public awareness of the importance of preserving cultural heritage in a global context. Conserving and documenting this structure is not only a duty to the past, but also an investment in the future, to ensure that future generations can experience and learn from the historical richness of Petra.

Objectives

The primary objective of this project is to digitally reconstruct the Nabataean Arch at Petra by integrating multiple sources of historical, architectural, and digital data. This involves synthesizing 3D data obtained from laser scanning and photogrammetry, historical graphic images, written records, and architectural studies. The ultimate goal is to recreate an accurate representation of the arch, enabling a deeper understanding of its original form and significance. Specifically, the project aims to:

Enhance Architectural Understanding

Through the study of historical records, traveler accounts, and archaeological research, this project seeks to enhance the understanding of Nabataean architectural practices, particularly in relation to the arch's design, construction techniques, and its integration within the urban landscape of Petra. By combining analogical studies with digital tools, the project provides new insights into the arch's original architectural typology.

Support Archaeological and Conservation Efforts

The 3D digital model will serve as a valuable resource for archaeologists and conservators working on Petra's preservation. By providing detailed structural information, the project supports potential restoration initiatives and conservation strategies aimed at stabilizing and preserving the remaining portions of the arch and nearby structures.

Integrate Historical and Technological Data

This project seeks to demonstrate the effectiveness of combining traditional historical research (e.g., archival documents, artistic depictions, and traveler accounts) with modern digital techniques (e.g., point cloud data, 3D modeling, and photogrammetry). The integration of these diverse sources allows for a comprehensive reconstruction that is both historically grounded and technologically advanced.

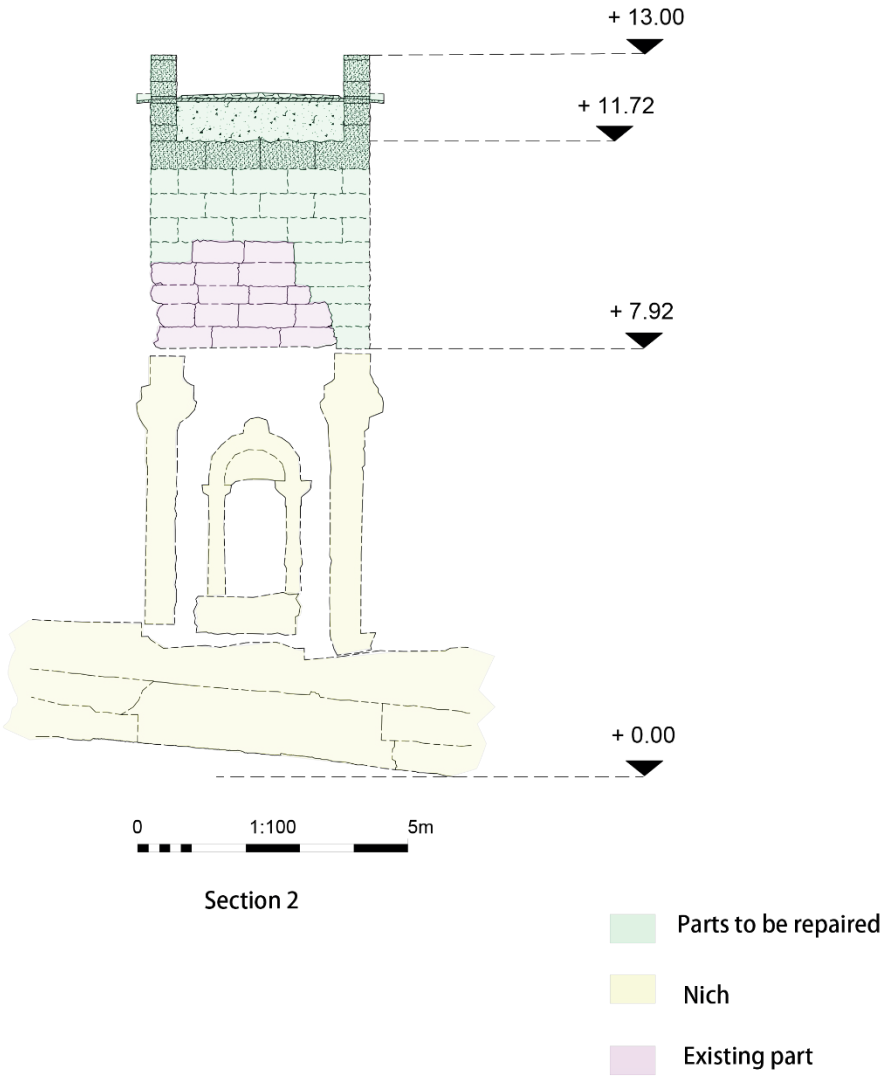


Figura 4: Sección del arco restaurado

Figure 4: Section of the restored arch

Metodología

La metodología para la reconstrucción digital del arco Bab as-Siq se divide en cuatro fases principales, cada una clave para crear una representación precisa y detallada del arco.

En la Fase 1, se obtiene el mesh y la nube de puntos proporcionados por el equipo del Zamani Project, utilizando tecnología avanzada de escaneo 3D. Este paso es esencial para capturar de manera precisa la geometría y los detalles restantes del arco, permitiendo una documentación fiel de la estructura.

En la Fase 2, el mesh obtenido se importa a Rhinoceros, un software de modelado 3D, para generar secciones transversales de la estructura del arco resto y el estado del valle. Estas secciones proporcionan cortes detallados que permiten estudiar las proporciones, la composición interna y las características del arco.

En la Fase 3, las secciones generadas en Rhinoceros se exportan a AutoCAD, donde se crean dibujos 2D precisos del arco. Estos dibujos sirven como base para la siguiente fase y proporcionan una representación detallada de las dimensiones y detalles arquitectónicos del monumento.

Finalmente, en la Fase 4, se utiliza tanto el modelo 2D como la nube de puntos para desarrollar un modelo 3D completo del Bab as-Siq. Esta fase implica la creación de un modelo tridimensional interactivo que simula la apariencia original del arco, permitiendo no solo su visualización sino también su análisis y simulaciones. Esta metodología integral permite reconstruir digitalmente el arco de manera precisa, combinando tecnologías avanzadas con un enfoque riguroso para preservar y estudiar el patrimonio arquitectónico de Petra.

Conclusiones

La reconstrucción digital del arco Bab as-Siq ha permitido avanzar significativamente en la comprensión y conservación de uno de los monumentos más emblemáticos de Petra. A través de la integración de tecnologías avanzadas como el escaneo 3D, el modelado asistido por computadora y el análisis detallado de secciones y dibujos 2D, se ha logrado crear una representación digital precisa del arco. Este proceso no solo preserva la memoria histórica del monumento, sino que también proporciona una herramienta valiosa para futuras investigaciones, restauraciones y la gestión del patrimonio cultural.

Una de las principales conclusiones es la importancia de la digitalización en la conservación del patrimonio, especialmente en sitios vulnerables como Petra, que están expuestos a la erosión natural y los efectos del tiempo. La reconstrucción virtual no solo facilita el estudio detallado de la arquitectura nabatea, sino que también sirve como una herramienta educativa y de sensibilización para el público y las futuras generaciones.

Finalmente, esta metodología demuestra el potencial de la colaboración interdisciplinaria, ya que combina conocimientos de arqueología, ingeniería, arquitectura y tecnología para crear una representación fiel de un monumento histórico. La digitalización del arco Bab as-Siq abre nuevas posibilidades para la conservación, el estudio y la difusión del patrimonio cultural de Petra, destacando la importancia de proteger y valorar estos monumentos en el contexto de su preservación a largo plazo.

Conclusions

The digital reconstruction of the arch Bab as-Siq has made it possible to significantly advance the understanding and conservation of one of the most iconic monuments in Petra. Through the integration of advanced technologies such as 3D scanning, computer-assisted modelling and detailed analysis of 2D sections and drawings, it has been possible to create an accurate digital representation of the arch. This process not only preserves the historical memory of the monument, but also provides a valuable tool for future research, restoration and the management of cultural heritage.

One of the main conclusions is the importance of digitalisation in heritage conservation, especially at vulnerable sites such as Petra, which are exposed to natural erosion and the effects of time. Virtual reconstruction not only facilitates the detailed study of Nabataean architecture, but also serves as an educational and awareness-raising tool for the public and future generations.

Finally, this methodology demonstrates the potential of interdisciplinary collaboration, as it combines knowledge from archaeology, engineering, architecture and technology to create a faithful representation of a historical monument. The digitalization of the arch Bab as-Siq opens up new possibilities for the conservation, study and dissemination of Petra's cultural heritage, highlighting the importance of protecting and valuing these monuments in the context of their long-term preservation.



Figura 5: 3D modelado en Revit del arco restaurado

Figure 5: 3D modeling in Revit of the restored arch

CHAPTER 5

TECHNOLOGY

CAPÍTULO 5 ***TECNOLOGÍA***

ANÁLISIS EN LABORATORIO DE HORMIGONES FABRICADOS CON RESIDUOS DE DEMOLICIÓN

DURABILITY PERFORMANCE OF CONCRETE MADE WITH DEMOLITION WASTE

Josep Ramon Lliso-Ferrando
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Laura Mata-Rodríguez
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valencia, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: laumarod@alumni.upv.es
Architecture School, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: laumarod@alumni.upv.es
Ana Martínez-Ibernón
Investigadora en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Isabel Gasch-Molina
Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: igasch@mes.upv.es
Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: igasch@mes.upv.es
José Manuel Gandía-Romero
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: joganro@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: joganro@csa.upv.es
Manuel Valcuende Payá
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es

Abstract

Reinforced concrete plays an important role in the internal development of countries. Reinforced concrete is central to the construction industry, standing as the most widely used building material in the world, mainly due to its mechanical properties, durability, low cost of raw materials used for its manufacture, or their availability. However, for its manufacture, the reinforced concrete industry relies heavily on aggregates such as sand, gravel, and crushed stone, which are indispensable for its production. However, the extraction and processing of these aggregates has a significant environmental impact, as they lead to the disruption of natural ecosystems, contribute to CO_2 emissions, and require considerable consumption of resources such as water and energy. In addition, the extraction process can lead to soil erosion and habitat loss, exacerbating the negative effects on the environment. This paper presents the laboratory study of different parameters related to concrete durability of mixtures prepared with demolition waste from reinforced concrete constructions. In this case, up to 40% of coarse aggregates were partially replaced.

Keywords
Recycled Concrete, Durability, Porosity, Resistivity, Chloride Induced Corrosion

Introducción

El hormigón armado es el material de construcción más utilizado del mundo (Sandanayake et al. 2020). Entre los principales motivos que justifican este hecho destaca que se trata de un material con unas propiedades mecánicas excelentes. Además, ofrece una buena durabilidad, y existe una gran disponibilidad de las materias primas empleadas para su fabricación, normalmente, con un coste relativamente reducido (Wangler et al. 2019). Junto con todo ello, se debe señalar que se trata de un material que ofrece una gran versatilidad en lo que a diseño se refiere. Esto ha hecho que el hormigón armado se haya convertido en un material fundamental para el crecimiento de la mayoría de los países desarrollados, siendo vital para la construcción de infraestructuras clave (Sakiyama, Lehmann, and Garrecht 2021). Sin embargo, la industria del hormigón armado depende en gran medida de los áridos (arena, grava y piedra triturada), ya que son uno de los componentes básicos de la mezcla.

En los últimos años, este hecho se ha convertido en un aspecto que se debe tener en cuenta debido a todo lo que lleva asociada la extracción y el procesamiento de áridos. Este proceso implica un importante impacto medioambiental, como la alteración de ecosistemas, emisiones de CO_2, y consumo de agua y energía (Collivignarelli et al. 2020). A todo ello se le debe sumar el coste económico que puede implicar, y que en los próximos años está previsto que se incremente debido al descenso en la disponibilidad de este recurso y el incremento de la demanda.

Las últimas estadísticas indican que la demanda de áridos empleados anualmente para la construcción supera los 40 mil millones de toneladas (UN Environment Programme 2019). En lo que a impacto medioambiental se refiere, el proceso de extracción de áridos es una actividad que genera un alto consumo de recursos, especialmente de agua y luz, y emisiones de gases de efecto invernadero. De acuerdo con estudios recientes de la Universidad de Princeton, la producción de hormigón origina más de un 8% de las emisiones de CO_2 que se emiten anualmente. De este porcentaje, según algunos autores (Lollino et al. 2015), prácticamente un 20% corresponden al proceso de extracción y procesamiento de los áridos. Además de esta huella medioambiental, se debe tener en cuenta que la minería de áridos altera considerablemente tanto los ecosistemas acuáticos como terrestres. De hecho, los últimos informes de las Naciones Unidas señalan que en muchos ríos de Asia ya se ha detectado un descenso en la biodiversidad y una alteración notable en los medios de vida de las comunidades locales (UN Environment Programme 2019). A todo ello se le debe sumar el uso excesivo de agua que se requiere para lavar y procesar áridos, crítico sobre todo en regiones con escasez hídrica. Estudios recientes señalan, por ejemplo, que, en la India, el procesamiento de áridos consume más de 1.600 millones de metros cúbicos de agua anualmente.

Por último, algo que se debe tener también en cuenta es el coste económico y la disponibilidad de los áridos. Según Ohemeng y Ekolu (2020), el coste de los áridos representa aproximadamente entre el 30% y el 40% del coste total de producción del hormigón (aunque puede estar sujeto al tipo de árido y ubicación geográfica de estudio). Entre los principales factores que pueden influir en el coste de los áridos, destacan aspectos como la disponibilidad y, por ende, el transporte. La distancia entre canteras y plantas de hormigón preparado son factores críticos que alteran los costes. En áreas donde los áridos de calidad son escasos, los costes de transporte pueden incrementar notablemente el coste total (Bostanci, Limbachiya, and Kew 2018). Por otro lado, en los últimos años han aparecido nuevas normativas sobre extracción y protección ambiental que también han incrementado los costes, particularmente en regiones con estrictas regulaciones de minería, como, por ejemplo, la India (Sreebha and Padmalal 2011). Algunos autores incluso han recopilado datos sobre la variabilidad del coste que supone la utilización de áridos (coste de extracción y de transporte) en diferentes regiones del mundo, tal y como se muestra en la Tabla 1.

Introduction

Reinforced concrete is the most widely used construction material in the world (Sandanayake et al. 2020). One of the main reasons for this is that it is a material with excellent mechanical properties. In addition, it offers good durability, and the raw materials used for its manufacture are widely available, usually at relatively low cost (Wangler et al. 2019). In addition, it should be noted that it is a material that offers great versatility in terms of design. This has made reinforced concrete a key material in most developed countries, being essential for the construction of important infrastructures (Sakiyama, Lehmann, and Garrecht 2021). However, the reinforced concrete industry relies heavily on aggregates (sand, gravel and crushed stone), as they are one of the basic components of the mix.

In recent years, this has become an issue to be considered due to all that is associated with the extraction and processing of aggregates. This process involves a significant environmental impact, such as the alteration of ecosystems, CO_2 emissions, and water and energy consumption (Collivignarelli et al. 2020). To all this must be added the economic cost that may be involved, which is expected to increase in the coming years due to the decrease in the availability of this resource and the increase in demand.

The latest statistics indicate that the demand for aggregates used annually in construction exceeds 40 billion tonnes (UN Environment Programme 2019). In terms of environmental impact, the aggregate extraction process is a resource-intensive activity, especially in terms of water and electricity consumption, and greenhouse gas emissions. According to recent studies by Princeton University, concrete production accounts for more than 8% of annual CO_2 emissions. Based on some authors (Lollino et al. 2015), almost 20% corresponds to the aggregate extraction and treatment process. In addition to this environmental footprint, it should be noted that aggregate quarrying significantly alters both aquatic and terrestrial ecosystems. In fact, recent UN reports indicate that many rivers in Asia have already seen a decline in biodiversity and a significant disruption to the livelihoods of local communities (UN Environment Programme 2019). Added to this is the excessive use of water required to wash and process aggregates, which is critical, especially in water-scarce regions. For example, recent studies in India indicate aggregate processing consumes more than 1.6 billion cubic metres of water annually.

Finally, something that must also be considered is the economic cost and availability of aggregates. According to Ohemeng and Ekolu (2020), the cost of aggregates represents approximately 30% to 40% of the total cost of concrete production (although this may be subjected to the type of aggregate and geographical location of study). Among the main factors that can influence the cost of aggregates are aspects such as availability and hence transport. The distance between quarries and ready-mixed concrete plants is an additional cost. In areas where quality aggregates are scarce, transportation costs can significantly increase the total budget (Bostanci, Limbachiya, and Kew 2018). On the other hand, new regulations on extraction and environmental protection have emerged in recent years that have also increased costs, particularly in regions with strict mining regulations, such as India (Sreebha and Padmalal 2011). Some authors have even compiled data on the variability of the cost of using aggregates (extraction and transport costs) in different regions of the world, as shown in Table 1.

Tabla 1 Coste aproximado de los áridos empleados para hormigón (USD por tonelada).
Table 1 Approximate cost of aggregates used for concrete (USD per ton).

Region/Region	Coste de extracción/ Extraction cost	Coste de transporte/ Transport cost	Total/ Total
América del Norte / North America	7 - 12	5 - 8	12 - 20
Europa / Europe	8 - 15	4 - 9	14 - 24
Asia / Asia	5 - 10	3 - 7	10 - 17
América del Sur / South America	4 - 8	4 - 6	8 - 14

Todo esto ha originado que muchos investigadores hayan puesto el foco en medidas que permitan ahorrar costes y reducir el impacto medioambiental de la extracción de áridos empleados para la fabricación del hormigón. Una de las iniciativas puestas en marcha se centra en la extracción en seco y el uso de tecnologías de separación avanzada (UN Environment Programme 2019). Sin embargo, se encuentra todavía en vías de desarrollo. Otra alternativa mucho más real y actual es la utilización de áridos reciclados, normalmente provenientes de residuos de construcción y demolición, convirtiéndose estos en una alternativa sostenible. De hecho, el Código Estructural (aprobado en 2021) en España (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022), en el Artículo 30.8 recoge la posibilidad de emplear áridos reciclados para la fabricación de hormigón estructural, siendo esta una de las principales novedades respecto a la normativa anterior. En este artículo se señala que el término "árido reciclado" hace referencia al árido obtenido como producto de una operación de reciclado de residuos de hormigón (hormigón sano, en el que no se ha detectado la presencia de agentes que puedan afectar a la durabilidad del material, como sulfatos, álcalis u hormigones especiales tales como aluminoso, con fibras, o con polímeros). La normativa también indica que, para su aplicación en hormigón estructural, no se contemplan porcentajes de sustitución superiores al 20% en peso sobre el contenido total de árido grueso. Sin embargo, abre la posibilidad de incrementar este porcentaje tras realizar estudios específicos y ensayos complementarios para cada aplicación, debiéndose aprobar por la Dirección Facultativa antes de ser implementado en obra. Por otro lado, también se señala que la resistencia característica de proyecto en el caso de emplear áridos reciclados será inferior a 40 MPa y nunca se podrá implementar para la ejecución de elementos de hormigón pretensado.

Esto abre la posibilidad en España de utilizar métodos para reducir el consumo de áridos. Sin embargo, su implementación a nivel extenso se encuentra todavía muy limitada debido a la falta de estudios que permitan demostrar la validez de esta alternativa. Debido a esto, en este trabajo se presenta un estudio en el que se analiza la durabilidad de hormigones fabricados con porcentajes de sustitución del árido grueso del 20% (acorde a la normativa) y del 40% (doble a lo permitido en norma), por residuos de hormigón de distintas calidades. Los resultados se comparan con una mezcla de referencia en el que no se ha realizado ningún tipo de sustitución del árido grueso.

Plan Experimental

Materiales y Métodos de Ensayo

En este estudio, y debido a la necesidad de conocer las propiedades de los residuos empleados para sustituir parcialmente el árido grueso en el hormigón, en primer lugar, se fabricaron dos hormigones con distintas propiedades, cuya dosificación se recoge en la Tabla 2. En este caso, se realizó una mezcla con una relación agua/cemento de 0,8 y otra con una relación de 0,6. Para su fabricación se utilizó un CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R, y como áridos, una arena caliza 0/4 y grava caliza 4/20. Para conseguir una trabajabilidad adecuada, en ambas dosificaciones se utilizó un aditivo superplastificante (Sika ViscoCrete-20HE) en un contenido del 1% respecto al peso de cemento.

Tabla 2. Dosificaciones base para la obtención de material reciclado (kg/m^3).
Table 2. Dosages for obtaining recycled material (kg/m^3).

	Hormigón 0,6/ Concrete type 0,6	Hormigón 0,8/ Concrete type 0,8
Relación agua/cemento / Water/cement ratio	0.6	0.8
Cemento / Cement	306	230
Agua / Water	180	180
Superplastificante / Superplasticizer	3.06	2.30
Arena 0/4 / Sand 0/4	1231	1231
Grava 4/20 / Gravel 4/20	740	740

En total se fabricaron 14 litros por cada hormigón (probetas cilíndricas), curadas en cámara (20±2ºC y H.R.>90%). A los 28 días, las probetas fueron sometidas a un proceso de trituración mecánica y manual para obtener partículas con tamaños entre 4 y 20 mm que puedan sustituir la grava de un hormigón convencional. En la Imagen 1 se muestran imágenes de todo el proceso.

This has led many researchers to focus on cost-saving measures to reduce the environmental impact of the extraction of aggregates used in the manufacture of concrete. One such initiative focuses on dry extraction and the use of advanced separation technologies (UN Environment Programme 2019). However, it is still under development. Another current alternative is the use of recycled aggregates, usually from construction and demolition waste, making them a sustainable alternative. In fact, the Structural Code (approved in 2021) in Spain (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022), in Article 30.8, includes the possibility of using recycled aggregates for the manufacture of structural concrete, this being one of the main novelties with respect to the previous regulations. This article states that the term 'recycled aggregate' refers to the aggregate obtained as a product of a concrete waste recycling operation (healthy concrete, in which the presence of agents that could affect the durability of the material, such as sulphates, alkalis or special concretes such as aluminous, with fibres, or with polymers, has not been detected). The regulations also indicate that, for its application in structural concrete, substitution percentages of more than 20% by weight of the total coarse aggregate content are not contemplated. However, this percentage may be increased after specific studies and complementary experimentation in each application. It must be approved by the project management before being implemented on site. On the other hand, it is also pointed out that the characteristic resistance of the project in the case of using recycled aggregates will be less than 40 MPa and can never be implemented for prestressed concrete elements.

This opens the possibility of implementing methods to reduce aggregate consumption in Spain. However, its widespread implementation is still very limited due to the lack of studies to demonstrate the validity of this alternative. According to this, the paper presents a study in which the durability of concretes manufactured with a coarse aggregate substitution percentage of 20% (in accordance with the regulations) and 40% (double that permitted by the regulations) is analysed, using reinforced concrete waste of different qualities. The results are compared with a reference mix in which no type of coarse aggregate replacement has been carried out.

Experimental Plan

Materials and Methods

In this study, and due to the need to know the properties of the waste used to partially replace the coarse aggregate in the concrete, firstly, two concretes with different properties were produced. The dosages are shown in Table 2. In this case, a mixture was made with a water/cement ratio of 0.8 and another with a 0.6 ratio. A CEM II/B-M (S-LL) 42.5 R was used for the manufacture, and 0/4 limestone sand, and 4/20 limestone gravel were used as aggregates. To achieve adequate workability, a superplasticizer additive (Sika ViscoCrete-20HE) was used in both dosages (content: 1% of the weight of cement).

A total of 14 litres per concrete (cylindrical specimens) were produced. During the first 24 hours the concretes were kept in their moulds, but once demoulded, the specimens were transferred to a curing chamber (20±2ºC and R.H.>90%), where they remained for 28 days. At that age, the specimens were subjected to a mechanic and manual crushing process to obtain particles with sizes between 4 and 20 mm that can replace the gravel of a conventional concrete. Image 1 shows pictures of the entire process, from the manufacture of the concrete to the obtaining of the crushed waste.



Imagen 1. Proceso de triturado del hormigón. Image 1. Concrete crushing process.

La sustitución de árido grueso por los residuos de demolición generados se realizó sobre un nuevo hormigón fabricado (relación agua/cemento 0,6), cuya dosificación se recoge en la Tabla 3. Para la fabricación del hormigón se utilizó de nuevo un CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R, mientras que como áridos se utilizó también una arena caliza 0/4 y una grava caliza 4/20. Para conseguir una trabajabilidad adecuada, en ambas dosificaciones se utilizó un aditivo superplastificante (Sika ViscoCrete-20HE) en un contenido del 0,5% respecto al peso de cemento. A partir de la dosificación base se fabricaron 4 nuevas mezclas, sustituyendo la grava en un porcentaje del 20% y del 40% por los restos de demolición generados, distinguiendo los obtenidos de un hormigón con una relación agua/cemento 0,6 y otro de menor calidad, con una relación agua/cemento 0,8. La nomenclatura utilizada se corresponde al hormigón de referencia (Ref) y el resto de las mezclas al origen del residuo (relación agua/cemento) y el porcentaje de sustitución.

Tabla 3. Dosificaciones fabricadas (kg/m^3).
Table 3. Manufactured dosages (kg/m^3).

	Ref	AR/0.6 -20%	AR/0.6 -40%	AR/0.8 -20%	AR/0.8 -40%
Relación agua/cemento / Water/cement ratio	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
Cemento / Cement	320.00	320.00	320.00	320.00	320.00
Agua / Water	192.00	192.00	192.00	192.00	192.00
Superplastificante / Superplasticizer	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60
Arena 0/4 / Sand 0/4	1160.85	1160.85	1160.85	1160.85	1160.85
Grava 4/20 / Gravel 4/20	773.25	618.60	463.95	618.60	463.95
Grava Reciclada / Recycled Gravel	-	154.65	309.30	154.65	309.30

Con cada una de las mezclas presentadas en la Tabla 3 se fabricaron las probetas necesarias para realizar los ensayos previstos (en total, 12 litros por mezcla). Las probetas fueron mantenidas en sus moldes durante las primeras 48 horas, protegidas con plásticos. Transcurrido ese tiempo, las probetas fueron desmoldadas y almacenadas en cámara de curado (20±2ºC y H.R.>90%) hasta la edad de 28 días, cuando fueron extraídas y se realizaron los ensayos definidos en la Tabla 4. En la Imagen 2 se incluyen algunas fotografías de los ensayos realizados.

Tabla 4. Ensayos realizados, normativa y número de probetas y geometría.
Table 4. Performed tests, standard tests and test specimens.

	Método de ensayo/ Standard test method	Probetas/ Test specimens
Resistencia a compresión / Compressive strength	UNE-EN 12390-3: 2020	2x(Ø100x200 mm)
Porosidad accessible al agua / Porosity accessible to water	UNE 83980: 2014	3x(100x100x50 mm)
Resistencia a la carbonatación / Carbonation resistance	UNE-EN 12390-10: 2019	1x(100x100x400 mm)
Coeficiente de difusión de cloruros (migración)/ Non-steady state migration coefficient	UNE-EN 12390-18: 2021	3x(Ø100x200 mm)
Resistividad eléctrica / Electrical resistivity	UNE-EN 12390-19: 2023	3x(100x100x50 mm)

Resultados

En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados. Además, se incluyen entre paréntesis los coeficientes de variación (CV) obtenidos. Los resultados arrojados permiten apreciar diferentes aspectos que se deben tener en cuenta a la hora de sustituir árido grueso por residuos de demolición de estructuras de hormigón armado:

The replacement of coarse aggregate by the demolition waste generated was carried out on a new manufactured concrete (water/cement ratio 0.6), the dosage of which is shown in Table 3. A CEM II/B-M (S-LL) 42.5 R was again used for the manufacture of the concrete, while 0/4 limestone sand and 4/20 limestone gravel were also used as aggregates. To achieve adequate workability, a superplasticizer additive (Sika ViscoCrete-20HE) was used in both dosages at a content of 0.5% by weight of cement. From the base dosage, 4 new mixes were manufactured, replacing the gravel in a percentage of 20% and 40% with the demolition waste generated, distinguishing between those obtained from a concrete with a water/cement ratio of 0.6 and another of lower quality, with a water/cement ratio of 0.8. The naming used corresponds to the reference concrete (Ref) and the rest of the mixtures to the origin of the waste (water/cement ratio) and the percentage of substitution.

Each mixture presented in Table 3 was used to cast the test specimens necessary to carry out the planned tests (a total of 12 litres per mixture). The test specimens were kept in their moulds for the first 48 hours, protected with plastic sheeting. After this time, the specimens were demoulded and stored in a curing chamber (20±2ºC and R.H. >90%) until the age of 28 days, when they were removed and the tests defined in Table 4 were performed.

Some photographs of the tests carried out are shown in Image 2.



Imagen 2. Métodos de ensayo. Image 2. Test methods.

Results

Table 5 shows the results obtained in each of the tests carried out. In addition, the coefficients of variation (CV) obtained are included in brackets.

The results obtained show different aspects to be considered when substituting coarse aggregate for demolition waste in reinforced concrete structures:

- compressive strength: a 10% to 20% decrease in compressive strength is observed when using waste from poor quality concrete;

Tabla 5. Resultados (y coeficientes de variación, CV).
Table 5. Results (and Coefficient of Variation, CoV).

	Ref	AR/0. 6-20%	AR/0. 6-40%	AR/0. 8-20%	AR/0. 8-40%
Resistencia a compresión (MPa) / Compressive strength (MPa)	40,01 (0,70)	40,35 (0,44)	43,01 (1,52)	37,61 (4,35)	35,62 (2,03)
Porosidad accesible al agua (%) / Porosity accessible to water (%)	15,30 (0,22)	15,10 (0,19)	15,75 (0,27)	14,32 (0,22)	16,03 (0,19)
Resistencia a la carbonatación (mm/día) / Carbonation resistance (mm/day)	1,63	1,77	1,70	1,63	1,57
Coeficiente de difusión de cloruros ($x10^{-12}$ m^2/s) / Non-steady state migration coefficient ($x10^{-12}$ m^2/s)	14,16 (1,49)	19,42 (2,89)	17,52 (4,49)	17,46 (1,71)	20,80 (1,37)
Resistividad eléctrica (Ωm) / Electrical resistivity (Ωm)	60,92 (0,80)	55,46 (0,62)	50,66 (0,31)	53,54 (1,22)	53,83 (0,81)

- resistencia a compresión: se aprecia una merma de entre un 10% y un 20% en la resistencia a compresión cuando se utilizan residuos que provienen de hormigones de mala calidad;
- porosidad accesible al agua: se trata de un parámetro clave en la durabilidad del material, ya que condiciona la facilidad con la que agentes agresivos pueden penetrar a través del hormigón. Los resultados demostraron un descenso de entre el 2% y 3% cuando se incluía un porcentaje de sustitución del 20%, independientemente del hormigón de origen de los residuos. Para porcentajes más altos se apreció un incremento de la porosidad próximo al 5%;
- resistencia a la carbonatación: en todas las mezclas analizadas la velocidad de carbonatación es prácticamente idéntica;
- resistencia a la difusión de cloruros: los hormigones con incorporación de residuos de demolición como sustituto parcial del árido más grueso demostraron una mayor permeabilidad a los cloruros, condicionando la durabilidad del material. Los cloruros son precursores de la corrosión de las armaduras embebidas, una de las principales causas de pérdida de durabilidad en estructuras de hormigón armado (Penttala 2009);
- resistividad eléctrica: se trata de un parámetro clave, ya que condiciona la intensidad con la que los procesos de corrosión se pueden desarrollar en las estructuras de hormigón armado (Lliso-Ferrando et al. 2023). En este caso, se puede apreciar como la inclusión de residuo de demoliciones disminuye la resistencia eléctrica entre un 10% y un 20% lo que condiciona la durabilidad de las mezclas.

Como resumen, se debe señalar también que en la mayoría de las propiedades estudiadas, los resultados obtenidos muestran en todas las mezcla una durabilidad media-baja, de acuerdo con los límites establecidos por autores como Wang et al. (2014). En este caso no se trata de una merma originada por la utilización de residuos de demolición, sino por el tipo de hormigón con el que se ha trabajado, donde se debe recordar, se utilizó una relación agua/cemento 0,6.

Conclusiones

Este estudio ha permitido demostrar que la utilización de residuos provenientes de demoliciones de construcciones de hormigón armado es una alternativa real para reducir el consumo de áridos, en este caso gravas, para la producción de hormigón. Sin embargo, se deben tener en cuenta dos aspectos claves:

- el hormigón producido puede presentar una merma en la durabilidad, sobre todo, un descenso significativo en la resistencia a la penetración de cloruros, de acuerdo con los ensayos realizados;
- por otro lado, las características del hormigón que origina los residuos que se emplearán para sustituir el árido grueso pueden condicionar las propiedades del nuevo hormigón, por lo que se deberán hacer ensayos previos de las construcciones que serán demolidas para asegurar unos mínimos que garanticen propiedades adecuadas en los nuevos hormigones.

- porosity accessible to water: this is a key parameter in the durability of the material, as it conditions the ease with which aggressive agents can penetrate through the concrete. The results showed a decrease of between 2% and 3% when a replacement percentage of 20% was included, irrespective of the concrete of origin of the waste. For higher percentages, an increase in porosity of about 5% was observed;
- carbonation resistance: in all the mixes analysed, the rate of carbonation is practically identical;
- resistance to chloride diffusion: concretes including demolition waste as a partial substitute of the coarse aggregate showed a higher permeability to chlorides, conditioning the durability of the material. Chlorides are precursors of corrosion of embedded reinforcement, one of the main causes of loss of durability in reinforced concrete structures (Penttala 2009);
- electrical resistivity: this is a key parameter, as it conditions the intensity with which corrosion processes can develop in reinforced concrete structures (Lliso-Ferrando et al. 2023). In this case, using demolition waste reduces the electrical resistance by between 10% and 20%, which is related with the durability of the mixes.

As a summary, it should also be noted that in most of the properties studied, the results obtained show a medium-low durability in all the mixes, in accordance with the limits established by authors such as Wang et al. (2014). In this case, this is not a decrease due to the use of demolition waste, but to the type of concrete used, where it should be remembered that a water/cement ratio of 0.6 was used.

Conclusions

This study has shown that the use of waste from demolition of reinforced concrete constructions is a real alternative to reduce the consumption of aggregates to produce concrete, in this case gravel. However, two key aspects must be considered:

- the concrete produced may show minor durability, in particular a significant decrease in resistance to chloride penetration, according to the tests carried out;
- on the other hand, the characteristics of the concrete that originates from the waste that will be used to replace the coarse aggregate may condition the properties of the new concrete, so that prior tests must be carried out on the constructions that will be demolished to ensure minimum standards that guarantee adequate properties in the new concrete.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- Bostanci, Sevket Can, Mukesh Limbachiya, and Hsein Kew. 2018. "Use of Recycled Aggregates for Low Carbon and Cost Effective Concrete Construction." *Journal of Cleaner Production* 189 (2018): 176–96. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.090.
- Collivignarelli, Maria Cristina, Giacomo Cillari, Paola Ricciardi, Marco Carnevale Miino, Vincenzo Torretta, Elena Cristina Rada, and Alessandro Abbà. 2020. "The Production of Sustainable Concrete with the Use of Alternative Aggregates: A Review." *Sustainability (Switzerland)* 12 (19): 1–34. https://doi.org/10.3390/SU12197903.
- Lliso-Ferrando, J.R., I. Gasch, A. Martínez-Ibernón, and M. Valcuende. 2023. "Macrocell Corrosion Currents in Simulated Concrete Pore Solution and Reinforced Concrete." *International Journal of Concrete Structures and Materials* 17 (15). https://doi.org/10.1186/s40069-022-00576-y.
- Lollino, Giorgio, Andrea Manconi, Fausto Guzzetti, Martin Culshaw, Peter Bobrowsky, and Fabio Luino. 2015. "Engineering Geology for Society and Territory – Volume 5: Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation." *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5: Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation* 5: 1–1400. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09048-1.
- Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España. 2022. *Código Estructural*.
- Ohemeng, Eric A., and Stephen O. Ekolu. 2020. "Comparative Analysis on Costs and Benefits of Producing Natural and Recycled Concrete Aggregates: A South African Case Study." *Case Studies in Construction Materials* 13: e00450. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00450.
- Penttala, V. 2009. *Causes and Mechanisms of Deterioration in Reinforced Concrete*. *Failure, Distress and Repair of Concrete Structures*. Woodhead Publishing Limited. https://doi.org/10.1533/9781845697037.1.3.
- Sakiyama, Felipe Isamu Harger, Frank Lehmann, and Harald Garrecht. 2021. "Structural Health Monitoring of Concrete Structures Using Fibre-Optic-Based Sensors: A Review." *Magazine of Concrete Research* 73 (4): 174–94. https://doi.org/10.1680/jmacr.19.00185.
- Sandanayake, Malindu, Yanni Bouras, Robert Haigh, and Zora Vrcelj. 2020. "Current Sustainable Trends of Using Waste Materials in Concrete—a Decade Review." *Sustainability (Switzerland)* 12 (22): 1–38. https://doi.org/10.3390/su12229622.
- Sreebha, Sreedharan, and Damodaran Padmalal. 2011. "Environmental Impact Assessment of Sand Mining from the Small Catchment Rivers in the Southwestern Coast of India: A Case Study." *Environmental Management* 47 (1): 130–40. https://doi.org/10.1007/s00267-010-9571-6.
- UN Environment Programme. 2019. "Sand and Sustainability : Finding New Solutions for Environmental Governance of Global Sand Resources." *UN Environment Programme*, 35. https://archive-ouverte.unige.ch/unige:117767.
- Wang, Wei, Jian Liu, Franck Agostini, Catherine A. Davy, Frédéric Skoczylas, and Dominique Corvez. 2014. "Durability of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) under Progressive Aging." *Cement and Concrete Research* 55: 1–13. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.09.008.
- Wangler, Timothy, Nicolas Roussel, Freek P. Bos, Theo A.M. Salet, and Robert J. Flatt. 2019. "Digital Concrete: A Review." *Cement and Concrete Research* 123 (May). https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105780.

INFLUENCIA DEL CURADO EN LA DURABILIDAD DEL HORMIGÓN ARMADO. PARTE 1. CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN

CURING CONDITIONS INFLUENCE ON THE DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE. PART 1. CONCRETE CHARACTERISATION

Josep Ramon Lliso-Ferrando
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Ana Martínez-Ibernón
Investigadora en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Pablo Monzón-Bello
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: pabmonb1@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. E-mail: pabmonb1@csa.upv.es
Isabel Gasch-Molina
Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: igasch@mes.upv.es
Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: igasch@mes.upv.es
José Manuel Gandía-Romero
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: joganro@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: joganro@csa.upv.es
Manuel Valcuende Payá
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es

Abstract

Curing conditions directly influence the durability and ultimate strength of concrete. Proper curing controls moisture loss and promotes cement hydration, which improves compaction of the cementitious matrix and impacts on steel-concrete bond. However, inadequate curing practices can result in increased porosity, especially in the outermost layers, which facilitates the entry of aggressive agents. This can lead to reduced durability of reinforced concrete structures and constructions. In this two-part study, a characterisation work of three concretes produced with different water/cement ratios (0.85, 0.65 and 0.45) is presented. For each dosage, two batches were produced, one cured under optimum conditions (curing chamber 20±2ºC and Relative Humidity higher than 90%) and the other without any treatment. This first part contains the results obtained from the characterisation tests carried out. The second part of the study covers the corrosion monitoring work of reinforced concrete specimens subjected to different exposure environments (XS2 and XS3).

Keywords
Concrete, Curing Conditions, Durability, Laboratory Characterisation

Introducción

El hormigón armado es el material de construcción más utilizado del mundo (Gagg 2014). Entre los motivos más destacados que han llevado a alcanzar esta situación destacan la excelente respuesta mecánica que el material ofrece y su durabilidad (Neville 2001). Sin embargo, una puesta en obra deficiente puede condicionar el rendimiento del material a largo plazo, siendo el curado del hormigón uno de los aspectos que más se debe tener en cuenta.

El curado del hormigón es un proceso clave que influye directamente en la durabilidad y resistencia final del material, especialmente en aplicaciones en las que se trata de hormigón armado. Se trata de un proceso centrado en mantener las condiciones de humedad y temperatura adecuadas tras la fabricación del hormigón, generalmente hasta los 7 o 28 días. Esto permite asegurar un endurecimiento adecuado, pero también evitar la desecación del material o problemas de retracción (Han and Zhang 2018). El curado adecuado controla la pérdida de humedad y promueve la hidratación del cemento, lo que mejora la compactación de la matriz cementante y la adherencia de las armaduras (Wasserman and Bentur 2013). Sin embargo, prácticas inadecuadas de curado pueden resultar en una porosidad mayor, lo que facilita la entrada de agentes agresivos que pueden acelerar la degradación del material o favorecer la aparición de procesos de corrosión sobre las armaduras embebidas en un corto periodo de tiempo.

Actualmente, son varios los procedimientos empleados para llevar a cabo un curado adecuado del hormigón. En laboratorio, y por facilidad, lo más habitual es servirse del almacenamiento del hormigón en cámaras de curado, cuya temperatura se mantiene constante en 20-25ºC, mientras que la humedad relativa es alta, normalmente por encima del 90-95%. Esto permite evitar la pérdida excesiva de agua los primeros días tras la fabricación del hormigón. En obra, este proceso es mucho más complejo de llevar a cabo, por lo que se recurre a otros métodos, como la utilización de protecciones superficiales, la humectación constante de las superficies o la utilización de láminas o productos que generen una capa que evite la evaporación de agua tras el amasado. En la Imagen 1 se recogen varias imágenes de algunos de estos procesos.

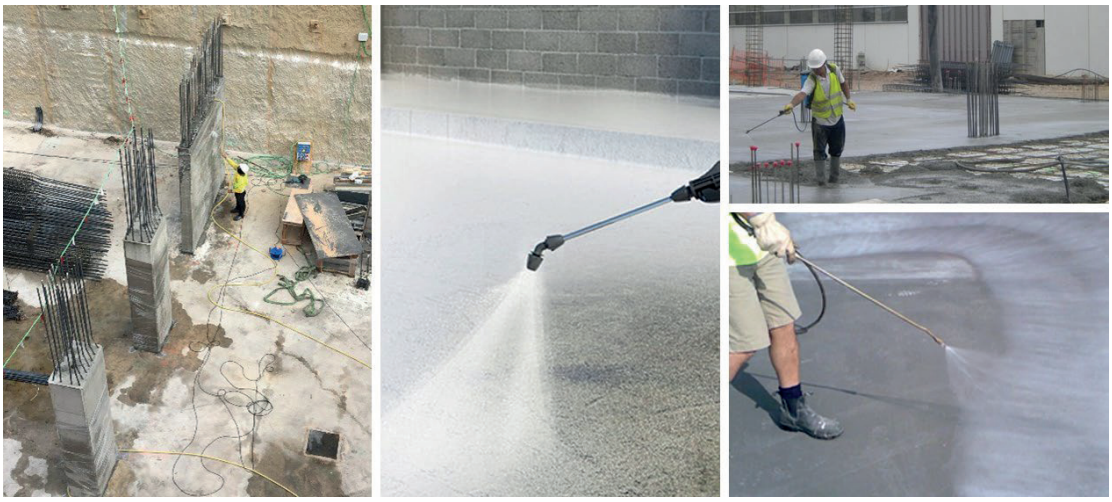


Imagen 1. Procesos de curado. Image 1. Curing processes.

Algunos autores han centrado sus esfuerzos en analizar estos aspectos y la influencia que un curado adecuado o inadecuado puede tener en las propiedades del material, tanto a corto como a largo plazo. Por ejemplo, Paulík (2013) demostró cómo un curado inadecuado, como puede ser el endurecimiento en condiciones atmosféricas (20ºC), puede suponer una merma de más del 10% de la resistencia del material respecto a probetas idénticas pero con un curado en cámara húmeda (temperatura de 20ºC pero humedad relativa superior al 95%). En este caso, el estudio se centró sobre hormigones convencionales y de altas prestaciones. Otros autores como Atis et al. detectaron esto, pero centrando su estudio en muestras con fabricadas con adiciones, en este caso, humo de sílice (Atiş et al. 2005). En este caso, los autores señalaron que la merma de la resistencia puede agudizarse cuando se utilizan adiciones, alcanzado a suponer un descenso de más de un 20%.

Introduction

Reinforced concrete is the most widely used construction material in the world (Gagg 2014). Among the most important reasons that have led to this status are the excellent mechanical response of the material and its durability (Neville 2001). However, poor installation can affect the long-term performance of the material, with concrete curing being one of the most important aspects to be considered.

Curing conditions directly influence the durability and final strength of the concrete, especially in reinforced concrete applications. It is a process focused on maintaining the right humidity and temperature conditions after the manufacture of the concrete, generally up to 7 or 28 days. This ensures proper hardening, but also avoids drying out of the material or shrinkage problems (Han and Zhang 2018). Proper curing controls moisture loss and promotes cement hydration, which improves compaction of the cementitious matrix and bonding concrete-rebar (Wasserman and Bentur 2013). However, inadequate curing practices can result in increased porosity, which facilitates the entry of aggressive agents that can accelerate material degradation or favour the appearance of corrosion processes on embedded reinforcement in a short period of time.

Currently, there are several procedures used to carry out an adequate concrete curing. Under laboratory conditions, and for ease of use, the most common procedure consists of the concrete specimens storage in curing chambers, whose temperature is kept constant at 20-25ºC, while the relative humidity is high, normally above 90-95%. This avoids excessive water loss in the first few days after the concrete has been manufactured. On site, this process is much more complex to carry out, so other methods are used, such as the use of surface protection, constant wetting of the surfaces or the use of sheets or products that generate a layer that prevents the evaporation of water after the mixture process. Image 1 shows several images of some of these processes.

Some authors have centred their efforts on analysing these aspects and the influence that adequate or inadequate curing can have on material properties, both in the short and long term. For example, Paulík (2013) showed inadequate curing processes, such as curing in atmospheric conditions (20ºC), can lead to a decrease of more than 10% in the strength of the material compared to identical specimens cured in a humid chamber (temperature of 20ºC but relative humidity of more than 95%). In this case, the study focused on ordinary and high-performance concretes. Other authors such as Atis et al. detected this but focused their study on samples with silica fume incorporation as addition (Atiş et al. 2005). In this case, the authors pointed out that the decrease in strength can be exacerbated when additions are used, reaching a decrease of more than 20% of compressive strength.

Other authors have focused their studies on properties directly related to durability. For example, Chen et al. observed increases of between 5% and 15% in the porosity accessible to water of blast furnace slag mixes when they were improperly cured, in this case, exposed to atmospheric conditions (Chen et al. 2012). On the other hand, Poon et al. observed a decrease in the resistance to chloride diffusion in concretes and mortars with fly ash addition. In tests carried out at different depths, they observed chloride contents up to three times higher in air-cured samples (15ºC) compared to water-cured samples, both at 28 days and 90 days (Poon, Wong, and Lam 1997). Other authors, such as Kim et al. also analysed the influence of curing on the durability of concrete, in this case, by analysing the resistance to carbonation. These authors focused on analysing samples without additions but verified the influence of curing as a function of the hours of sun exposure and wind speed affecting the specimens (Kim et al. 2017).

As can be seen, there are numerous works in the literature that have studied the relationship between curing conditions and hardened material properties, especially compressive strength and durability-related parameters such as porosity accessible to water, resistance to chloride diffusion or carbonation resistance. However, there is a great deal of casuistry between studies. Each author focuses his study on a specific dosage, with different types of additions (silica fume, fly ash, blast furnace slag) or with different curing conditions (temperature, humidity, hours of sun exposure, weather and wind). Moreover, each study centres in one/two properties; there is no cross-sectional study that groups different parameters at the same time. This makes it difficult for other authors to carry out comparative studies.

Otros autores han centrado sus estudios en propiedades directamente relacionadas con la durabilidad. Por ejemplo, Chen et al. observaron incrementos de entre el 5% y el 15% en la porosidad accesible al agua de mezclas con escoria de alto horno cuando estas eran curadas de manera inadecuada, en este caso, expuestas a la intemperie (Chen et al. 2012). Por otro lado, Poon et al. observaron una reducción en la resistencia a la penetración de cloruros en hormigones y morteros con adición de ceniza volante. En ensayos llevados a cabo a diferentes profundidades, observaron contenidos de cloruros hasta tres veces más altos en muestras curadas al aire (15ºC) frente a muestras curadas en agua, tanto a 28 días como a 90 días (Poon, Wong, and Lam 1997). Otros autores, como Kim et al. también analizaron la influencia del curado en la durabilidad del hormigón, en este caso, analizando la resistencia a la carbonatación. Estos autores se centraron en analizar muestras sin adiciones, pero verificando la influencia del curado en función de las horas de exposición solar y la velocidad del viento que afectaba a las probetas (Kim et al. 2017).

Como se puede ver, existen numerosos trabajos en bibliografía que han estudiado la relación que existe entre las condiciones de curado y las propiedades del material endurecido, sobre todo, resistencia a compresión y parámetros relacionados con la durabilidad, como porosidad accesible al agua o la resistencia a la penetración de los cloruros o de la carbonatación. Sin embargo, existe una gran casuística entre estudios. Cada uno de los autores centra su trabajo en una dosificación concreta, con distintos tipos de adiciones (humo de sílice, ceniza volante, escoria de alto horno) o con distintas condiciones de curado (temperatura, humedad, horas de exposición solar, meteorología y viento). Además, en cada estudio se analizan unas propiedades u otras, no existe ningún estudio transversal que agrupe distintos parámetros al mismo tiempo. Esto dificulta a otros autores llevar a cabo comparativas para sus estudios.

Debido a esto, en el presente trabajo se presenta un estudio en el que se realiza una comparativa de tres hormigones distintos, con tres relaciones agua/cemento distintas, pero sin adiciones, y que fueron curados en dos condiciones: en cámara de curado o expuesto a la intemperie. Tras 28 días, tanto la resistencia a compresión como diferentes propiedades relacionadas con la durabilidad del material fueron analizadas mediante ensayos de laboratorio. Los resultados permitieron demostrar la influencia del curado en varios hormigones de distintas calidades pero que no incluían ningún tipo de adición.

Plan Experimental

Materiales

Con la finalidad de llevar a cabo un estudio completo sobre hormigones con distintas calidades, en total se fabricaron 3 hormigones agrupados en tres relaciones agua/cemento distintas: 0,45, 0,65 y 0,85. La relación más baja está permitida en el Código Estructural (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022) y, de hecho, es la recomendable para exposiciones ambientales con agresividad alta. Sin embargo, la relación 0,65 está solo acotada a ambientes de exposición X0 (correspondientes a agresividad nula), mientras que la relación más alta (0,85) no se admite en el Código Estructural (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022). La utilización de estas relaciones agua/cemento, fuera de ámbito normativo, es común en trabajos de laboratorio y se utiliza para obtener resultados en cortos periodos de tiempo.

Para la fabricación de las 3 dosificaciones que se prepararon se utilizó un cemento CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R. Los áridos utilizados fueron de tipo silíceo, arena 0/4 y grava 4/8. Además, como aditivo para conseguir una trabajabilidad adecuada (fluida), se utilizó un superplastificante de la casa comercial Sika, modelo Sika® ViscoCrete®-20 HE. En la Tabla 1 se presentan las dosificaciones de los tres hormigones, referenciadas a cantidades en kilogramos para la fabricación de un metro cúbico de hormigón. Los hormigones han sido denominados de acuerdo con la relación agua cemento utilizada.

Por cada mezcla se prepararon 2 lotes, de 30 litros aproximadamente cada uno (cantidad determinada a partir del volumen necesario de probetas para analizar distintos parámetros). Tras su fabricación, todos los hormigones fueron mantenidos en los moldes durante las primeras 24 horas, protegidos con telas plásticas. Tras este periodo de tiempo, las probetas fueron desmoldadas y cada uno de los dos lotes de cada hormigón fue curado en distintas condiciones.

For this reason, this paper presents a comparative study of three different concretes, with three different water/cement ratios, but without additions, which were cured under two conditions: in a curing chamber or exposed to the atmosphere. After 28 days, both the compressive strength and different durability-related properties of the material were analysed by laboratory tests. The results were able to demonstrate the influence of curing on several concretes of different qualities but without any additives.

Experimental Plan

Materials

To carry out a complete study on concretes with different qualities, a total of 3 concretes were produced, grouped in three different water/cement ratios: 0.45, 0.65 and 0.85. The lowest ratio is allowed in the Spanish Standard (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España, 2022), and in fact, it is the recommended ratio for environmental exposures with high aggressiveness. However, the 0.65 ratio is only limited to X0 exposure environments (corresponding to zero aggressiveness), while the highest ratio (0.85) is not allowed in the Spanish Standard (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España, 2022). Using these water/cement ratios, outside the regulatory scope, is common in laboratory work and is used to obtain results in short periods of time.

In this study, CEM II/B-M (S-LL) 42.5 R cement was used for the manufacture of the 3 dosages that were prepared. The aggregates used were of the siliceous type, 0/4 sand and 4/8 gravel. In addition, a superplasticizer from Sika, model Sika® ViscoCrete®-20 HE, was used as an additive to achieve an adequate workability (fluid). Table 1 shows the dosages of the three concretes, referenced to quantities in kilograms, to produce one cubic metre of concrete. The concretes are named according to the water-cement ratio used.

Tabla 1. Dosificaciones de los tres hormigones fabricados (kg/m^3).
Table 1. Dosages of the three manufactured concretes (kg/m^3).

	0.45	0.65	0.85
Relación agua/cemento / Water/cement ratio	0.45	0.65	0.85
Agua / Water	185.91	186.55	186.89
Cemento / Cement	417.8	289.2	221.2
Superplastificante / Superplasticizer	2.09	1.45	1.11
Arena 0/4 / Sand 0/4	1,183.32	1,255.93	1,294.37
Grava 4/8 / Gravel 4/8	665.95	706.81	728.45

For each mix, 2 batches of approximately 30 litres each were prepared (quantity determined from the volume of specimens needed to analyse different parameters). After manufacture, all the concretes were kept in the moulds for the first 24 hours, protected with plastic sheeting. After this period, the specimens were demoulded and each of the two batches of each concrete was cured under different conditions.

- one of the batches was stored in a curing chamber, where both temperature (20±2ºC) and relative humidity (95% approximately) were kept under control. From here on, the curing condition is referred to as CC (Chamber Curing);
- the second batch of each concrete was cured outdoors, subjected to variations in temperature, humidity and solar exposure in the city of Valencia. Hereafter, the curing condition is referred to as CA (Cured Atmosphere).

Image 2 shows the two curing conditions that were carried out.

- uno de los lotes fue almacenado en cámara de curado, donde se mantuvo controlada tanto la temperatura (20±2ºC) y la humedad relativa (95% aproximadamente). De aquí en adelante, condición de curado referenciada como CC (Curado en Cámara);
- el segundo de los lotes de cada hormigón fue curado a la intemperie, sometido a las variaciones de temperatura, humedad y exposición solar en la ciudad de Valencia. De aquí en adelante, condición de curado referenciada como CA (Curado al Aire).

En la Imagen 2 se muestran las dos condiciones de curado que se llevaron a cabo.



Imagen 2. Procesos de curado. Image 2. Curing processes.

Métodos de Ensayo

Tras 28 días de curado en cada una de las condiciones definidas anteriormente, para cada hormigón y lote se realizaron una serie de ensayos centrados en analizar, por un lado, la resistencia a compresión de cada mezcla y, por otro lado, la durabilidad del material desde el punto de vista de distintas propiedades que a continuación se señalan:

- resistencia a compresión, realizado de acuerdo con lo señalado en la norma UNE-EN-12390-3:2020 (AENOR 2020) sobre probetas cilíndricas Ø100 mm y 200 mm de altura. El ensayo se realizó puliendo previamente las probetas con una pulidora Ibertest PPAM-150-1, y la rotura se realizó con una prensa Ibertest MEH-1500W. La velocidad de ensayo fue de 0.6 MPa/s de acuerdo con lo indicado en la norma. Por cada hormigón se analizaron tres probetas;
- porosidad accesible al agua, ensayo realizado siguiendo lo señalado en la norma UNE-EN-83980:2014 (AENOR 2014) sobre probetas cilíndricas de Ø100 mm y altura 50 mm. Este ensayo se basa en el análisis del incremento de peso que sufren las muestras al forzar la penetración de agua tras un ciclo de secado y saturación mediante vacío. Este ensayo se realizó sobre seis probetas por cada hormigón;
- absorción de agua por capilaridad, ensayo realizado siguiendo lo señalado en la norma UNE-83982:2008 (AENOR 2008b) sobre probetas cilíndricas de Ø100 mm y altura 50 mm. A diferencia del ensayo anterior, en este caso, se analiza la variación de masa de las probetas en contacto con una lámina de agua 5±1 mm durante una semana, llevando a cabo medidas cada 24 horas. En este caso, por cada hormigón y lote se analizaron seis probetas;
- permeabilidad al oxígeno, determinada de acuerdo con lo señalado en la norma UNE83981:2008 (AENOR 2008a) sobre probetas cilíndricas de Ø150 mm y 50 mm de altura. El ensayo se realizó con la ayuda de un Permeámetro Controls modelo 58-E0031. El estudio se realizó a distintas presiones (1,5, 2, 2,5, 3 y 3,5 bar), analizando el paso del oxígeno mediante el desplazamiento de burbujas de jabón por un tubo de vidrio calibrado. Por cada hormigón y lote se analizaron 3 probetas;

Test Methods

After 28 days of curing in each of the conditions defined above, for each concrete and batch, a series of tests were carried out to analyse, on the one hand, the compressive strength of each mix and, on the other hand, the durability of the material from the point of view of the different properties listed below:

- compressive strength, carried out in accordance with the UNE-EN-12390-3:2020 standard (AENOR 2020) on cylindrical specimens Ø100 mm and 200 mm height. The test was carried out by previously polishing the specimens with an Ibertest PPAM-150-1 polishing machine, and the test was carried out with an Ibertest MEH-1500W press at a speed of 0.6 MPa/s in accordance with the standard. For each concrete, three specimens were analysed;
- porosity accessible to water, test carried out in accordance with the UNE-EN-83980:2014 standard (AENOR 2014) on cylindrical specimens of Ø100 mm and 50 mm in height. This test is based on the analysis of the increase in weight of the samples when water is forced to penetrate after a drying and saturation cycle using vacuum. This test was carried out on six specimens for each concrete;
- capillary absorption coefficient, a test carried out in accordance with standard UNE-83982:2008 (AENOR 2008b) on cylindrical specimens of Ø100 mm and 50 mm in height. Unlike the previous test, in this case, the variation in mass of the specimens in contact with a 5±1 mm sheet of water for one week is analysed, taking measurements every 24 hours. In this case, six specimens were analysed for each concrete and batch;
- permeability to oxygen, determined in accordance with UNE83981:2008 (AENOR 2008a) on cylindrical specimens of Ø150 mm and 50 mm in height. The test was carried out using a Controls Permeameter model 58-E0031. The study was carried out at different pressures (1.5, 2, 2.5, 2.5, 3 and 3.5 bar), analysing the oxygen diffusion by displacing soap bubbles through a calibrated glass tube. For each concrete and batch, 3 specimens were analysed;
- resistance to chloride penetration, determined by means of a migration test, in accordance with the procedure defined in standard UNE-EN 12390-18:2021 (AENOR 2021). The test was carried out on six cylindrical specimens for each concrete and batch of Ø100 mm and 50 mm in height. In this case, the test consists of forcing chloride diffusion through the samples by creating an electric field between two solutions (2M NaCl and 0.3M NaOH) in contact with each of the faces of the specimens. The analysis of chloride penetration is carried out by visual analysis using silver nitrate solution;
- resistance to carbonation, carried out on 6 prismatic specimens 40x40x160 mm for each concrete and batch, following the indications of the UNE-EN 83993-2:2013 standard (AENOR 2013). After prior conditioning, the samples were stored in a curing chamber with a CO_2 concentration of 3±0.6% (100 times higher than the atmospheric concentration, 0.03%). In addition, the temperature and humidity conditions of the chamber were 20±2˚C and 65±5 R.H. The analysis of carbonation penetration was carried out after 7 and 28 days of storage, by breaking the specimens and developing them with phenolphthalein;
- electrical resistivity was another of the parameters analysed, due to its relationship with the development of electrochemical processes such as corrosion of the reinforcement inside the concrete. This test was also carried out on 6 prismatic specimens 40x40x160 mm for each concrete and batch, following in this case what is indicated in the UNE-EN 12390-19: (AENOR 2023) standard. Although the test was carried out by monitoring the evolution of this parameter for six months, the results show the values of the last measurement, once the results were stabilized.

Results

Table 2 shows the results of the characterization tests performed. In this table, the coefficients of variation (CV) have also been entered in parentheses for each type of concrete and test.

- resistencia a la penetración de cloruros, determinada mediante ensayo por migración, de acuerdo a lo señalado en la norma UNE-EN 12390-18:2021 (AENOR 2021). El ensayo se realizó sobre seis probetas cilíndricas por cada hormigón y lote de Ø100 mm y 50 mm de altura. En este caso, el ensayo consiste en forzar el paso de cloruros a través de las muestras mediante la creación de un campo eléctrico entre dos disoluciones (2M NaCl y 0,3M NaOH) en contacto con cada una de las caras de las probetas. El análisis de la penetración de los cloruros se realiza mediante revelado con nitrato de plata;
- resistencia a la carbonatación, realizada sobre 6 probetas prismáticas 40x40x160 mm por cada hormigón y lote, siguiendo lo indicado en la norma UNE-EN 83993-2:2013 (AENOR 2013). Tras acondicionamiento, las muestras fueron almacenadas en cámara de curado con una concentración de CO_2 del 3±0,6%. Además, las condiciones de temperatura y humedad de la cámara eran de 20±2˚C y 65±5 H.R. El análisis de la penetración de la carbonatación se realizó a los 7 y 28 días de almacenamiento, mediante rotura de las probetas y revelado con fenolftaleína;
- la resistividad eléctrica fue otro de los parámetros analizados, por su relación con el desarrollo de procesos electroquímicos como la corrosión de las armaduras en el interior del hormigón. Este ensayo se realizó también sobre 6 probetas prismáticas 40x40x160 mm por cada hormigón y lote, siguiendo en este caso lo indicado en la norma UNE-EN 12390-19: (AENOR 2023). Aunque el ensayo se realizó monitorizando la evolución de este parámetro durante seis meses, los resultados recogen los valores de la última medida, una vez se estabilizaron los resultados.

Resultados

En la Tabla 2 se presentan los resultados de los ensayos de caracterización. En la tabla se han introducido también los coeficientes de variación (CV) entre paréntesis.

Como se puede apreciar en la Tabla 2, existe una gran diferencia entre cada uno de los hormigones, incluso entre las diferentes condiciones de curado. Excepto el estudio de la resistencia a compresión, el resto de los ensayos realizados se han centrado en el análisis de diferentes propiedades relacionadas con la durabilidad del hormigón y la corrosión de las armaduras, siendo este el eje central de este trabajo y su segunda parte. De acuerdo con los resultados obtenidos, y comparando con autores que establecieron en bibliografía umbrales relacionando estas propiedades y la durabilidad del material, se puede afirmar que: los resultados de los hormigones 0,85 se enmarcan en los umbrales que lo clasifican como un material con una durabilidad muy baja, apreciándose también diferencias entre el bien y mal curado. En el caso de las mezclas 0,65, los resultados obtenidos se sitúan en rangos de durabilidad baja o muy baja. En cambio, los hormigones 0,45 mostraron en la mayoría de los casos una durabilidad media, siendo en algunos casos baja para la mezcla mal curada, mientras que en algunos otros entra en durabilidad alta para la mezcla bien curada.

Conclusiones

El curado del hormigón es un proceso fundamental para garantizar su durabilidad y resistencia a largo plazo. Este procedimiento permite la hidratación adecuada del cemento, asegurando que se forme una estructura sólida y homogénea. Tal y como demostrado los resultados, esto puede tener una gran influencia en la durabilidad del material, sobre todo en mezclas de calidad muy baja (como los hormigones con relaciones agua/cemento 0,85 y 0,65). En hormigones de mejor calidad, como las mezclas con relación agua/cemento 0,45 como las analizadas en este estudio la influencia del curado, aunque menos evidente, también ha demostrado generar una merma en diferentes propiedades relacionadas con la durabilidad. Este trabajo se diferencia del resto de los existentes actualmente en bibliografía en que abarca un estudio completo, analizando distintas propiedades relacionadas con la durabilidad del material y la influencia que un curado adecuado (cámara de curado) o inadecuado (curado expuesto a la atmósfera) puede tener en hormigones de distintas calidades sin ningún tipo de adición. Sin embargo, todavía no se ha validado el comportamiento en casos reales y a largo plazo, y no solo en ensayos de laboratorio realizados a 28 días. Debido a esto, en una segunda parte de este trabajo se presenta un estudio realizado sobre los mismos hormigones, pero en este caso, centrándose en la monitorización de la corrosión de armaduras embebidas. Esto permitirá apreciar la relación que puede tener el curado del hormigón en la durabilidad de las estructuras de hormigón armado desde el punto de vista de la corrosión.

Tabla 2. Resultados de los ensayos realizados.
Table 2. Results obtained for each test.

	0.85CA	0.85CC	0.65CA	0.65CC	0.45CA	0.45CC
Resistencia a compresión/ Compressive strength, f_c, (MPa)	21,57 (2,14)	24,12 (1,69)	25,75 (3,45)	31,02 (2,12)	34,59 (2,64)	40,08 (3,21)
Porosidad accesible/ Porosity accesible to water, (%)	17,66 (1,11)	17,09 (1,19)	14,96 (1,45)	14,27 (0,97)	13,98 (2,12)	13,37 (0,74))
Absorción por capilaridad/ Capillary absorption, ($kg/m^2min^{0,5}$)	89,42 (7,89)	68,91 (6,47)	75,95 (7,13)	59,63 (7,67)	65,11 (3,64)	48,36 (8,93)
Permeabilidad al gas/ Gas permeability, (m^2)	1125,37 (110,25)	963,54 (89,97)	987,11 (37,94)	748,34 (128,77)	618,79 (264,30)	257,14 (57,63)
Difusión de cloruros/ Chloride diffusion, D_{nssm}, (m^2/s)	68,96 (17,32)	54,86 (23,64)	52,36 (17,69)	41,58 (15,11)	43,78 (12,77)	35,68 (8,97)
Resistencia a carbonatación/ Carbonation resistance, (mm/año) (mm/year)	135,09 (2,46)	67,54 (1,21)	91,91 (1,77)	62,93 (1,73)	86,95 (1,45)	54,39 (1,23)
Resistividad/ Resistivity, (Ωm)	35,75 (5,05)	42,31 (8,14)	58,60 (7,31)	63,87 (6,17)	70,01 (3,45)	82,05 (4,97)

As can be seen in Table 2, there is a great difference between each of the concretes, even between the different curing conditions. Except for the study of compressive strength, the rest of the tests performed have focused on the analysis of different properties related to concrete durability and reinforcement corrosion, which is the main focus of this work and its second part. According to the results obtained, and comparing with authors who established in bibliography thresholds relating these properties and the durability of the material, it can be affirmed that: the results of the 0.85 concretes are framed within the thresholds that classify it as a material with a very low durability, also appreciating differences between good and bad curing. In the case of the 0.65 mixes, the results obtained are in the low or very low durability range. On the other hand, the 0.45 concretes showed in most cases a medium durability, being in some cases low for the poorly cured mix, while in some others it enters high durability for the well cured mix.

Conclusions

Curing concrete is a fundamental process to guarantee its long-term durability and strength. This procedure allows for proper hydration of the cement, ensuring that a solid and homogeneous structure is formed. As the results have shown, this can have a great influence on the durability of the material, especially in very low-quality mixes (such as concretes with water/cement ratios of 0.85 and 0.65). In better quality concretes, such as the mixes with water/cement ratio 0.45 like the ones analysed in this study, the influence of curing, although less evident, has also been shown to generate a decrease in performance according to the different durability-related properties.

This work differs from the rest of those currently available in the literature in that it covers a complete study, analysing different durability-related properties of the material and the influence that adequate (curing chamber) or inadequate (curing exposed to the atmosphere) curing can have on concretes with different qualities without any type of addition. However, the behaviour has not yet been validated in real cases and in the long term, and not only in laboratory tests carried out at 28 days. Because of this, a second part of this work presents a study carried out on the same concretes, but in this case, focusing on the monitoring of the corrosion of embedded reinforcement. This will allow appreciating the relationship that concrete curing can have on the durability of reinforced concrete structures from the point of view of corrosion.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. 2008a. UNE 83981:2008. Determinación de La Permeabilidad Al Oxígeno Del Hormigón Endurecido.
- AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. 2020. UNE 83982:2008. Determinación de La Absorción de Agua Por Capilaridad Del Hormigón Endurecido.
- AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. 2013. UNE 83993-2:2013. Determinación de La Velocidad de Penetración de La Carbonatación En El Hormigón Endurecido. Parte 2: Método Acelerado.
- AENOR Asociación Española de Normalización y Certificación. 2014. UNE-EN 83980:2014. Determinación de La Absorción de Agua, La Densidad y La Porosidad Accesible Al Agua Del Hormigón.
- AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. 2020. UNE-EN 12390-3:2020. Ensayos de Hormigón Endurecido. Parte 3 : Determinación de La Resistencia a Compresión de Probetas. AENOR Asociación Española de Normalización y Certificación.
- AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. 2020. 2021. UNE-EN 12390-18. Determinación Del Coeficiente de Migración de Cloruros.
- AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. 2020. 2023. UNE-EN 12390-19:2023. Determinación de La Resistividad Eléctrica.
- Atiş, C. D., F. Özcan, A. Kiliç, O. Karahan, C. Bilim, and M. H. Severcan. 2005. "Influence of Dry and Wet Curing Conditions on Compressive Strength of Silica Fume Concrete." Building and Environment 40 (12): 1678–83. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.12.005.
- Chen, How Ji, Shao Siang Huang, Chao Wei Tang, M. A. Malek, and Lee Woen Ean. 2012. "Effect of Curing Environments on Strength, Porosity and Chloride Ingress Resistance of Blast Furnace Slag Cement Concretes: A Construction Site Study." Construction and Building Materials 35: 1063–70. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.052.
- Gagg, Colin R. 2014. "Cement and Concrete as an Engineering Material: An Historic Appraisal and Case Study Analysis." Engineering Failure Analysis 40: 114–40. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004.
- Han, Fanghui, and Zengqi Zhang. 2018. "Hydration, Mechanical Properties and Durability of High-Strength Concrete under Different Curing Conditions." Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 132 (2): 823–34. https://doi.org/10.1007/s10973-018-7007-3.
- Kim, Tae Kyun, Seung Jai Choi, Jang Ho Jay Kim, Yong Sik Chu, and Eunjong Yu. 2017. "Performance Based Evaluation of Carbonation Resistance of Concrete According to Various Curing Conditions from Climate Change Effect." International Journal of Concrete Structures and Materials 11 (4): 687–700. https://doi.org/10.1007/s40069-017-0206-7.
- Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España. 2022. Código Estructural.
- Neville, Adam. 2001. "Consideration of Durability of Concrete Structures: Past, Present, and Future." Materials and Structures 34 (2): 114–18. https://doi.org/10.1007/bf02481560.
- Paulik, Peter. 2013. "The Effect of Curing Conditions (in Situ vs. Laboratory) on Compressive Strength Development of High Strength Concrete." Procedia Engineering 65: 113–19. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.020.
- Poon, C. S., Y. L. Wong, and L. Lam. 1997. "The Influence of Different Curing Conditions on the Pore Structure and Related Properties of Fly-Ash Cement Pastes and Mortars." Construction and Building Materials 11 (7–8): 383–93. https://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00061-5.
- Wasserman, R., and A. Bentur. 2013. "Efficiency of Curing Technologies: Strength and Durability." Materials and Structures/Materiaux et Constructions 46 (11): 1833–42. https://doi.org/10.1617/s11527-013-0021-9.

INFLUENCIA DEL CURADO EN LA DURABILIDAD DEL HORMIGÓN ARMADO. PARTE 2. MONITORIZACIÓN DE LA CORROSIÓN

CURING CONDITIONS INFLUENCE ON THE DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE. PART 2. CORROSION MONITORING

Josep Ramon Lliso-Ferrando
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Tania Vanessa Yánez Albán
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación (ETSIE), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: tayaal@topo.upv.es
School of Building Engineering. Universitat Politècnica de València. E-mail: tayaal@topo.upv.es
José Enrique Ramón-Zamora
Investigador en el Grupo ISCMA, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Serrano Galvache, 4, 28033, Madrid, España. E-mail: jose.ramon@ietcc.csic.es
Researcher in the ISCMA Group, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Madrid. E-mail: jose.ramon@ietcc.csic.es
Ana Martínez-Ibernón
Investigadora en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Isabel Gasch-Molina
Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: igasch@mes.upv.es
Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: igasch@mes.upv.es
José Manuel Gandía-Romero
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: joganro@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: joganro@csa.upv.es
Manuel Valcuende Payá
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es

Abstract

In the first part of this study, the results obtained during the analysis of several durability-related properties of concretes cured in different conditions were presented. Although these results allow classifying the characteristics of concrete and can serve as durability indicators, it is necessary to analyse the performance of concretes in real cases. To this end, this part of the work presents a new case study: corrosion monitoring of reinforcement embedded in the same concretes studied previously. The reinforced concrete specimens were subjected to environmental exposures similar to those defined in the Spanish Standards as XS2 and XS3. Corrosion was monitored for more than one year using a previously validated corrosion measurement technique. The results accumulated to date have demonstrated the large differences between optimal curing, maintaining a high humidity level during the first 28 days, and inadequate curing, in this case, atmospheric conditions.

Keywords
Concrete, Curing Conditions, Durability, Corrosion Monitoring, Sensors

Introducción

El curado del hormigón es un proceso clave que, si no se tiene en cuenta, puede conducir a una merma importante en la durabilidad del hormigón armado (Aïtcin 2000; Maslehuddin et al. 2013). En la primera parte de este trabajo se han presentado los resultados de diferentes ensayos llevados a cabo sobre hormigones de distintas calidades curados en cámara y que fueron dejados endurecer a la intemperie. Los datos obtenidos demostraron una merma de la durabilidad, sobre todo en hormigones de peor calidad (relaciones agua/cemento 0,85 y 0,65). En hormigones de mejor calidad (relación agua/cemento 0,45) el descenso de las prestaciones, aunque existente, fue mucho menos evidente. Todos estos datos se compararon con valores previamente definidos en bibliografía por varios autores (Baroghel-Bouny 2004; W. Wang et al. 2014).

Este estudio permite establecer comparativas con mayor facilidad que los trabajos existentes en bibliografía actualmente, que se centran en condiciones de curado concretas, o en mezclas muy específicas, como por ejemplo incluyendo adiciones o componentes provenientes de demoliciones o residuos reciclados (Y. Wang et al. 2023; Silva, De Brito, and Saikia 2013; Ismail, Kwan, and Ramli 2017). Sin embargo, algo que todavía no se ha realizado es un estudio, no tanto centrado en analizar las propiedades del material, sino en analizar la respuesta del material en casos reales.

Debido a esto, en la segunda parte de este trabajo se presenta un caso práctico de monitorización de la corrosión sobre armaduras embebidas en los mismos hormigones trabajados anteriormente: tres hormigones con relaciones agua/cemento de 0,85, 0,65 y 0,45. Por cada hormigón se fabricaron dos lotes, uno de ellos curado en cámara, mientras que el segundo fue dejado endurecer expuesto a la intemperie. En este caso, el estudio se ha realizado para todos los grupos (tipo de hormigón y curado) sobre probetas que fueron expuestas a condiciones de agresividad ambiental tipo XS2 y XS3 (sumergido y sometido a mareas, respectivamente). Durante más de un año se monitorizó la corrosión mediante una técnica electroquímica de medida de la corrosión precisa y fiable que ya ha sido validada previamente.

Plan Experimental

Materiales

Tal y como se ha avanzado en la primera parte de este trabajo, el estudio se centra en tres dosificaciones que permitan obtener hormigones de distintas calidades:

- un hormigón con una relación agua/cemento de 0,45, aceptado por la normativa española (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022) y especialmente indicado para ambientes de exposición como los que se trabajarán en este estudio (XS2 y XS3);
- un hormigón con una relación agua/cemento de 0,65. En este caso se trata de una mezcla que el Código Estructural (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022) únicamente recomienda para hormigones no sometidos a agresividad ambiental, es decir, en interiores protegidos y con humedad relativa baja, o en el caso de hormigones en masa (ambiente X0);
- un hormigón con una relación agua/cemento de 0,85, y que se encuentra fuera de los límites establecidos en el Código Estructural (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022). A pesar de ser un hormigón no apto, es habitual utilizar estas mezclas para trabajos en laboratorio ya que permitirá obtener una evolución rápida en cortos periodos de tiempo.

En la Tabla 1 se presentan las tres dosificaciones empleadas referidas a kg de material para la fabricación de 1 m^3 de hormigón. De las mezclas, se debe destacar que en todas ellas se ha utilizado el mismo cemento, CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R. Los áridos que fueron empleados se dividieron en arena silícea 0/4 y grava silícea 4/8. En cada mezcla se tuvo que incorporar también un aditivo superplastificante para conseguir una trabajabilidad adecuada (en este estudio se consideró conveniente trabajar con una consistencia fluida). En este caso, se utilizó el producto Sika® ViscoCrete®-20 HE.

Introduction

Concrete curing is a key process that, if not considered, can lead to a significant decrease in the durability of reinforced concrete (Aïtcin 2000; Maslehuddin et al. 2013). In the first part of this work, the results of several tests carried out on concretes of different qualities cured in a curing chamber and atmospheric conditions were presented. The data obtained showed a decrease in durability, especially in concretes of poorer quality (water/cement ratios 0.85 and 0.65). In better quality concretes (water/cement ratio 0.45) the decrease in performance, although existing, was much less evident. All these data were compared with values previously defined in the literature by several authors (Baroghel-Bouny 2004; W. Wang et al. 2014).

This study allows comparisons to be made more easily than existing work in the literature, which focuses on specific curing conditions, or on very specific mixtures, such as including additions or components from demolition or recycled waste (Y. Wang et al. 2023; Silva, De Brito, and Saikia 2013; Ismail, Kwan, and Ramli 2017). However, one thing that has not yet been done is a study, not so much focused on analysing the material properties, but on analysing the material performance.

Because of this, the second part of this study presents a corrosion monitoring case study on reinforcements embedded in the same concretes previously analysed: three concretes with water/cement ratios of 0.85, 0.65 and 0.45. Two batches were produced for each concrete, one of which was cured in a chamber, while the second was left under atmospheric conditions. In this case, the study was carried out for all groups (type of concrete and curing) on specimens that were exposed to environmental aggressiveness conditions: XS2 and XS3 (submerged and subjected to tides, respectively). Corrosion was monitored for more than one year using an accurate and reliable electrochemical corrosion measurement technique that has been previously validated.

Experimental Plan

Materials

As was advanced in the first part of this work, the study focuses on three dosages to obtain concretes of different qualities:

- a 0.45 water/cement ratio concrete, accepted by Spanish Standard (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022) and especially suitable for exposure environments such as those to be analysed in this study (XS2 and XS3);
- a 0.65 water/cement ratio concrete. In this case, it is a mixture that the Spanish Standard (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022) only recommends for concretes not subjected to environmental aggressiveness, i.e., in protected interiors and with low relative humidity, or in the case of mass concretes (environment X0);
- a 0.85 water/cement ratio concrete, and which is outside the limits established in the Spanish Standard (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022). Despite being an unsuitable concrete, it is common to use these mixtures for laboratory work since it will allow obtaining a fast evolution in short periods of time.

Table 1 shows the three dosages used, referring to kg of material for the manufacture of 1 m^3 of concrete. It should be noted that the same cement, CEM II/B-M (S-LL) 42.5 R, was used in all the mixtures. The aggregates used were divided into 0/4 silica sand and 4/8 silica gravel. In each mix, a superplasticizer additive also had to be incorporated to achieve adequate workability (in this study, it was considered convenient to work with a fluid consistency). In this case, the product Sika® ViscoCrete®-20 HE was used.

Tabla 1. Dosificaciones de los tres hormigones fabricados (kg/m^3).
Table 1. Dosages of the three manufactured concretes (kg/m^3).

	0.45	0.65	0.85
Relación agua/cemento / Water/cement ratio	0.45	0.65	0.85
Agua / Water	185.91	186.55	186.89
Cemento / Cement	417.8	289.2	221.2
Superplastificante / Superplasticizer	2.09	1.45	1.11
Arena 0/4 / Sand 0/4	1,183.32	1,255.93	1,294.37
Grava 4/8 / Gravel 4/8	665.95	706.81	728.45

Por cada hormigón se fabricaron dos lotes, y aproximadamente se prepararon 30 litros por mezcla (volumen estimado para rellenar todas las probetas necesarias para el estudio de caracterización (parte 1) y el presente trabajo). Previamente a la fabricación del hormigón, se realizó un estudio del contenido de humedad de los áridos y la pertinente corrección de las mezclas.

La fabricación de los seis lotes presentados previamente se realizó en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. Una vez hormigonadas las probetas, estas fueron mantenidas en sus moldes durante 24 horas, en condiciones de laboratorio, pero protegidas con telas plásticas para evitar la evaporación de agua. Transcurrido este periodo de tiempo, las probetas fueron desmoldadas y de los dos lotes de cada hormigón, uno fue almacenado en cámara de curado (20±2ºC y Humedad Relativa superior al 90%) (referenciado como CC), mientras que el otro fue expuesto a la intemperie (referenciado como CI). Estas condiciones se mantuvieron hasta la edad de 28 días, cuando se realizaron los ensayos descritos en la primera parte de este trabajo. A esa misma edad, una serie de probetas de hormigón armado fabricadas fueron acondicionadas y expuestas a diferentes ambientes, tal y como se describe a continuación.

Probetas de Ensayo

En la Imagen 1 se describe la probeta de hormigón armado utilizada. Como se puede ver, se trata de una probeta cúbica de 150 mm de lado con cuatro armaduras embebidas en sus 4 caras laterales con un recubrimiento de 15 mm. Las armaduras embebidas (Ø10 mm de acero B500SD) fueron preparadas previamente, limitando la superficie en contacto con el hormigón a 60 mm lineales (18.85 cm^2) con la ayuda de un encamisado preparado con tubería de PVC relleno de epoxi. La parte superior de la armadura quedó desprotegida para permitir realizar las conexiones eléctricas necesarias durante el estudio. Indistintamente, este saliente fue protegido con vaselina para evitar que se produzca la corrosión aérea de esta región. Por otro lado, se debe señalar que, para la colocación de las armaduras durante el hormigonado, y evitar el desplazamiento de estas, se creó un soporte con impresión 3D que las mantuvo en su posición en todo momento. Por cada lote se fabricaron dos probetas (8 armaduras), haciendo un total de 12 probetas y 48 armaduras a monitorizar.

A los 28 días de edad, y teniendo en cuenta cada uno de los distintos métodos de curado, las probetas fueron transferidas a laboratorio, donde se acondicionaron previamente a su exposición. Para ello, la cara superior de cada probeta, y un centímetro de las caras laterales fueron protegidas con una pintura impermeabilizante de la casa comercial Ureña. La protección de esta superficie se basa en la experiencia del grupo investigador, que ya ha detectado que el saliente de las armaduras puede suponer una vía de entrada para los cloruros, llevando a resultados no representativos. La pintura tuvo que ser aplicada en varias capas para asegurar el sellado de esta zona.

Condiciones de exposición

Una vez la protección de la cara superior y las caras laterales resulto adecuada, una probeta de cada lote fue parcialmente sumergida en agua de mar (hasta un centímetro por debajo de la cara superior). La concentración de la disolución donde se realizó la exposición fue del 3% de NaCl, similar al agua del mar mediterráneo. Estas condiciones se mantuvieron durante el periodo de exposición. Estas condiciones representan un ambiente de exposición XS2 de acuerdo con el Código Estructural (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022).

For each concrete, two batches were manufactured, and approximately 30 litres per mix were prepared (estimated volume to fill all the specimens required for the characterisation study (part 1) and the present work). Prior to the manufacture of the concrete, a moisture content analysis of the aggregates and the pertinent correction of the mixtures were carried out.

The mixture of the six batches previously presented was carried out in the Materials Laboratory of the Building Engineering School. Once the specimens were cast, they were kept in their moulds for 24 hours, under laboratory conditions, but protected with plastic sheets to prevent water evaporation. After this period, the specimens were demoulded and of the two batches of each concrete, one was stored in a curing chamber (20±2ºC and relative humidity above 90%) (referenced as CC), while the other was exposed to atmospheric conditions (referenced as CI). These conditions were maintained until the age of 28 days, when the tests described in the first part of this work were carried out. At the same age, a series of fabricated reinforced concrete specimens were conditioned and exposed to different environments, as described below.

Test Specimens

Image 1 shows the reinforced concrete specimen used. As can be seen, it is a 150 mm cubic specimen with four embedded reinforcements in its four lateral faces with a 15 mm concrete cover. The embedded reinforcement (Ø10 mm of B500SD steel) was previously prepared, limiting the surface in contact with the concrete to 60 linear mm (18.85 cm^2) using PVC pipe filled with epoxy painting. The upper part of the reinforcement was left unprotected to allow the necessary electrical connections to be made during the study. Indistinctly, this part of the rebar was protected with Vaseline to prevent air corrosion. On the other hand, it should be noted that for the placement of the rebars during casting process, and to avoid displacement of the rebars, a 3D printed support was created to always keep them in position. For each batch, two specimens (8 reinforcements) were manufactured, making a total of 12 specimens and 48 reinforcements to be monitored.

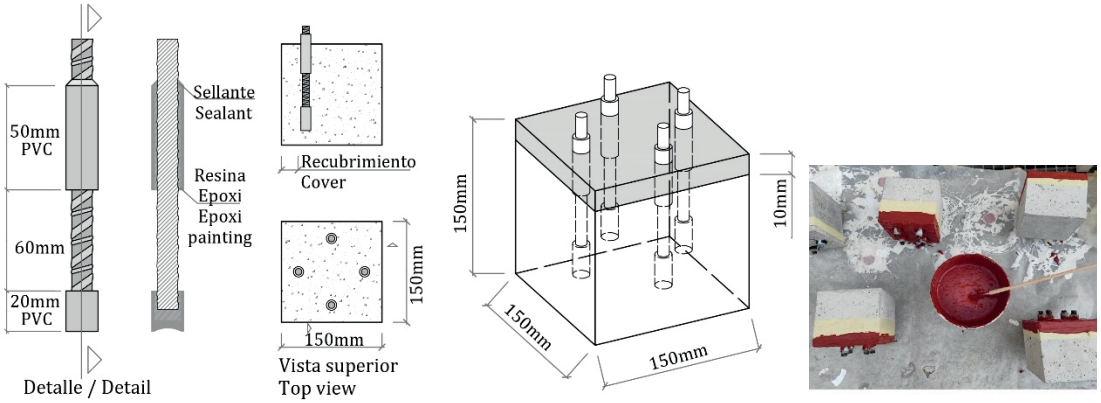


Imagen 1. Probetas de ensayo. Image 1. Test specimens.

After 28 days of age and considering each of the different curing methods, the specimens were transferred to the laboratory, where they were preconditioned. For this purpose, the upper face of each specimen and one centimetre of the lateral faces were protected with a waterproofing paint from Ureña. The protection of this surface is based on the experience of the research group, which has already detected that the protrusion of the reinforcement can favour chloride diffusion, leading to unrepresentative results. The paint had to be applied in several layers to ensure the sealing of this area.

Exposure Conditions

Once the protection of the upper and lateral faces was adequate, one specimen from each batch was partially immersed in seawater (up to one centimetre below the upper face). The concentration of the solution where the exposure was carried out was 3% NaCl, like Mediterranean Sea water. These conditions were maintained during the exposure period. These conditions represent an XS2 exposure environment according to the Spanish Standard (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022).

Las restantes probetas de cada lote fueron expuestas a un ambiente XS3 de acuerdo con el Código Estructural (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022), y que se corresponden con unas condiciones de carrera de mareas. Estas condiciones se reprodujeron creando un sistema de bombeo de agua que facilitara que las probetas permanecieran durante 12 horas sumergidas en una disolución del 3% de NaCl, como agua de mar, y las restantes 12 horas del día aireadas. Esto se consiguió con la ayuda de dos bombas modelo iL280P/iL280P-24 y dos programadores de tipo enchufe modelo Garza.

En la Imagen 2 se muestran fotografías de ambas condiciones de exposición.

Monitorización de la Corrosión

Durante casi un año las armaduras de cada probeta fueron monitorizadas, analizando periódicamente su intensidad de corrosión. Para ello, se utilizó una nueva técnica electroquímica de medida de la corrosión presentada en anteriores trabajos por el grupo de investigación y definida como PSV (*Potential Step Voltammetry*) (J. E. Ramón et al. 2019; J. E. Ramón et al. 2022; J. E. Ramón et al. 2020; Martínez-Ibernón et al. 2019). Se trata de una técnica centrada en reproducir las regiones rectas de las ramas anódicas y catódicas de Tafel mediante una serie de puntos discretos a partir de una perturbación de tipo potenciostático y la interpretación de la respuesta obtenida con circuitos equivalentes. Aunque ya se ha validado, los autores siguen trabajando en su mejora, y este trabajo forma parte de los estudios centrados en validar los nuevos avances, descritos en trabajos previos (J.E. Ramón et al. 2023; Lliso-Ferrando et al. 2024).

Las medidas se realizaron apoyándose en el potenciostato AUTOLAB PGSTAT 100 y el software de procesado NOVA 1.11. y utilizando una celda a tres electrodos.

Resultados

Ambiente XS3

En la Imagen 3 se muestran los resultados obtenidos durante la monitorización de la corrosión. Los resultados se corresponden al valor promedio de las 4 armaduras por grupo analizadas. En la gráfica se han incluido los umbrales para considerar la intensidad de corrosión de acuerdo con las recomendaciones RILEM (Andrade and Alonso 2004).

Ambiente XS2

En la Imagen 4 se muestran los resultados obtenidos durante la monitorización de la corrosión. Los resultados se corresponden al valor promedio de las 4 armaduras por grupo analizadas. En la gráfica se han incluido los umbrales para considerar la intensidad de corrosión de acuerdo con las recomendaciones RILEM (Andrade and Alonso 2004).

Como se puede ver, es apreciable la diferencia entre los distintos casos estudiados. En el caso de los hormigones con relación agua/cemento 0,45 es muy complejo distinguir las muestras curadas en cámara de las curadas al aire. Sin embargo, en los otros dos grupos de estudio (hormigones con relación agua/cemento 0.,65 y 0,85) las diferencias son mayores, y es posible apreciar un nivel de corrosión más alto en aquellas muestras curadas al aire que las curadas en cámara. Sin embargo, la medida de la intensidad de corrosión representa un análisis puntual. Para poder apreciar las diferencias entre los distintos casos de estudio se debe analizar el daño acumulado. En este caso, es habitual trabajar analizando la pérdida de masa acumulada. Esta se puede obtener a través de los datos de i_{CORR} obtenidos en la monitorización y la ecuación de Faraday, integrando la evolución de la intensidad con el tiempo (Andrade and Alonso 2004) según:

$$\Delta m = \frac{M}{n \cdot F} \cdot \int_{t_0}^{t} i_{CORR} \cdot dt \qquad [1]$$

donde M se refiere a la masa atómica del metal (55.845 g/mol), n al número de electrones ganados o liberados, que en este caso es 2, y F la constante de Faraday (96,845 C/mol). En la Imagen 5 se muestran los resultados obtenidos al integrar los resultados del grupo de estudio XS2.

The remaining specimens of each batch were exposed to an XS3 environment according to the Spanish Standard (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022), corresponding to marine tidal conditions. These conditions were reproduced by creating a water pumping system that would allow the specimens to remain for 12 hours submerged in a 3% NaCl solution, such as seawater, and the remaining 12 hours of the day aerated. This was achieved using two iL280P/iL280P-24 model pumps and two Garza model plug-in type programmers. Photographs of both exposure conditions are shown in Image 2.

Corrosion Monitoring

During almost one year, the reinforcements of each specimen were monitored, periodically analysing their corrosion intensity. For this purpose, a new electrochemical corrosion measurement technique presented in previous works by the research group and defined as PSV (Potential Step Voltammetry) was used (J. E. Ramón et al. 2019; J. E. Ramón et al. 2022; J. E. Ramón et al. 2020; Martínez-Ibernón et al. 2019). It is a technique focused on generating the straight regions of the anodic and cathodic Tafel slopes by means of a series of discrete points from a potentiostatic perturbation type and the interpretation of the response obtained with equivalent circuits. Although it has already been validated, the authors are still working on its improvement, and this work is part of the studies focused on validating the new advances, described in previous works (J.E. Ramón et al. 2023; Lliso-Ferrando et al. 2024). The measurements were performed using the AUTOLAB PGSTAT 100 potentiostat and the NOVA 1.11 processing software. A three electrodes cell measurement was used.

Results

Exposure Condition XS3

Image 3 shows the results obtained during corrosion monitoring. The results correspond to the average value of the 4 reinforcements per group analysed. The graph includes the thresholds for considering the corrosion intensity according to the RILEM recommendations (Andrade and Alonso 2004).

Exposure Condition XS2

Image 4 shows the results obtained during corrosion monitoring. The graph includes the thresholds to consider the corrosion intensity according to the RILEM recommendations (Andrade and Alonso 2004).

As seen, the difference between the cases studied is appreciable. In the case of concretes with a water/cement ratio of 0.45, it is very difficult to distinguish the samples cured in a chamber from those cured in air. However, in the other two study groups (concretes with water/cement ratio 0.65 and 0.85) the differences are greater, and it is possible to appreciate a higher level of corrosion in those samples cured in air than those cured in a chamber. However, the measurement of corrosion intensity represents a point analysis. To appreciate the differences between the different cases of study, the accumulated damage must be analysed. In this case, it is usual to work by analysing the accumulated mass loss. This can be obtained through the i_{CORR} data obtained and the Faraday equation, integrating the evolution of the intensity with time (Andrade and Alonso 2004) according to:

$$\Delta m = \frac{M}{n \cdot F} \cdot \int_{t_0}^{t} i_{CORR} \cdot dt \qquad [1]$$

where M refers to the atomic mass of the metal (55.845 g/mol), n to the number of electrons gained or released, which in this case is 2, and F the Faraday constant (96.845 C/mol). Image 5 shows the results obtained by integrating the results of the XS2 study group.

As can be seen, the cumulative mass loss data clearly demonstrate the influence of curing. In the concretes with water/cement ratio 0.65, an increase of 25% in the accumulated damage was observed between samples cured in a chamber and those cured in air. However, in the study group of concretes with 0.85 ratios, the differences are greater, detecting 40% more accumulated damage in samples cured exposed to the weather compared to those cured in a chamber. In the concretes with ratio 0.45 the differences were negligible, being evident a longer study period.



Imagen 2. Condiciones de exposición. Image 2. Exposure conditions.

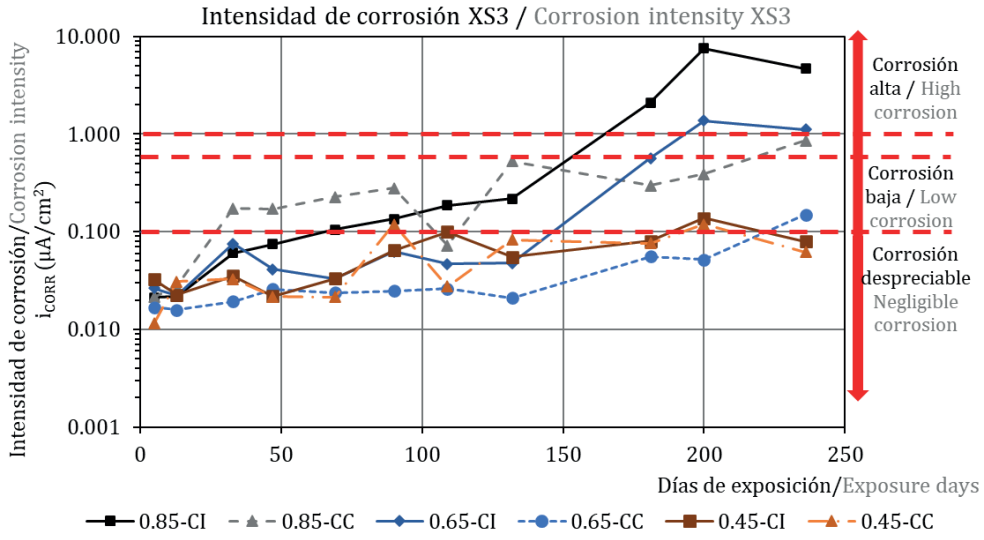


Imagen 3. Resultados (XS3). Image 3. Results (XS3).

Como se puede ver, los datos de pérdida de masa acumulada (XS2) demuestran la influencia del curado claramente. En los hormigones con relación agua/cemento 0,65 se apreció un incremento del 25% en el daño acumulado entre muestras curadas en cámara y aquellas curadas al aire. Sin embargo, en el grupo de estudio de los hormigones con relaciones 0,85 las diferencias son mayores, detectando un 40% más de daño acumulado en muestras curadas expuestas a la intemperie frente aquellas que fueron curadas en cámara. En los hormigones con relación 0,45 las diferencias fueron inapreciables, siendo evidente un periodo de estudio más largo.

Conclusiones

El presente estudio, junto con la primera parte que le precede han permitido analizar la influencia que el curado puede tener en las prestaciones del hormigón armado. En este trabajo se presenta un caso de monitorización de la corrosión en armaduras embebidas en distintos hormigones curados en cámara y curados al aire libre. La falta de un curado adecuado conduce a una merma en la durabilidad del material (mayor porosidad o menor resistencia a la penetración de agentes agresivos), lo que repercute en el desarrollo de procesos de corrosión más rápido, favoreciendo el daño acumulado. En este caso, se detectaron incrementos del daño de entre el 25% y el 40% en función de la calidad del hormigón. Sin embargo, en hormigones de mejor calidad, las diferencias fueron despreciables, demostrando que es necesario seguir con el estudio de monitorización.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Gobierno de la Generalitat Valenciana la ayuda de movilidad postdoctoral de Josep Ramon Lliso Ferrando (CIBEST/2023/83).

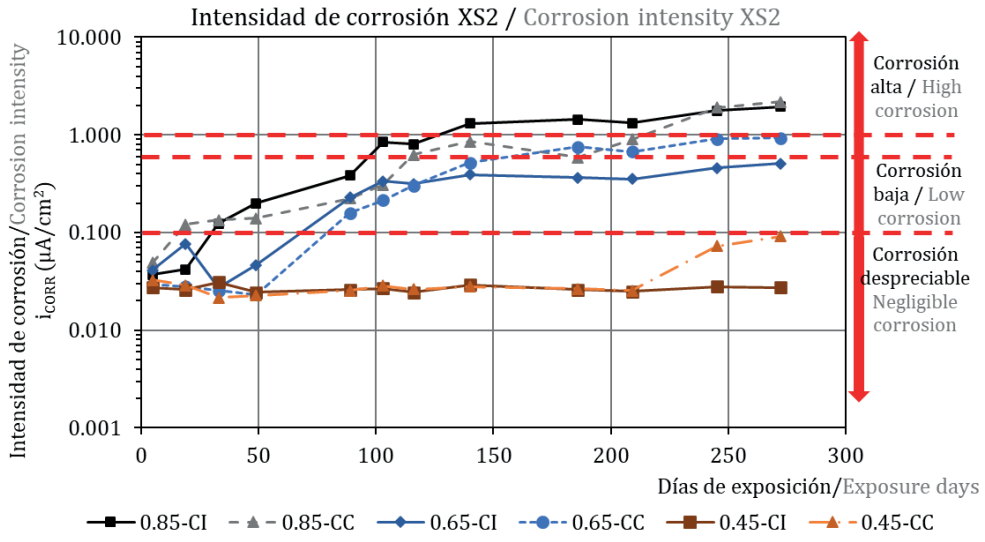


Imagen 4. Resultados (XS2). Image 4. Results (XS2).

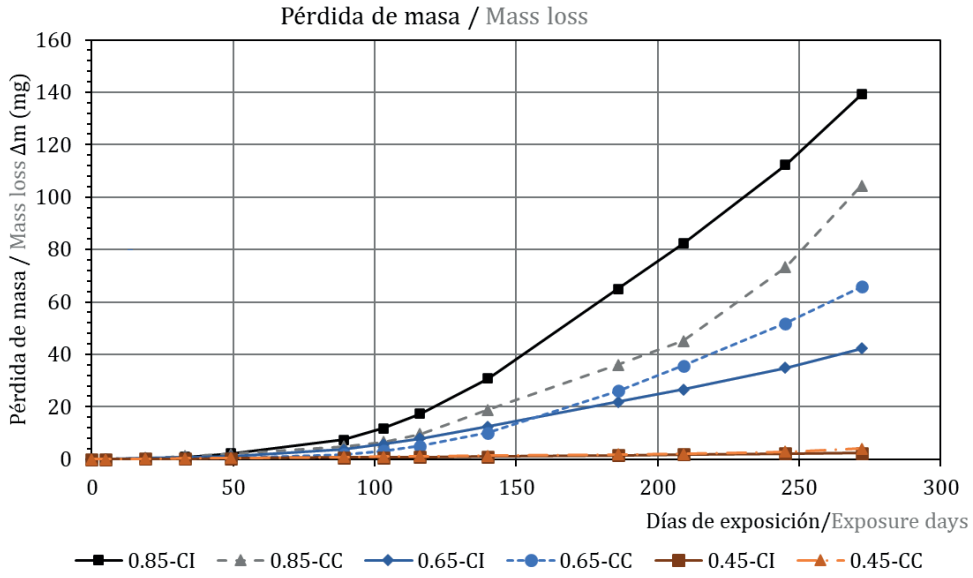


Imagen 5. Pérdida de masa acumulada (XS2). Image 5. Accumulated mass loss (XS2).

Conclusions

The present study, together with the first part that precedes it, has made it possible to analyse the influence that curing can have on the performance of reinforced concrete. In this work, a case of corrosion monitoring of reinforcement embedded in different concretes cured in a chamber and cured in the open air is presented. The lack of adequate curing leads to a decrease in the durability of the material (higher porosity or lower resistance to the penetration of aggressive agents), which results in the development of faster corrosion processes, favouring the accumulated damage. In this case, damage increases of between 25% and 40% were detected, depending on the quality of the concrete. However, in better quality concrete, the differences were negligible, demonstrating that it is necessary to continue with the monitoring study.

Acknowledgements

The authors thank the Generalitat Valenciana Government for the postdoctoral mobility scholarship granted to Josep Ramon Lliso Ferrando (CIBEST/2023/83).

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- Aïtcin, Pierre Claude. 2000. "Cements of Yesterday and Today - Concrete of Tomorrow." *Cement and Concrete Research* 30 (9): 1349–59. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00365-3.
- Andrade, C., and C. Alonso. 2004. "Recommendations of RILEM TC-154-EMC: 'Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion' Test Methods for on-Site Corrosion Rate Measurement of Steel Reinforcement in Concrete by Means of the Polarization Resistance Method." *Materials and Structures* 37 (273): 623–43. https://doi.org/10.1617/13952.
- Baroghel-Bouny, V. 2004. "Conception Des Bétons Pour Une Durée de Vie Donnée Des Ouvrages—Maîtrise de La Durabilité Vis-à-Vis de La Corrosion Des Armatures et de l'alcali-Réaction—Etat de l'art et Guide Pour La Mise En Oeuvre d'une Approche Performantielle et Prédictive Sur La Bas." Bagneux, France. http://eprints.uanl.mx/5481/1/1020149995.PDF.
- Ismail, Sallehan, Wai Hoe Kwan, and Mahyuddin Ramli. 2017. "Mechanical Strength and Durability Properties of Concrete Containing Treated Recycled Concrete Aggregates under Different Curing Conditions." *Construction and Building Materials* 155: 296–306. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.076.
- Lliso-ferrando, Josep Ramon, Ana Mart, Enrique Ram, and Manuel Gand. 2024. "Applied Sciences Corrosion Assessment in Reinforced Concrete Structures by Means of Embedded Sensors and Multivariate Analysis — Part 2 : Implementation."
- Martínez-Ibernón, A., J. E. Ramón, J. M. Gandía-Romero, I. Gasch, M. Valcuende, M. Alcañiz, and J. Soto. 2019. "Characterization of Electrochemical Systems Using Potential Step Voltammetry. Part II: Modeling of Reversible Systems." *Electrochimica Acta* 328. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135111.
- Maslehuddin, M., M. Ibrahim, M. Shameem, M. R. Ali, and M. H. Al-Mehthel. 2013. "Effect of Curing Methods on Shrinkage and Corrosion Resistance of Concrete." *Construction and Building Materials* 41: 634–41. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.064.
- Ministerio de Transportes Mov. y A. U. Gobierno de España. 2022. *Código Estructural*.
- Ramón-Zamora, J.E., J.R. Lliso-Ferrando, A. Martínez-Ibernón, and J. M. Gandiá-Romero. 2023. "Corrosion Assessment in Reinforced Concrete Structures by Means of Embedded Sensors and Multivariate Analysis . Part 1 : Laboratory Validation." *Sensors* 23 (21). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s23218869.
- Ramón, J. E., J. M. Gandía-Romero, R. Bataller, M. Alcañiz, M. Valcuende, and J. Soto. 2020. "Potential Step Voltammetry: An Approach to Corrosion Rate Measurement of Reinforcements in Concrete." *Cement and Concrete Composites* 110 (4). https://doi.org/10.1016/.2020.103590.
- Ramón, J. E., A. Martínez-Ibernón, J. M. Gandía-Romero, R. Fraile, R. Bataller, M. Alcañiz, E. García-Breijo, and J. Soto. 2019. "Characterization of Electrochemical Systems Using Potential Step Voltammetry. Part I: Modeling by Means of Equivalent Circuits." *Electrochimica Acta* 323. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.134702.
- Ramón, José E., José M. Gandía-Romero, Román Bataller, Juan A. López, Manuel Valcuende, and Juan Soto. 2022. "Real-Time Corrosion Monitoring of an Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete Offshore Raft by Using an Autonomous Sensor System." *Structural Control and Health Monitoring* 29 (11): 1–16. https://doi.org/10.1002/stc.3102.
- Silva, R. V., J. De Brito, and Nabajyoti Saikia. 2013. "Influence of Curing Conditions on the Durability-Related Performance of Concrete Made with Selected Plastic Waste Aggregates." *Cement and Concrete Composites* 35 (1): 23–31. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.017.
- Wang, Wei, Jian Liu, Franck Agostini, Catherine A. Davy, Frédéric Skoczylas, and Dominique Corvez. 2014. "Durability of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) under Progressive Aging." *Cement and Concrete Research* 55: 1–13. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.09.008.
- Wang, Yanhai, Rui Xiao, Hang Lu, Wei Hu, Xi Jiang, and Baoshan Huang. 2023. "Effect of Curing Conditions on the Strength and Durability of Air Entrained Concrete with and without Fly Ash." *Cleaner Materials* 7 (2022): 100170. https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100170.

EVALUACIÓN DE INHIBIDOR DE LA CORROSIÓN APLICADO EN SUPERFICIE EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO. PARTE 1. APLICACIÓN AL INICIO DE LA VIDA ÚTIL

SURFACE-APPLIED CORROSION INHIBITOR EVALUTAION ON REINFORCED CONCRETE STRUCTURES. PART 1. APPLICATION AT THE BEGINNING OF THE SERVICE LIFE

Josep Ramon Lliso-Ferrando
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Vanesa Pilar Nzang Ondo
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación (ETSIE), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: vanzaon@edificacion.upv.es
School of Building Engineering. Universitat Politècnica de València. E-mail: vanzaon@edificacion.upv.es
Ana Martínez-Ibernón
Investigadora en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Isabel Gasch-Molina
Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: igasch@mes.upv.es
Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: igasch@mes.upv.es
José Manuel Gandía-Romero
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: joganro@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: joganro@csa.upv.es
Manuel Valcuende Payá
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es

Abstract

Corrosion is one of the main causes of deterioration and durability loss in reinforced concrete structures. Environmental exposure conditions play a key role in this process, being, in the case of Valencia, determinant due to the proximity to the coast (marine environment). To prevent corrosion, it is common to find in the design codes and standards recommendations regarding the concrete cover or the quality of it. However, this is only useful for new structures. In the case of existing structures, it is much more complex to act to prevent corrosion. One of the most widespread methods is the use of corrosion inhibitors, with surface-applied corrosion inhibitors being the easiest to use. This paper presents a case study where corrosion was monitored for 8 months in reinforced concrete specimens made with six different concretes (exposure conditions XS3). For each concrete, 8 specimens were manufactured. In four specimens, a surface applied corrosion inhibitor (commercial model) was applied while no treatment was applied in the other four specimens. The results obtained allowed to demonstrate the impact on durability that the use of preventive methods can have on existing reinforced concrete structures located in marine environments.

Keywords
Concrete, Curing Conditions, Durability, Corrosion Monitoring, Sensors, Corrosion Inhibitor

Introducción

La corrosión es una de las principales causas de deterioro de las estructuras de hormigón armado (Rodrigues et al. 2021). Este fenómeno electroquímico conduce a un descenso del rendimiento de estas construcciones hasta alcanzar límites a partir de los cuales ya no son aptas para el servicio. Esto repercute en un descenso de la vida útil de las mismas (Ramón-Zamora et al. 2023). En 1982, el investigador sueco Tuutti ya presentó un modelo que relacionaba daño por corrosión y vida útil de las estructuras de hormigón armado dividido en dos etapas: periodo de iniciación, cuando el daño por corrosión se considera despreciable pero los agentes precursores de la misma van difundiendo a través del hormigón, y periodo de propagación, cuando el daño se inicia y crece a lo largo del tiempo (Imagen 1) (Tuutti 1982). A partir de trabajos previos, se ha relacionado este diagrama con la evolución de la pérdida de rendimiento de las estructuras (Lliso-Ferrando 2022). A medida que el daño por corrosión se propaga, las estructuras sufren una merma de su capacidad hasta alcanzar valores límites por lo que estas ya no son aptas para el servicio. En función de las calidades del hormigón o de la utilización de medidas preventivas, esta evolución puede sufrir cambios que aseguren alcanzar la vida útil de las estructuras, tal y como se muestra en la Imagen 1.

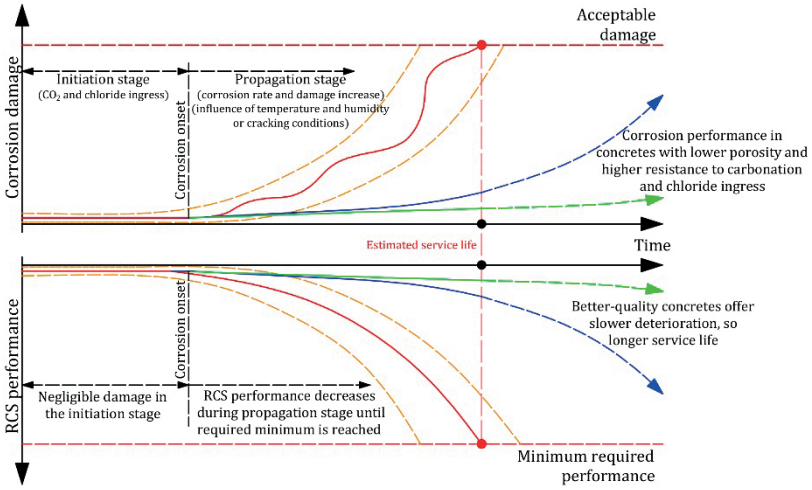


Imagen 1. Vida útil de las estructuras de hormigón armado. Image 1. Service life of reinforced concrete structures.

Actualmente, las normativas que regulan el diseño y ejecución de las construcciones de hormigón armado plantean diferentes métodos para prevenir daños prematuros por corrosión. Entre las medidas más habituales, destacan unos estándares mínimos de las dosificaciones (valores máximos en la relación agua cemento o contenido mínimo de cemento en función de la clase de exposición), calidad de los materiales (recomendaciones sobre el tipo de cemento a emplear en función del ambiente de exposición) o recomendaciones de diseño (incluyendo recubrimientos mínimos) (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022). Como se puede ver, las medidas incluidas en las recomendaciones y estándares actuales están centradas en la fase de diseño, sin embargo, el proceso de ejecución puede alterar diferentes aspectos: modificaciones puntuales de la dosificación, una colocación inadecuada que no asegure los recubrimientos adecuados, o un curado deficiente que genere incrementos en la porosidad del material o descensos en la resistencia a la penetración de agentes agresivos, como los cloruros (Geiker 2012). Debido a esto, en algunos casos se opta por añadir, a las acciones anteriormente descritas, protecciones superficiales que generen barreras que permitan impermeabilizar el hormigón. Estas medidas se definen como "principios" en la norma UNE EN-1504 (AENOR 2024). Se trata de un documento que establece los términos relativos a los productos y sistemas utilizados para la reparación, el mantenimiento y la protección, la restauración y el refuerzo de las estructuras de hormigón. Este documento recoge un total de 11 principios con medidas preventivas o paliativas de los daños por corrosión en estructuras de hormigón armado. En su Principio Primero, la norma recoge medidas para la protección contra la penetración, centradas en la reducción o prevención de la entrada de agentes adversos como agua, otros líquidos, vapor, gas, agentes químicos o biológicos. En este apartado, la norma distingue 8 métodos de protección que a continuación se describen.

Introduction

Corrosion is one of the main causes of deterioration of reinforced concrete structures (Rodrigues et al. 2021). This electrochemical phenomenon leads to a decrease in the performance of these constructions until they reach limits beyond which they are no longer fit for service, shortening their service life period (Ramón-Zamora et al. 2023). In 1982, the Swedish researcher Tuutti already presented a model relating corrosion damage and service life of reinforced concrete structures divided into two stages: initiation period, when corrosion damage is considered negligible, but the corrosion precursors are diffusing through the concrete, and propagation period, when the damage starts and grows over time (Image 1) (Tuutti 1982). From previous works, this diagram has been related to the corrosion performance of reinforced concrete structures (Lliso-Ferrando 2022). As corrosion damage increases, structures suffer a decrease in their performance until they reach limit values and are no longer fit for service. Depending on the qualities of the concrete or the use of preventive measures, this evolution can undergo changes that ensure that the service life of the structures is achieved, as shown in Image 1.

Currently, the regulations governing the design and execution of reinforced concrete constructions propose different methods to prevent premature corrosion damage. Among the most common measures are minimum dosage standards (maximum values in the water-cement ratio or minimum cement content depending on the exposure class), quality of materials (recommendations on the type of cement to be used depending on the exposure environment) or design recommendations (including minimum concrete cover) (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022). As can be seen, the measures included in the current recommendations and standards focus on the design phase; however, the execution process can alter different aspects: punctual modifications of the dosage, inadequate placement that does not ensure adequate concrete cover, or deficient curing that generates increases in the material's porosity or decreases in the resistance to the penetration of aggressive agents, such as chlorides (Geiker 2012).

Due to this, in some cases it is decided to add, to the actions described above, surface protections that generate barriers that allow the concrete to be waterproofed. These measures are defined as "principles" in the UNE EN-1504 standard (AENOR 2024). This is a document that establishes the terms relating to the products and systems used for the repair, maintenance and protection, restoration and reinforcement of concrete structures. This document contains a total of 11 principles with preventive or palliative measures for corrosion damage to reinforced concrete structures. In its First Principle, the standard includes measures for protection against penetration, focused on reducing or preventing the ingress of adverse agents such as water, other liquids, steam, gas, chemical or biological agents. In this section, the standard distinguishes 8 protection methods, which are described below.

- Use of water-repellent impregnations, which generate a water-repellent surface. The pores are coated, but not filled. This reduces the surface tension of the water, preventing it from passing through the pores, but allowing vapour diffusion.
- Use of impregnations, which reduce surface porosity while reinforcing the surface. All pores and capillaries are totally or partially filled with a layer of between 10 and 100 microns, blocking the entry of aggressive agents.
- Use of surface coatings, providing a second layer of coating that can even bridge cracks.
- Cracks with local bandaging, applied to prevent the entry of aggressive agents as a second skin in specific areas, such as a cracked area, or concrete joints.
- Filling and sealing of cracks, especially those without movement, such as those caused by shrinkage.
- Filling and sealing of cracks with movement with suitable materials, elastic or flexible, that ensure the clogging of the damage over time.
- Application of exterior panels that protect the concrete, useful in the execution of ventilated facades, protecting from the external environment and from the entrance of aggressive agents.
- Creation of prefabricated or liquid membranes that protect the concrete surface from the entry of aggressive or damaging agents.

- Utilización de impregnaciones hidrófugas, que generan una superficie repelente al agua. Los poros se revisten, pero no se rellenan. Esto reduce la tensión superficial del agua, previniendo que pase a través de los poros, pero permitiendo la difusión del vapor.
- Utilización de impregnaciones, que reducen la porosidad superficial al mismo tiempo que refuerzan la superficie. Todos los poros y capilares se rellenan total o parcialmente con una capa de entre 10 y 100 micras, bloqueando la entrada de agentes agresivos.
- Utilización de revestimientos superficiales, proporcionando una segunda capa de recubrimiento que puede incluso puentear las fisuras.
- Fisuras con vendaje local, aplicadas para prevenir la entrada de agentes agresivos como una segunda piel en zonas concretas, como podría ser una zona con fisuras, o juntas de hormigonado.
- Relleno y sellado de fisuras, especialmente de aquellas sin movimiento, como podrían ser las originadas por retracción.
- Relleno y sellado de fisuras con movimiento con materiales adecuados, elásticos o flexibles, que aseguren la colmatación del daño a lo largo del tiempo.
- Aplicación de paneles exteriores que protejan al hormigón, útil en la ejecución de fachadas ventiladas, protegiendo del ambiente exterior y de la entrada de agentes agresivos.
- Creación de membranas prefabricadas o líquidas que protejan la superficie del hormigón de la entrada de agentes agresivos o dañinos.

Como se puede ver, las medidas descritas se centran en generar una segunda piel que, junto con el recubrimiento de las armaduras, asegure un periodo de iniciación lo suficientemente largo para evitar daños prematuros antes de alcanzar la vida útil para la que la estructura fue diseñada.

Actualmente existen numerosos productos centrados en cumplir cada una de las metodologías de protección descritas anteriormente. Cada ficha técnica de los productos existentes indica las propiedades que puede aportar, sin embargo, ofrecen un punto de vista que no refleja realmente cómo pueden influir en las construcciones de hormigón armado. Debido a esto, en este trabajo se presenta un caso de estudio llevado a cabo a lo largo de casi un año, en el que se monitorizó la corrosión sobre elementos de hormigón armado sometidos a unas condiciones de exposición XS3 en las que se aplicó un inhibidor de la corrosión aplicado en superficie como impregnación hidrófuga previa al inicio de la exposición. Los resultados obtenidos se compararon con los resultados de muestras donde no se aplicó la impregnación. El estudio se realizó sobre 6 hormigones con distintas características para observar la efectividad del producto comercial empleado.

Plan Experimental

Materiales y Probetas

Para llevar a cabo el estudio que se presenta en este trabajo, en primer lugar, se prepararon una serie de armaduras como las que se describen en la Imagen 2. Estas armaduras (Ø10 mm) fueron conformadas con acero B500 SD y se caracterizan por tener acotada la superficie en contacto con el hormigón a 60 mm (18.85 cm^2). Esto se logró implementando un encamisado con tubería de PVC y resina epoxi. El extremo superior se liberó para facilitar las conexiones eléctricas durante el periodo de estudio.

Las armaduras fueron embebidas en probetas cúbicas de 150 mm, tal y como se describe en la Imagen 2, con un recubrimiento de 15 mm. Para asegurar una correcta colocación, se utilizaron separadores plásticos fabricados mediante impresión 3D.

Para la fabricación de las probetas descritas anteriormente se emplearon 6 dosificaciones distintas (tres relaciones agua/cemento distintas), con dos lotes por cada una, curadas en condiciones adecuadas (cámara de curado) (CC) y expuestas a la intemperie (EI)). Para la fabricación de los 6 hormigones, se utilizó un cemento CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R. Los áridos utilizados fueron de tipo silíceo, arena 0/4 y grava 4/8. Además, como aditivo para conseguir una trabajabilidad adecuada (fluida), se utilizó un superplastificante de la casa comercial Sika, modelo Sika® ViscoCrete®-20 HE. Las dosificaciones para 1 m^3 de hormigón se describen en la Tabla 1.

As can be seen, the measures described above focus on generating a second skin, which, together with the concrete cover, ensure a sufficiently long initiation period to avoid premature damage before reaching the service life for which the structure was designed.

There are currently numerous products focused on meeting each of the protection methodologies described above. Each existing product data sheet indicates the properties it can provide. However, they offer a point of view that does not really reflect how they can influence reinforced concrete constructions. Because of this, this paper presents a case study carried out over almost a year, in which corrosion was monitored on reinforced concrete elements subjected to XS3 exposure conditions in which a surface-applied corrosion inhibitor was applied as a hydrophobic impregnation prior to the start of exposure. The results obtained were compared with the results of samples where the impregnation was not applied. The study was carried out on 6 concretes with different characteristics to observe the effectiveness of the commercial product used.

Experimental Plan

Materials and Test Specimens

To carry out the study presented in this work, first, a series of rebars were prepared as described in Image 2. These rebars (Ø10 mm) were formed with B500 SD steel and are characterized by having the surface in contact with the concrete limited to 60 mm (18.85 cm^2). This was achieved by using PVC pipe and epoxy resin. The upper end was released to facilitate electrical connections during the study period.

The reinforcement was embedded in 150 mm cubic specimens, as described in Image 2, with a 15 mm overlay. To ensure correct placement, plastic spacers manufactured by 3D printing were used.

For the manufacture of the specimens described above, 6 different dosages (three different water/cement ratios) were used, with two batches for each, cured in suitable conditions (curing chamber (CC) and exposed to weathering (EI)). CEM II/B-M (S-LL) 42.5 R cement was used for the manufacture of the 6 concretes. The aggregates used were of the siliceous type, 0/4 sand and 4/8 gravel. In addition, a superplasticizer from Sika, model Sika® ViscoCrete®-20 HE, was used as an additive to achieve adequate (fluid) workability. The dosages for 1 m^3 of concrete are described in Table 1.

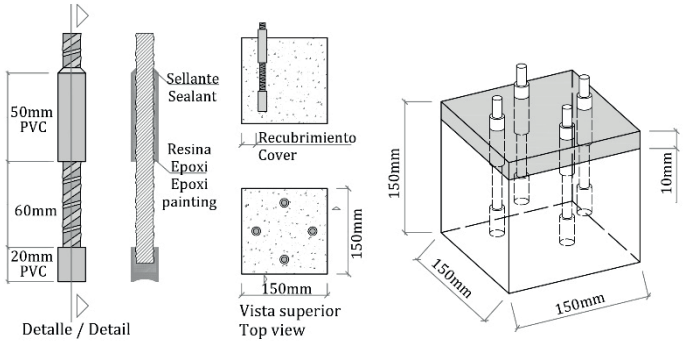


Imagen 2. Sensores y probetas de ensayo. Image 2. Sensors and test specimens.

Tabla 1. Dosificaciones de los tres hormigones fabricados (kg/m^3).
Table 1. Dosages of the three manufactured concretes (kg/m^3).

	0.45	0.65	0.85
Relación agua/cemento / Water/cement ratio	0.45	0.65	0.85
Agua / Water	185.91	186.55	186.89
Cemento / Cement	417.8	289.2	221.2
Superplastificante / Superplasticizer	2.09	1.45	1.11
Arena 0/4 / Sand 0/4	1,183.32	1,255.93	1,294.37
Grava 4/8 / Gravel 4/8	665.95	706.81	728.45

Por cada hormigón se fabricaron 2 probetas, que se mantuvieron en sus moldes las primeras 24 horas. Tras este periodo las probetas fueron desmoldadas y se procedió al curado de cada grupo, que se extendió hasta la edad de 28 días, cuando comenzó el periodo de exposición. Previo a esto, se aplicó una pintura impermeabilizante en varias capas en la cara superior y 10 mm de las caras laterales, para evitar la entrada de cloruros por esas zonas, sobre todo, el saliente de las armaduras (tal y como se ha indicado en la Imagen 2).

Condiciones de exposición

Una vez acondicionadas las probetas, estas fueron sometidas a unas condiciones de exposición que reprodujeran la agresividad ambiental XS3 descrita en el Código Estructural y que se corresponde con la probabilidad por corrosión de las armaduras por la presencia de cloruros en zona de mareas. Para llevar a cabo todo ello, las probetas fueron almacenadas en dos contenedores que contenían agua con sal (3% de NaCl) simulando la concentración del agua de mar. Las probetas quedaron cubiertas hasta 10 mm por debajo de la cara superior. Con la ayuda de dos bombas modelo iL280P/iL280P-24 y dos programadores de tipo enchufe modelo Garza se generó un desplazamiento del agua de un contenedor a otro de manera que las probetas permanecieran 12 horas sumergidas y otras 12 horas aireadas. Estas condiciones, descritas en la Imagen 3, se mantuvieron durante casi un año.



Imagen 3. Condiciones de exposición. Image 3. Exposure conditions.

Monitorización de la corrosión

Durante casi un año las armaduras de cada probeta fueron monitorizadas, analizando periódicamente su intensidad de corrosión. Para ello, se utilizó la técnica electroquímica presentada en anteriores trabajos por el grupo de investigación y definida como PSV (*Potential Step Voltammetry*) (Ramón et al. 2020; Ramón et al. 2022). Se trata de una técnica centrada en reproducir las regiones rectas de las ramas anódicas y catódicas de Tafel mediante una serie de puntos discretos a partir de una perturbación de tipo potenciostático y la interpretación de la respuesta con circuitos equivalentes.

Las medidas se realizaron con una serie de microprocesadores programados con la técnica de pulsos descrita, y con capacidad para analizar 10 sensores al mismo tiempo, lo que agilizó todas las tareas de monitorización. En la Imagen 4 e muestran imágenes de estas tareas.

Resultados

En paralelo al estudio de monitorización de la corrosión se realizaron una serie de ensayos para caracterizar el material recogidos en trabajos previos. En este trabajo se recogen los resultados de la monitorización de la corrosión, agrupados en las imágenes 5 a 8. Las leyendas están referenciadas a la relación agua/cemento de la dosificación (0,45, 0,65 y 0,85), las condiciones de curado (CC y EI) y si cuentan o no con inhibidor de la corrosión (Sin Inhibidor, SI y Con Inhibidor, CI). Además, se han señalado los umbrales definidos en las recomendaciones RILEM (Andrade and Alonso 2004).

Como se puede apreciar, existe una gran diferencia de resultados en función de las casuísticas de estudio definidas previamente. En los hormigones 0,45 el corto periodo de tiempo de estudio ha impedido evidenciar niveles de corrosión por encima de lo que se considera el estado pasivo de las armaduras. Este hecho ha impedido que se pudiera validar la efectividad del producto analizado. Sin embargo, en las muestras 0,65 y 0,85 sí que ha sido posible apreciar diferencias. Por lo general, las muestras que no fueron protegidas con el inhibidor de la corrosión alcanzaron niveles de corrosión entre 5 y 10 veces más altos que los productos protegidos. Este hecho demuestra la efectividad del producto implementado y las ventajas que puede aportar su implementación en estructuras de hormigón armado previo al inicio de las condiciones de exposición o en edades tempranas.

For each concrete, 2 specimens were manufactured. They were kept in their moulds for the first 24 hours. After this period, the specimens were demoulded and each group was cured until the age of 28 days, when the exposure period began. Prior to this, a waterproofing paint was applied in several layers on the upper face and 10 mm of the lateral faces, to prevent the entry of chlorides through these areas, especially the overhang of the reinforcement (as shown in Image 2).

Exposure Conditions

Once the specimens were conditioned, they were subjected to exposure conditions that reproduced the environmental aggressiveness XS3 described in the Spanish Structural Standard and that corresponds to the probability of corrosion of the reinforcement due to the presence of chlorides in the tidal zone. For this purpose, the specimens were stored in two containers containing salt water (3% NaCl) simulating the concentration of seawater. The specimens were covered up to 10 mm below the top face. With the help of two iL280P/iL280P-24 pumps and two Garza plug-in programmers, the water was displaced from one container to the other so that the specimens remained submerged for 12 hours and aerated for another 12 hours. These conditions were maintained for almost one year (Image 3).

Corrosion Monitoring

For almost a year, the reinforcements of each specimen were monitored, periodically analysing their corrosion intensity. For this purpose, the electrochemical technique presented in previous works by the research group and defined as PSV (*Potential Step Voltammetry*) was used (Ramón et al. 2020; Ramón et al. 2022). It is a technique focused on reproducing the straight regions of the anodic and cathodic Tafel slopes by means of a series of discrete points from a potentiostatic type perturbation and the interpretation of the response obtained with equivalent circuits.

The measurements were performed with a series of microprocessors programmed with the pulse technique described, and with the capacity to analyse 10 sensors at the same time, which expedited all the monitoring tasks. Images of these tasks are shown in Image 4.

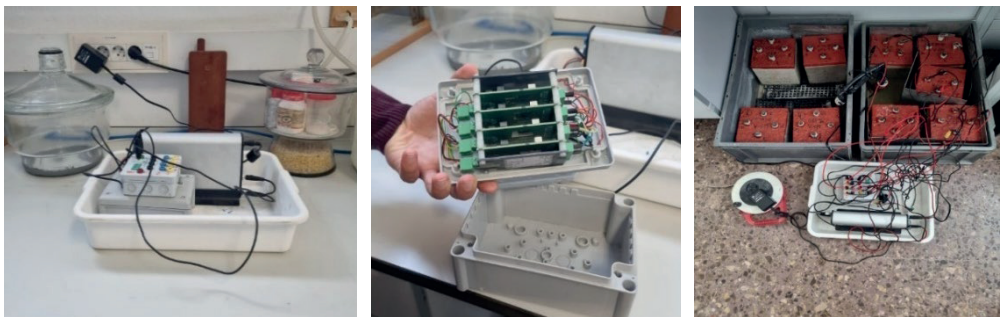


Imagen 4. Monitorización de la corrosión. Image 4. Corrosion monitoring.

Results

In parallel to the corrosion monitoring study, a series of tests were carried out to characterize the material, collected in previous works. In this work, the results of the corrosion monitoring are shown, grouped in images 5 to 8. The legends refer to the water/cement ratio of the dosage (0.45, 0.65 and 0.85), the curing conditions (CC and EI) and whether they have corrosion inhibitor (No Inhibitor, SI and With Inhibitor CI). In addition, the graphs show the thresholds defined in the RILEM recommendations (Andrade and Alonso 2004).

As can be seen, there is a great difference in the results according to the previously defined study cases. In the 0.45 concretes, the short period of time of study has prevented evidence of corrosion levels above what is considered the passive state of reinforcement. This fact has prevented validation of the effectiveness of the analysed product. However, in samples 0.65 and 0.85 it was possible to appreciate differences. In general, the samples that were not protected with the corrosion inhibitor reached corrosion levels between 5 and 10 times higher than the protected products. This fact demonstrates the effectiveness of the implemented product and the advantages that its implementation can bring in reinforced concrete structures prior to the onset of exposure conditions or at early ages.

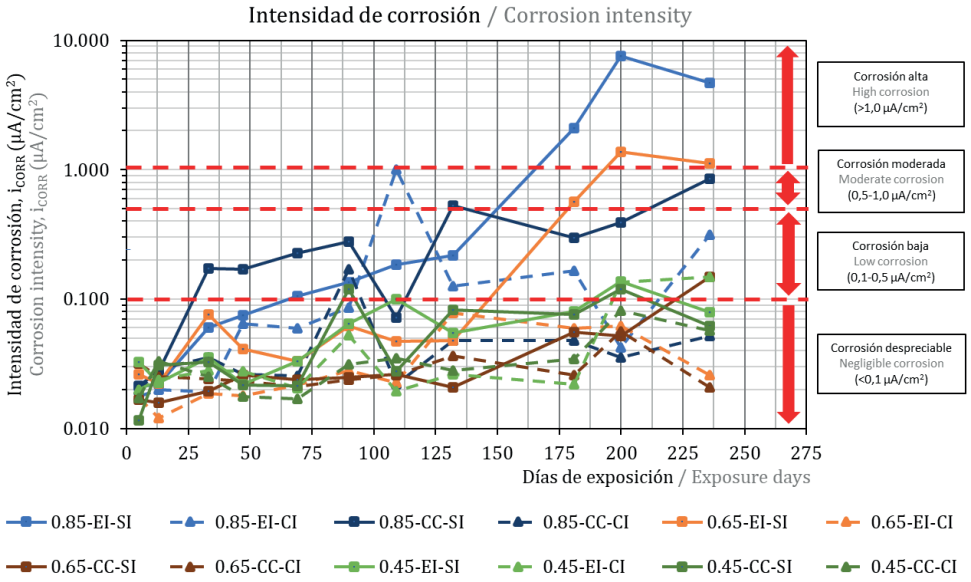


Imagen 5. Resultados de la monitorización de la corrosión. Image 5. Corrosion monitoring results.

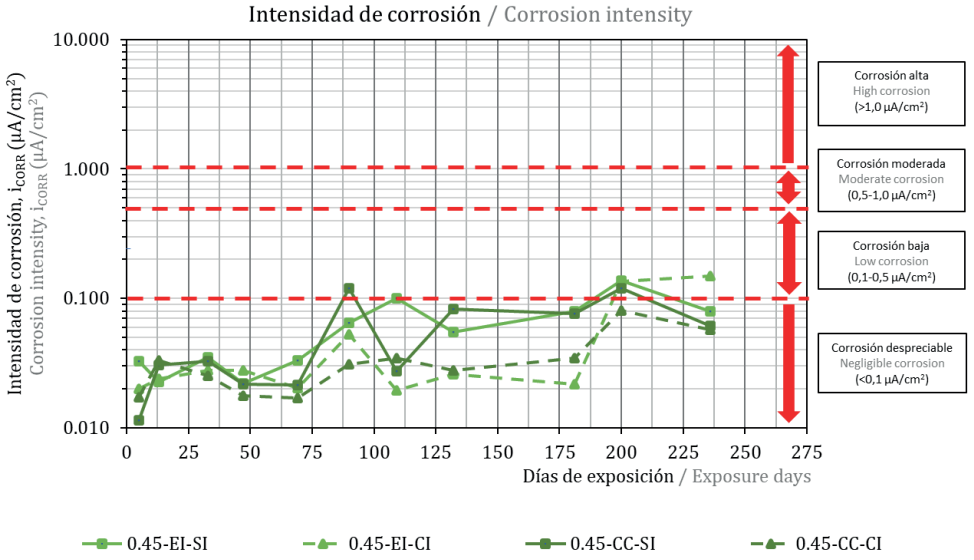


Imagen 6. Resultados de la monitorización de la corrosión (grupo 0,45). Image 6. Corrosion monitoring results (group 0.45).

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos durante la monitorización de la corrosión, que se extendió durante casi un año, se pudieron observar diferentes aspectos. En los hormigones con relación agua/cemento 0,45 los niveles de corrosión observados fueron en todos los casos bajos durante todo el periodo, lo que impidió validar el estudio sobre esta variante. Sin embargo, en los hormigones con una relación agua/cemento 0,65 sí que se observaron diferencias. El grupo de estudio en el que no se aplicó el inhibidor de la corrosión en superficie se evidenció un cambio de tendencia, alcanzando valores más altos, superiores a 1 µA/cm^2 en el caso de hormigón curado al aire, y de 0,1 µA/cm^2 en el caso de la variante curado en cámara. Estos datos demuestran, por un lado, la influencia del curado, pero, sobre todo, la idoneidad del producto analizado, y cómo puede prevenir daños por corrosión en un ambiente muy agresivo. El estudio sobre hormigones con una relación agua/cemento 0,85 también demostró ser determinante arrojando datos con mayor intensidad de corrosión. Los niveles de corrosión más altos se obtuvieron en el grupo de estudio sobre el que no se aplicó inhibidor de la corrosión (SP). En este caso, el hormigón no representa una aplicación real, pero fue determinante para obtener niveles de corrosión altos en un corto periodo de tiempo.

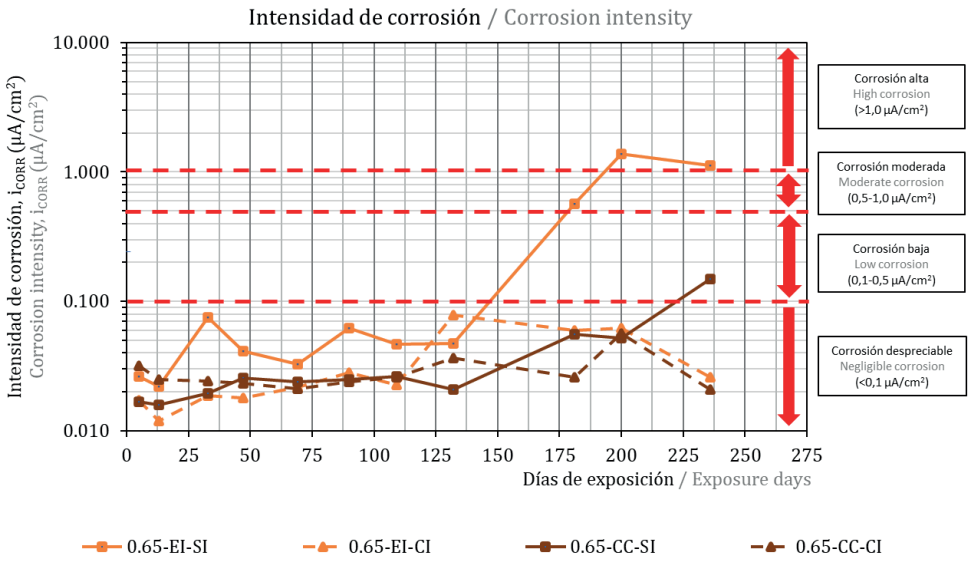


Imagen 7. Resultados de la monitorización de la corrosión (grupo 0,65). Image 7. Corrosion monitoring results (group 0.65).

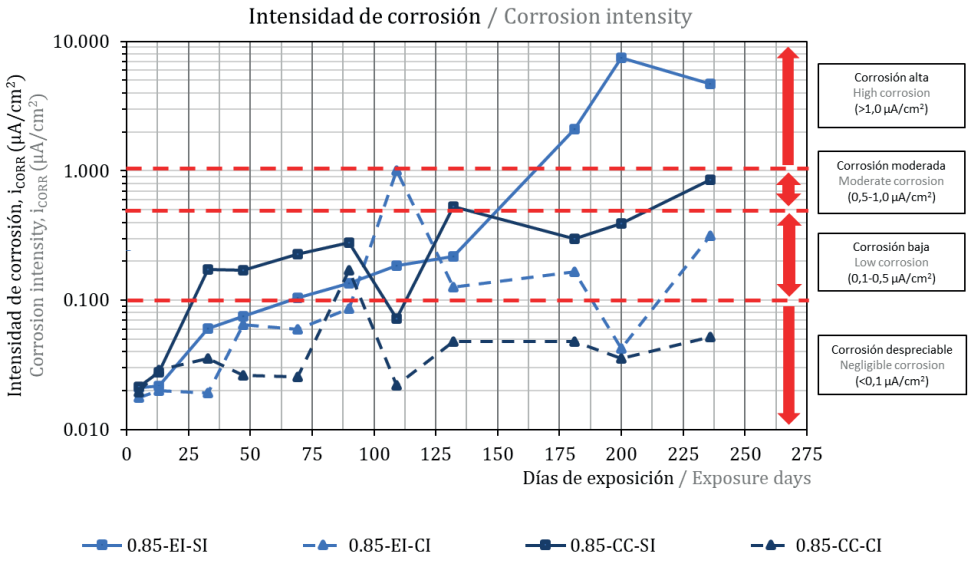


Imagen 8. Resultados de la monitorización de la corrosión (grupo 0,85). Image 8. Corrosion monitoring results (group 0.85).

Conclusions

From the results obtained during the corrosion monitoring, which lasted for almost a year, different aspects could be observed. In the concretes with a water/cement ratio of 0.45, the corrosion levels observed were in all cases low during the entire period, which prevented validation of the study in this study variant. However, in concretes with a water/cement ratio of 0.65, differences were observed. The study group in which the surface corrosion inhibitor was not applied showed a change in trend, reaching higher values of more than 1 µA/cm² in the case of air-cured concrete and 0.1 µA/cm² in the case of the chamber-cured variant. These data demonstrate, on the one hand, the influence of curing, but, above all, the suitability of the product analysed, and how it can prevent corrosion damage in a very aggressive environment. The study on concretes with a water/cement ratio of 0.85 also proved to be decisive, yielding data with higher corrosion intensity. The highest corrosion levels were obtained in the study group on which no corrosion inhibitor (SP) was applied. In this case, the concrete does not represent a real application, but it was decisive in obtaining high corrosion levels in a short period of time.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. 2024. *UNE-EN 1504:2005. Productos y Sistemas Para La Protección y Reparación de Estructuras de Hormigón*.
- Andrade, C., and C. Alonso. 2004. "Recommendations of RILEM TC-154-EMC: 'Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion' Test Methods for on-Site Corrosion Rate Measurement of Steel Reinforcement in Concrete by Means of the Polarization Resistance Method." *Materials and Structures* 37 (273): 623–43. https://doi.org/10.1617/13952.
- Geiker, M. R. 2012. "On the Importance of Execution for Obtaining the Designed Durability of Reinforced Concrete Structures." *Materials and Corrosion* 63 (12): 1114–18. https://doi.org/10.1002/maco.201206754.
- Lliso-Ferrando, J.R. 2022. "Monitorizacion de La Durabilidad de Estructuras Existentes de Hormigon Armado Mediante La Inserción de Una Red de Sensores." Universitat Politècnica de València.
- Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España. 2022. *Código Estructural*.
- Ramón-Zamora, J.E., J.R. Lliso-Ferrando, A. Martínez-Ibernón, and J. M. Gandiá-Romero. 2023. "Corrosion Assessment in Reinforced Concrete Structures by Means of Embedded Sensors and Multivariate Analysis . Part 1 : Laboratory Validation." *Sensors* 23 (21). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s23218869.
- Ramón, J. E., J. M. Gandía-Romero, R. Bataller, M. Alcañiz, M. Valcuende, and J. Soto. 2020. "Potential Step Voltammetry: An Approach to Corrosion Rate Measurement of Reinforcements in Concrete." *Cement and Concrete Composites* 110 (4). https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103590.
- Ramón, José Enrique, Isabel Martínez, José Manuel Gandía-Romero, and Juan Soto. 2022. "Improved Tafel-Based Potentiostatic Approach for Corrosion Rate Monitoring of Reinforcing Steel." *Journal of Nondestructive Evaluation* 41 (4). https://doi.org/10.1007/s10921-022-00903-z.
- Rodrigues, Romain, Stéphane Gaboreau, Julien Gance, Ioannis Ignatiadis, and Stéphanie Betelu. 2021. "Reinforced Concrete Structures: A Review of Corrosion Mechanisms and Advances in Electrical Methods for Corrosion Monitoring." *Construction and Building Materials* 269: 121240. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121240.
- Tuutti, Kyösti. 1982. "Corrosion of Steel in Concrete." Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research instittute.

EVALUACIÓN DE INHIBIDOR DE LA CORROSIÓN APLICADO EN SUPERFICIE EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO. PARTE 2. APLICACIÓN DURANTE EL PERIODO DE SERVICIO

SURFACE-APPLIED CORROSION INHIBITOR EVALUATION ON REINFORCED CONCRETE STRUCTURES. PART 2. APPLICATION DURING THE SERVICE LIFE

Josep Ramon Lliso-Ferrando
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Vanesa Pilar Nzang Ondo
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación (ETSIE), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: vanzaon@edificacion.upv.es
School of Building Engineering. Universitat Politècnica de València. E-mail: vanzaon@edificacion.upv.es
Ana Martínez-Ibernón
Investigadora en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Isabel Gasch-Molina
Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: igasch@mes.upv.es
Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: igasch@mes.upv.es
José Manuel Gandía-Romero
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: joganro@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: joganro@csa.upv.es
Manuel Valcuende Payá
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es

Abstract

Corrosion is one of the most frequent damages in reinforced concrete structures and one of the most common problems associated with it: reduced service life, durability problems, high costs associated with periodic inspections and repairs, structural safety problems and a high environmental impact. One of the main reasons that lead to all this is that it is an electrochemical process of late detection if periodic tests are not carried out. This is a major problem. To reduce costs, in many structures, surface protections are implemented to ensure added protection for the reinforcement by preventing corrosion: surface applied corrosion inhibitors. In the first part of the work, this principle of action has been validated on samples on which the inhibitor was applied before the exposure period. However, in many structures, this protection is added during the service life of the constructions. In this second part of the work, a study is presented in which the efficacy of the product studied is validated after several months of exposure, with the aim of verifying the validity of this principle of action.

Keywords
Concrete, Curing Conditions, Durability, Corrosion Monitoring, Sensors, Corrosion Inhibitor

Introducción

La corrosión es un daño muy frecuente en las construcciones de hormigón armado (Hu et al. 2022). Este proceso electroquímico lleva asociados problemas de distinta índole: merma en la vida útil de las estructuras y deterioro acelerado; necesidad de inspección y mantenimiento; costes tanto directos como indirectos derivados de las tareas de revisión, reparación, demolición o reconstrucción; riesgo humano debido a la merma en la seguridad estructural; y a todo ello se le debe sumar un alto impacto medioambiental debido al consumo de recursos que todo esto genera (Ramón-Zamora et al. 2023).

Entre los motivos que originan todos estos problemas destaca la detección tardía del daño por corrosión. La corrosión es un proceso electroquímico que se desarrolla internamente en las estructuras de hormigón armado y no es visible o perceptible al ojo humano hasta que se encuentra muy avanzado, cuando aparecen manchas de óxido o fisuras que originan el "splitting" o "spalling" del recubrimiento (Imagen 1) (Song and Saraswathy 2007). La falta de medios y equipos que se dediquen a la inspección periódica de las estructuras favorece el avance del daño internamente acrecentando el daño por corrosión, de manera que cuando se hace visible, las tareas de reparación suelen ser importantes y con un coste económico asociado alto (Verma, Bhadauria, and Akhtar 2014; Zaki et al. 2015).



Imagen 1. Daños por corrosión en estructura de hormigón armado. Image 1. Corrosion damage in reinforced concrete structure.

Debido a esto, muchas propiedades deciden aplicar protecciones a las construcciones de hormigón armado con la finalidad de mantener un riesgo de corrosión bajo durante la vida útil de las estructuras. No se trata de una actuación idónea, pero sí que se engloba entre los principios que recomienda la norma UNE-EN 1504 (AENOR 2024) y que se describieron en la primera parte de este trabajo. Se trata de productos normalmente monocomponentes, de baja viscosidad, que se pueden dividir en tres grandes grupos:

- productos que facilitan la creación de una membrana (repelente al agua) llegando a cubrir el interior de los poros y los capilares, pero sin llegar a rellenarlos;
- productos que generan capas impermeables mediante un proceso de impregnación en el que se reduce la porosidad y donde los poros y los capilares están completa o parcialmente rellenos;
- por último, los revestimientos, que generan una capa protectora continua en la superficie del hormigón, de entre 0,1 y 5 mm colmatando toda la superficie y reduciendo la porosidad accesible del material.

A pesar de que es posible encontrar numerosos ejemplos en el mercado, este estudio se centra en una impregnación hidrófuga inhibidora de la corrosión. Este producto comercial ya fue analizado en la primera parte del trabajo cuando se validó su funcionamiento si se aplica previamente a someter el hormigón a unas condiciones de exposición de agresividad alta. En este caso se trabajó sobre un ambiente de exposición XS3, correspondiente a la zona de mareas de una estructura de hormigón armado (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022). En estos casos los ciclos de humectación-secado y la presencia de cloruros favorecen la existencia de procesos de corrosión de las armaduras en un corto periodo de tiempo.

Introduction

Corrosion is very frequent damage in reinforced concrete constructions (Hu et al. 2022). This electrochemical process is associated with various problems: reduction in the service life of the structures and accelerated deterioration; the need for inspection and maintenance; direct and indirect costs derived from the tasks of revision, repair, demolition or reconstruction; human risk due to the reduction in structural safety; and to all this must be added a high environmental impact.

Among the reasons for all these problems is the late detection of corrosion damage. Corrosion is an electrochemical process that develops internally in reinforced concrete structures and is not visible or perceptible until it is very advanced, when rust stains or cracks appear, causing the "splitting" or "spalling" of the concrete cover (Image 1) (Song and Saraswathy 2007). The lack of means and equipment dedicated to the periodic inspection of the structures favours the advance of the damage internally, increasing the corrosion damage, so that when it becomes visible, the repair tasks are usually important and with a high associated economic cost (Ramón-Zamora et al. 2023) (Verma, Bhadauria, and Akhtar 2014; Zaki et al. 2015).

Because of this, many owners decide to apply protections to reinforced concrete constructions to maintain a low corrosion risk during the service life of the structures. This is not an ideal approach, but it does fall within the principles included in the UNE-EN 1504 (AENOR 2024) standard and described in the first part of this work. These are normally single-component, low-viscosity products, which can be divided into three main groups:

- products that facilitate the creation of a membrane (water-repellent) by covering the inside of the pores and capillaries, but without filling them;
- products that generate waterproof layers through an impregnation process in which the porosity is reduced and the pores and capillaries are completely or partially filled;
- finally, coatings, which generate a continuous protective layer on the surface of the concrete, between 0.1 and 5 mm, clogging the entire surface and reducing the accessible porosity of the material.

Although it is possible to find numerous examples in the market, this study focuses on a hydrophobic impregnation that inhibits corrosion. This commercial product was already analysed in the first part of the work when its performance was validated if it is applied prior to subjecting the concrete to high aggressiveness exposure conditions. In this case, the authors worked in an XS3 exposure environment, corresponding to the tidal zone of a reinforced concrete structure (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022). In these cases, the wetting-drying cycles and the presence of chlorides favour the existence of corrosion processes of reinforcement in a short period of time.

In the present work, an identical case study will be analysed, but in which the corrosion inhibitor is implemented once the reinforced concrete construction has already been exposed to environmental aggressiveness, with the aim of validating the product in a case closer to reality: when the corrosion risk is detected and a new layer of protection is implemented, which, added to the cover, will protect the reinforcement. For its validation, a corrosion monitoring process was carried out for three months (before applying the protection), and almost a year after its application, to check the effectiveness of the product. The samples on which the product was applied, as in the first part of the work, were also subjected to a highly aggressive exposure environment, such as the one defined in the Structural Code as XS3 (tidal zone). The results obtained were compared with samples where no protection was applied. The work was carried out on 6 concretes with different characteristics and properties.

Experimental Plan

Materials and Test Specimens

To carry out the study presented in this work, first, a series of rebars were prepared as described in Image 2. These are Ø10 mm rebars made of B500SD steel that were partially protected with a PVC pipe and filled with epoxy paint. The surface area in contact with the concrete was limited to 60 mm linear, generating a study area of 18.85 cm^2. The upper end was released to facilitate the measurement and electrical connection tasks during the study period. A total of 48 sensors were manufactured.

En el presente trabajo se analizará una casuística idéntica, pero en la que el inhibidor de corrosión se aplica una vez que la construcción de hormigón armado ya ha estado expuesta a la agresividad ambiental, con el objetivo de validar el producto en un caso más cercano a la realidad: cuando se detecta el riesgo de corrosión y se aplica una nueva capa de protección que, añadida al recubrimiento, proteja la armadura. Para su validación, se llevó a cabo un proceso de seguimiento de la corrosión durante tres meses (antes de aplicar la protección), y casi un año después de su aplicación, para comprobar la eficacia del producto. Las muestras sobre las que se aplicó el producto, al igual que en la primera parte del trabajo, también fueron sometidas a un ambiente de exposición altamente agresivo, como el definido en el Código Estructural como XS3 (zona de carreras de marea). Los resultados obtenidos se compararon con muestras en las que no se aplicó ninguna protección. Los trabajos se realizaron con 6 hormigones de características y propiedades diferentes.

Plan Experimental

Materiales y Probetas de ensayo

Para llevar a cabo el estudio que se presenta en este trabajo, en primer lugar, se prepararon una serie de armaduras como las que se describen en la Imagen 2. Se trata de armaduras de 10 mm de diámetro de acero B500SD que fueron parcialmente protegidas con un encamisado fabricado con tubería de PVC y rellenado con pintura epoxi. La superficie en contacto con el hormigón se limitó a 60 mm lineales, generando que el área de estudio fuera de 18,85 cm^2. El extremo superior fue liberado para facilitar las tareas de medida y conexión eléctrica durante el periodo de estudio. En total se fabricaron 48 sensores. Estos sensores fueron embebidos en probetas cúbicas de 150 mm de lado, tal y como se describe en la Imagen 2, dejando un recubrimiento entre la cara de exposición y la armadura de 15 mm. Por cada probeta se embebieron 4 sensores. Para asegurar su correcta colocación y evitar desplazamientos durante el hormigonado, se utilizaron separadores fabricados mediante impresión 3D que garantizaran el recubrimiento deseado.

Las probetas anteriormente descritas fueron fabricadas con 6 hormigones distintos, cuya dosificación se recoge en la Tabla 1 (referido a cantidad de material para la fabricación de 35 litros), una vez realizadas todas las correcciones de humedad de los áridos pertinentes. Se trata realmente de tres mezclas, con tres relaciones agua/cemento distintas: 0,45, 0,65 y 0,85. El objetivo era conseguir realizar un estudio en hormigones de distintas calidades y así validar el producto en varios escenarios. Por cada una de las relaciones descritas, se fabricaron dos hormigones, uno curado en cámara y en condiciones idóneas (20±2ºC y Humedad Relativa superior al 90%) (referido como BC, bien curado) y otro curado a la intemperie en la ciudad de Valencia (referido como MC, mal curado).

Para la fabricación de estos hormigones se empleó un cemento CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R y dos tipos de árido silíceo, arena 0/4 y grava 4/8. Además, en todas las mezclas se agregó a la dosificación un aditivo superplastificante con el objetivo de asegurar una trabajabilidad adecuada (fluida), de la casa comercial Sika, modelo Sika® ViscoCrete®-20 HE. El porcentaje añadido fue de entre un 0.5% y un 1.0% respecto al peso de cemento según necesidad.

Tabla 1. Dosificaciones de los seis hormigones fabricados (kg/35 L).
Table 1. Dosages of the six manufactured concretes (kg/35 L).

	0.85-MC	0.85-BC	0.65-MC	0.65-BC	0.45-MC	0.45-BC
Relación agua/cemento / Water/cement ratio	0,85	0,85	0,65	0,65	0,45	0,45
Agua / Water	6,35	6,39	6,12	6,51	6,41	6,38
Cemento / Cement	7,74	7,74	10,12	10,12	14,62	14,62
Superplastificante / Superplasticizer	0,04	0,04	0,05	0,05	0,07	0,07
Arena 0/4 / Sand 0/4	45,49	45,45	44,37	43,98	41,52	41,55
Grava 4/8 / Gravel 4/8	25,50	25,50	24,74	24,74	23,31	23,31

These sensors were embedded in cubic specimens of 150 mm side, as described in Image 2, leaving a 15 mm concrete cover. Four sensors were embedded in each specimen. To ensure their correct placement and avoid displacements during concreting, spacers manufactured by 3D printing were used to guarantee the desired cover.



Imagen 2. Fabricación de sensores y diseño de la probeta de estudio. Image 2. Sensor manufacture and test specimen design.

The specimens described above were manufactured with 6 different concretes, whose dosage is shown in Table 1 (referring to the amount of material for the manufacture of 35 litres, once all the relevant aggregate moisture corrections had been made). These are three mixtures, with three different water/cement ratios: 0.45, 0.65 and 0.85. The objective was to carry out a study on concretes of different qualities and thus validate the product in various scenarios. For each of the described ratios, two concretes were manufactured, one cured in a chamber under ideal conditions (20±2ºC and relative humidity above 90%) (referred to as BC, well cured) and the other cured outdoors in the city of Valencia (referred to as MC, poorly cured).

For the manufacture of these concretes, CEM II/B-M (S-LL) 42.5 R cement and two types of siliceous aggregate, 0/4 sand and 4/8 gravel, were used. In addition, in all the mixtures, a superplasticizer additive was added to the dosage to ensure adequate workability (fluid), from the commercial company Sika, model Sika® ViscoCrete®-20 HE. The percentage added was between 0.5% and 1.0% with respect to the weight of cement, according to need.

For each concrete, two specimens were manufactured as described in Image 2. The specimens, together with samples to characterize the materials, were cast in the Materials Laboratory of the Building Engineering School. These samples were stored in laboratory conditions during the first 24 hours in their moulds and protected with plastic sheets. After this period, the samples were demoulded and cured according to the previously described conditions until the age of 28 days.

Exposure Conditions and Corrosion Monitoring

After the first 28 days of age, the reinforced concrete specimens were partially protected with a waterproof painting, both on the upper face and on the upper 10 mm of the lateral faces. Once the paint had dried, all the specimens were immersed in seawater (solution with 3% NaCl concentration), up to the upper face. In the tanks where the specimens were housed, a water displacement system was installed with iL280P/iL280P-24 model pumps and two Garza model plug-in programmers. With both systems a tidal reproduction was created, in which the specimens remained 12 hours submerged, and 12 hours aerated, reproducing daily tidal cycles, thus simulating XS3 exposure conditions. These exposure conditions were maintained for almost a year.

The exposure period was stopped only once, after three months from the beginning. At that time, one specimen for each concrete was extracted from the tanks where they had been stored, and on the uncovered (not waterproofed) faces, the corrosion inhibitor under study in this work was applied in three coats, as recommended in the technical data sheet of the product. This variant will be referenced as IA (inhibitor applied), while the samples where the inhibitor was not applied will be referenced as LI (free of inhibitor). Once the hydrophobic impregnation had dried, the specimens were returned to the containers and the exposure period continued.

Por cada hormigón se fabricaron dos probetas como las descritas en la Imagen 2. Las probetas, junto con muestras para caracterizar los materiales, fueron hormigonadas en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación. Estas muestras fueron almacenadas en condición de laboratorio durante las primeras 24 horas en sus moldes y protegidas con telas plásticas. Transcurrido este periodo de tiempo, las muestras fueron desmoldadas y curadas según las condiciones anteriormente descritas hasta la edad de 28 días.

Condiciones de Exposición y Monitorización de la Corrosión

Una vez transcurridos los primeros 28 días de edad, las probetas de hormigón armado fueron parcialmente protegidas con una pintura impermeabilizante aplicada en varias manos, tanto en la cara superior como en los 10 mm superiores de las caras laterales. Una vez seca la pintura, todas las muestras fueron sumergidas en agua de mar (disolución con 3% de concentración de NaCl), hasta la cara superior. En los depósitos donde las probetas fueron alojadas se instaló un sistema de desplazamiento de agua con bombas modelo tipo iL280P/iL280P-24 y dos programadores de tipo enchufe modelo Garza. Con ambos sistemas se creó una reproducción de mareas, en las que las probetas permanecieron 12 horas sumergidas y 12 horas aireadas, reproduciendo ciclos de mareas diarios, simulando así las condiciones de exposición XS3. Durante casi un año se mantuvieron estas condiciones de exposición.

El periodo de exposición se detuvo únicamente una vez, a los tres meses desde el inicio. En ese instante, una probeta por cada hormigón fue extraída de los depósitos donde habían sido almacenadas, y sobre las caras descubiertas (no impermeabilizadas), se aplicó el inhibidor de la corrosión objeto de estudio en este trabajo en tres manos, según recomienda la ficha técnica del producto. Esta variante será referenciada como IA (inhibidor aplicado), mientras que las muestras donde no se aplicó el inhibidor se referenciarán como LI (libres de inhibidor). Una vez seca la impregnación hidrófuga, las probetas fueron de nuevo devueltas a los contenedores y continuó el periodo de exposición.

A lo largo del periodo de exposición se llevó a cabo la medida periódica de la intensidad de corrosión de las armaduras embebidas en hormigón empleando la técnica patentada por el grupo en el año 2018 Potential Step Voltammetry Se trata de una técnica electroquímica de medida de la corrosión centrada en reproducir los tramos rectos de las ramas anódicas y catódicas de Tafel mediante una perturbación de tipo potenciostático. Esta técnica ha sido validada previamente, llegando incluso a ser implementada en obras reales (Ramón, Castillo, and Martínez 2021; Ramón et al. 2020; 2019; Ramón et al. 2022; Ramón et al. 2016; Ramón et al. 2021; Ramón et al. 2022; Martínez-Ibernón et al. 2019).

Resultados

En las Imágenes 3, 4 y 5 se recogen los resultados de la monitorización de la corrosión agrupados por las tres relaciones agua/cemento con las que se ha trabajado: 0,85, 0,65 y 0,45. Estos resultados se corresponden con el valor medio de las 4 probetas estudiadas por cada variante descrita anteriormente. En las gráficas se ha incluido el umbral límite definiendo los rangos en los que se clasifica la corrosión, de acuerdo con las recomendaciones RILEM (Andrade and Alonso 2004). Además, se ha señalado también el instante en el que se aplicó sobre las probetas el inhibidor de la corrosión.

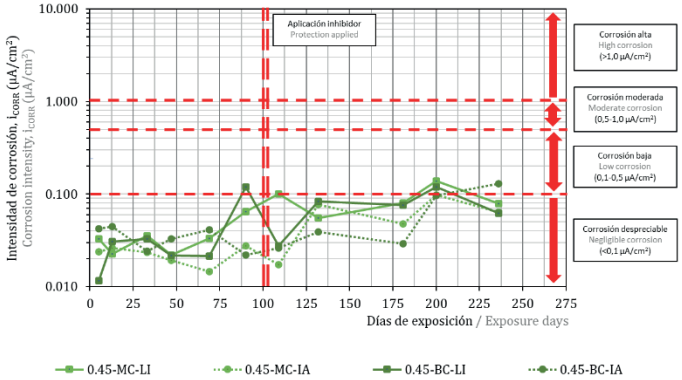


Imagen 3. Resultados de la monitorización de la corrosión (grupo 0,45). Image 3. Corrosion monitoring results (group 0.45).

Throughout the exposure period, periodic measurement of the rebars' corrosion intensity was carried out using the technique patented by the authors in 2018 Potential Step Voltammetry. This is an electrochemical corrosion measurement technique focused on reproducing the straight sections of the anodic and cathodic Tafel slopes by means of a potentiostatic type perturbation. This technique has been previously validated and has even been implemented in real works (Ramón, Castillo, and Martínez 2021; Ramón et al. 2020; 2019; Ramón et al. 2022; Ramón et al. 2016; Ramón et al. 2021; José Enrique Ramón et al. 2022; Martínez-Ibernón et al. 2019).

Results

Images 3, 4 and 5 show the results of corrosion monitoring grouped by the three water/cement ratios with which we worked: 0.85, 0.65 and 0.45. These results correspond to the average value of the 4 specimens studied for each variant described above. In the graphs, the limit threshold has been included, defining the ranges in which corrosion is classified, according to the RILEM recommendations (Andrade and Alonso 2004). In addition, the instant at which the corrosion inhibitor was applied to the specimens has also been indicated.

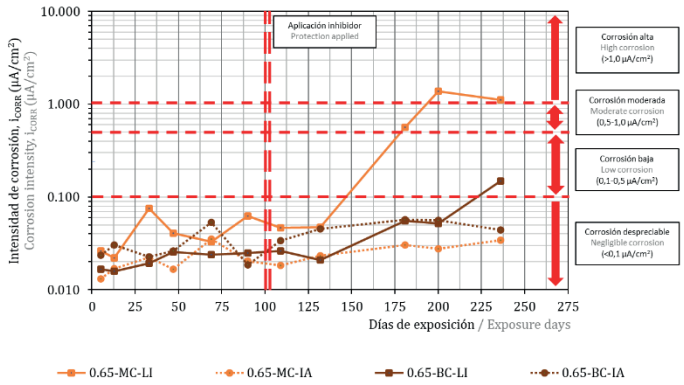


Imagen 4. Resultados de la monitorización de la corrosión (grupo 0,65). Image 4. Corrosion monitoring results (group 0.65).

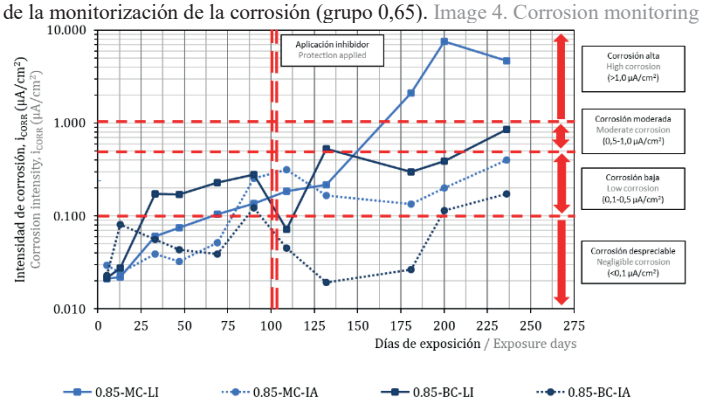


Imagen 5. Resultados de la monitorización de la corrosión (grupo 0,85). Image 5. Corrosion monitoring results (group 0.85).

As can be seen, it is possible to observe the trend changes throughout the exposure period in the different study variables. In the group of 0.45 concrete, it was not possible to appreciate notable differences between each sample due to the quality of the coating of the reinforcement itself, which favoured the reinforcement to maintain its passivity condition. By means of the characterization tests presented in previous works, it was possible to observe how these concretes showed a high durability, being insignificant the influence of a good or bad curing. However, in the rest of the concretes studied it was possible to observe differences. In the case of the 0.65 concrete, it could be seen how at the end of the study the samples without corrosion inhibitor showed medium-low corrosion levels, while those where the inhibitor was applied maintained their initial passivity. On the other hand, in the 0.85 concretes, which during the characterization showed low or very low durability, the results also show large differences. The samples with inhibitor maintained low corrosion levels, while those that were not protected reached corrosion intensities above 1 µA/cm^2, i.e. high corrosion intensity.

Como se puede apreciar, es posible observar los cambios de tendencia a lo largo del periodo de exposición en las diferentes variables de estudio. En el grupo de hormigones 0,45 no fue posible apreciar notables diferencias entre cada muestra debido a la calidad del propio recubrimiento de las armaduras, que favoreció que las armaduras mantuvieran su condición de pasividad. Mediante los ensayos de caracterización presentados en trabajos previos se pudo observar cómo estos hormigones mostraron una durabilidad alta, siendo insignificante la influencia de un buen o mal curado. Sin embargo, en el resto de los hormigones estudiados sí que fue posible observar diferencias. En el caso de los hormigones 0,65 se pudo apreciar como al final del estudio las muestras sin inhibidor de la corrosión mostraban niveles de corrosión medio-bajos, mientras que aquellas muestras donde se aplicó el inhibidor mantuvieron su pasividad inicial. Por otro lado, en los hormigones 0,85, que durante la caracterización demostraron una durabilidad baja o muy baja los resultados también evidencian grandes diferencias. Las muestras con inhibidor mantuvieron niveles de corrosión bajos, mientras que aquellas que no fueron protegidas alcanzaron a superar intensidades de corrosión por encima de 1 $\mu A/cm^2$, es decir, intensidad de corrosión alta.

Uno de los problemas del estudio de la evolución de la intensidad de corrosión es que se trata de una visión puntual del daño por corrosión. El estudio de parámetros como la pérdida de sección ofrece una visión más clara del daño acumulado. De acuerdo a las recomendaciones RILEM (Andrade and Alonso 2004), este parámetro puede calcularse integrando los valores de la intensidad de corrosión y corrigiendo los datos obtenidos por un coeficiente α que relaciona la pérdida de sección generalizada (que se produce por la carbonatación del hormigón) de una corrosión localizada (que se produce por la presencia de cloruros como en este caso). El valor de este parámetro no se encuentra claramente definido en bibliografía, pero está aceptado que se considere 10 como un valor válido. En las siguientes figuras se recoge el estudio de esta evolución del daño acumulado.

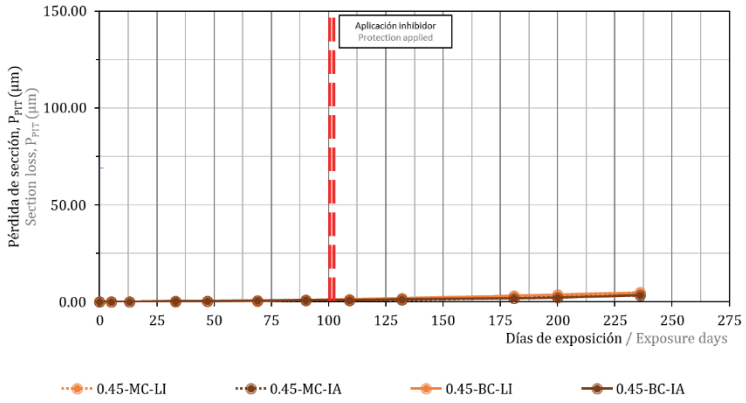


Imagen 6. Pérdida de sección acumulada (grupo 0,45). Image 6. Accumulated section loss (group 0.45).

Los resultados evidencian la influencia del inhibidor de la corrosión como una pedida que ayude a reducir el daño acumulado en las estructuras de hormigón armado, siendo incluso válido cuando se aplica durante la vida útil de las estructuras.

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos durante la monitorización de la corrosión, que se extendió durante casi un año, se pudo observar como la utilización de un inhibidor de la corrosión comercial, aplicado en superficie durante la vida útil de la estructura favorece en la prevención de la aparición prematura de los daños por corrosión o minimiza la intensidad de este proceso. Este estudio, junto con la primera parte del trabajo, ha demostrado que puede ser una buena opción la aplicación del producto como una barrera suplementaria al recubrimiento de las armaduras para extender el periodo de iniciación y retrasar la despasivación de las armaduras. Indistintamente de esto, es necesario continuar llevado a cabo tareas de evaluación periódica en las construcciones de hormigón armado que permitan asegurar el estado interno de las armaduras.

One of the problems with the study of the evolution of corrosion intensity is that it is a punctual view of corrosion damage. The study of parameters such as section loss offers a clearer view of the accumulated damage. According to RILEM recommendations (Andrade and Alonso 2004), this parameter can be calculated by integrating the values of corrosion intensity and correcting the data obtained by a coefficient α that relates the generalized section loss (which is produced by the carbonation of the concrete) of a localized corrosion (which is produced by the presence of chlorides as in this case). The value of this parameter is not clearly defined in the literature, but it is accepted that 10 is considered a valid value. The following figures show the study of this evolution of the accumulated damage.

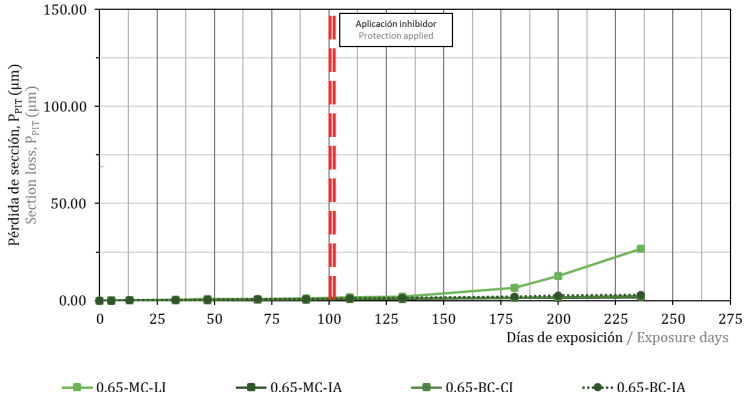


Imagen 7. Pérdida de sección acumulada (grupo 0,65). Image 7. Accumulated section loss (group 0.65).

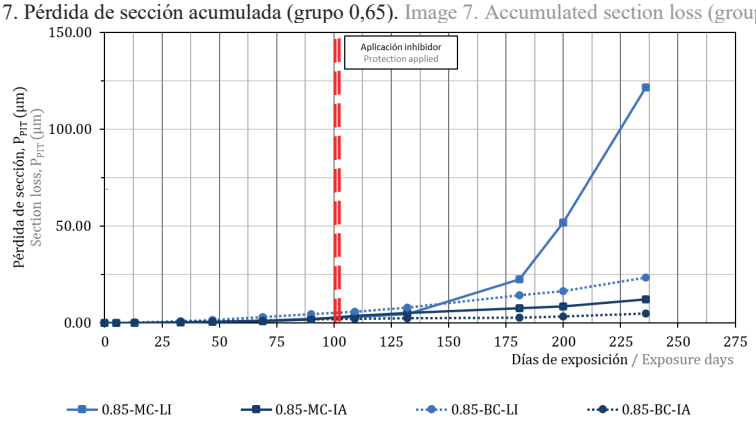


Imagen 8. Pérdida de sección acumulada (grupo 0,85). Image 8. Accumulated section loss (group 0.85).

The results evidence the influence of the corrosion inhibitor as an order that helps to reduce the accumulated damage in reinforced concrete structures, being even valid when applied during the useful life of the structures.

Conclusions

From the results obtained during the corrosion monitoring, which lasted for almost a year, it was possible to observe how the use of a commercial corrosion inhibitor, applied on the surface during the useful life of the structure, favours the prevention of the premature appearance of corrosion damage or minimizes the intensity of this process. This study, together with the first part of the work, has shown that it may be a good option to apply the product as a supplementary barrier to the coating of the reinforcement to extend the initiation period and delay the depassivation of the reinforcement. Regardless of this, it is necessary to continue to carry out periodic evaluation tasks in reinforced concrete constructions to ensure the internal condition of the reinforcement.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. 2024. *UNE-EN 1504:2005. Productos y Sistemas Para La Protección y Reparación de Estructuras de Hormigón*.
- Andrade, C., and C. Alonso. 2004. "Recommendations of RILEM TC-154-EMC: 'Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion' Test Methods for on-Site Corrosion Rate Measurement of Steel Reinforcement in Concrete by Means of the Polarization Resistance Method." *Materials and Structures* 37 (273): 623–43. https://doi.org/10.1617/13952.
- Hu, J. Y., S. S. Zhang, E. Chen, and W. G. Li. 2022. "A Review on Corrosion Detection and Protection of Existing Reinforced Concrete (RC) Structures." *Construction and Building Materials* 325 (February). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126718.
- Martínez-Ibernón, A., J. E. Ramón, J. M. Gandía-Romero, I. Gasch, M. Valcuende, M. Alcañiz, and J. Soto. 2019. "Characterization of Electrochemical Systems Using Potential Step Voltammetry. Part II: Modeling of Reversible Systems." *Electrochimica Acta* 328. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135111.
- Ministerio de Transportes Mov. y Agenda Urbana. Gobierno de España. 2022. *Código Estructural*.
- Ramón-Zamora, J.E., J.R. Lliso-Ferrando, A. Martínez-Ibernón, and J. M. Gandiá-Romero. 2023. "Corrosion Assessment in Reinforced Concrete Structures by Means of Embedded Sensors and Multivariate Analysis . Part 1 : Laboratory Validation." *Sensors* 23 (21). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s23218869.
- Ramón, J. E., Castillo, and I. Martínez. 2021. "On-Site Corrosion Monitoring Experience in Concrete Structures: Potential Improvements on the Current-Controlled Polarization Resistance Method." *Materiales de Construccion* 71 (344). https://doi.org/10.3989/mc.2021.11221.
- Ramón, J. E., J. M. Gandía-Romero, R. Bataller, M. Alcañiz, M. Valcuende, and J. Soto. 2020. "Potential Step Voltammetry: An Approach to Corrosion Rate Measurement of Reinforcements in Concrete." *Cement and Concrete Composites* 110 (4). https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103590.
- Ramón, J. E., A. Martínez-Ibernón, J. M. Gandía-Romero, R. Fraile, R. Bataller, M. Alcañiz, E. García-Breijo, and J. Soto. 2019. "Characterization of Electrochemical Systems Using Potential Step Voltammetry. Part I: Modeling by Means of Equivalent Circuits." *Electrochimica Acta* 323. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.134702.
- Ramón, José E., José M. Gandía-Romero, Román Bataller, Juan A. López, Manuel Valcuende, and Juan Soto. 2022. "Real-Time Corrosion Monitoring of an Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete Offshore Raft by Using an Autonomous Sensor System." *Structural Control and Health Monitoring*, no. June: 1–16. https://doi.org/10.1002/stc.3102.
- Ramón, José Enrique, José Manuel Gandía-Romero, Manuel Valcuende, and Román Bataller. 2016. "Integrated Sensor Network for Monitoring Steel Corrosion in Concrete Structures." *VITRUVIO - International Journal of Architectural Technology and Sustainability* 1 (1): 65. https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2016.5191.
- Ramón, José Enrique, Isabel Martínez, José Manuel Gandía-Romero, and Juan Soto. 2022. "Improved Tafel-Based Potentiostatic Approach for Corrosion Rate Monitoring of Reinforcing Steel." *Journal of Nondestructive Evaluation* 41 (4). https://doi.org/10.1007/s10921-022-00903.
- Ramón, Jose Enrique, Isabel Martínez, José Manuel Gandía-romero, and Juan Soto. 2021. "An Embedded-sensor Approach for Concrete Resistivity Measurement in On-site Corrosion Monitoring: Cell Constants Determination." *Sensors* 21 (7). https://doi.org/10.3390/s21072481.
- Song, Ha Won, and Velu Saraswathy. 2007. "Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures - A Review." *International Journal of Electrochemical Science* 2 (1): 1–28. https://doi.org/10.1016/s1452-3981(23)17049-0.
- Verma, Sanjeev Kumar, Sudhir Singh Bhadauria, and Saleem Akhtar. 2014. "Monitoring Corrosion of Steel Bars in Reinforced Concrete Structures." *The Scientific World Journal* 2014. https://doi.org/10.1155/2014/957904.
- Zaki, Ahmad, Hwa Kian Chai, Dimitrios G. Aggelis, and Ninel Alver. 2015. "Non-Destructive Evaluation for Corrosion Monitoring in Concrete: A Review and Capability of Acoustic Emission Technique." *Sensors (Switzerland)* 15 (8): 19069–101. https://doi.org/10.3390/s150819069.

CORROSIÓN EN LAS CONSTRUCCIONES DE HORMIGÓN ARMADO DE LA CIUDAD DE VALENCIA. CASO DE ESTUDIO

CORROSION IN REINFORCED CONCRETE CONSTRUCTIONS LOCATED IN VALENCIA. CASE STUDY

Josep Ramon Lliso-Ferrando
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Ana Martínez-Ibernón
Investigadora en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Pablo Monzón-Bello
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: pabmonb1@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. E-mail: pabmonb1@csa.upv.es
Isabel Gasch-Molina
Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: igasch@mes.upv.es
Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: igasch@mes.upv.es
José Manuel Gandía-Romero
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: joganro@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: joganro@csa.upv.es
Manuel Valcuende Payá
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es

Abstract

Corrosion is one of the main problems in reinforced concrete constructions, especially when they are located in the marine environment. The chloride diffusion through the porous matrix generates localized depassivation of the reinforcement and triggers metal corrosion, producing a significant reduction in the service life of reinforced concrete constructions.

The city of Valencia has many reinforced concrete infrastructures and constructions subjected to these conditions that are not being bound to any type of inspection or maintenance, which has generated that today there are many cases where significant damage can be seen.

This study shows an example of these constructions with corrosion problems in the city of Valencia. This study has been based only on visual inspection but has allowed the detection of more than 100 examples. The seriousness of the situation invites continuing with this study and with tests to detect more cases with corrosion problems that are not yet visually visible.

Keywords
Concrete, Corrosion, Marine Environment, Valencia

Introducción

La corrosión es uno de los problemas más habituales en las construcciones de hormigón armado. Esto es especialmente importante cuando se trata de construcciones situadas en ambiente marino (Santhanam and Otieno 2016). Es de sobra conocido que, tras el hormigonado, sobre las armaduras se origina una fina capa de óxidos que permite situar el acero en una condición de pasividad, de acuerdo con los diagramas de Pourbaix (Sánchez et al. 2007; Alhozaimy, Hussain, and Al-Negheimish 2016). La alta alcalinidad generada en la matriz cementante (pH>12.5)., junto con la presencia de oxígeno, originan que se genere una capa de óxidos insolubles y de muy poco espesor sobre la superficie de las barras. Esta situación permite que los procesos de corrosión que se desarrollen sobre las armaduras se puedan considerar despreciables de acuerdo con las recomendaciones RILEM (Andrade and Alonso 2004).

Sin embargo, en ambientes marinos (ricos en cloruros), estos pueden difundir a través de la red porosa del hormigón y desencadenar la destrucción localizada de la capa pasiva, favoreciendo que se desencadene la corrosión activa (Cao 2014). Al desarrollarse el proceso en zonas muy puntuales, la velocidad de corrosión es alta (superior a casos donde se produce la corrosión generalizada), y, además, el daño es grave, ya que la capacidad mecánica del acero se ve gravemente dañada. Este fenómeno lleva también asociado un grave descenso en la adherencia acero-hormigón (Glass and Buenfeld 2000).

Uno de los principales problemas de este proceso electroquímico reside en la dificultad de detectar de manera prematura el daño. Algunos autores han destacado que únicamente mediante la implementación de sensores embebidos es posible llevar a cabo estas tareas. Las técnicas actuales de inspección visual o catas requieren el desplazamiento de personal cualificado, la paralización total o parcial de una construcción y el coste económico que todo esto implica. La dificultad de la detección prematura del daño radica en que la corrosión se corresponde con un fenómeno electroquímico que se desarrolla internamente. El metal de las armaduras se corroe propiciando que se originen nuevos compuestos, de mayor volumen que los existentes inicialmente. Estos nuevos compuestos generan tensiones internas en la zona del recubrimiento de las armaduras y generan el agrietamiento de este (Ramón-Zamora et al. 2023). Visualmente, las fisuras que aparecen en la zona exterior de las piezas de hormigón armado, o las manchas de óxido, solo son detectables cuando el daño ya se encuentra muy avanzado. Esto obliga a acometer reparaciones con un coste elevado, además de estar comprometiendo la seguridad estructural de las construcciones de hormigón armado.

Todos estos datos reflejan la importancia de llevar a cabo evaluaciones periódicas en las estructuras de hormigón armado que sean fiables y precisas o, por otro lado, servirse de técnicas de monitorización de la corrosión que aseguren un seguimiento continuo del proceso y permitan detectar la corrosión de manera prematura (Lliso-Ferrando et al. 2024). Esto es de especial relevancia en aquellas zonas próximas al mar (ambientes marinos), donde la presencia de cloruros puede originar la corrosión de manera prematura y llevar asociada una merma en la vida útil de las estructuras.

Con el objetivo de demostrar la gravedad de esta situación, en este trabajo se presenta un caso de estudio realizado en la ciudad de Valencia en el año 2023. Durante varios meses se realizó una inspección visual de diferentes zonas de la ciudad y sus municipios más próximos. Durante este estudio se detectaron más de un centenar de construcciones con graves daños por corrosión, algunas incluso en riesgo de colapso, pero todavía en servicio.

Métodos

La inspección del estado interno de las armaduras requiere normalmente de la utilización de manera complementaria de diferentes técnicas y metodologías: inspección visual, medidas in situ, medidas sobre testigos, etc. Sin embargo, la magnitud del trabajo impidió llevar a cabo todo un estudio en detalle, limitándose únicamente a realizar una inspección visual de las edificaciones e infraestructuras de la ciudad de Valencia y los municipios más próximos. Debido a esto, lo habitual en estos casos ha sido prestar especial atención a la presencia de humedades, fisuras, manchas de óxido o el posible desprendimiento del recubrimiento, tal y como se indica en las diferentes fichas que se han elaborado.

Introduction

Corrosion is one of the most common problems in reinforced concrete constructions. This is especially important in the marine environment (Santhanam and Otieno 2016). It is well known that, after casting process, a thin layer of oxides originates on the reinforcement, which allows the steel to reach a passivity condition, according to the Pourbaix diagrams (Sánchez et al. 2007; Alhozaimy, Hussain, and Al-Negheimish 2016). The high alkalinity generated in the cementitious matrix (pH>12.5), together with the presence of oxygen, leads to the generation of an insoluble and very thin layer of oxides on the surface of the rebars. This situation allows the corrosion processes that develop on the rebars to be considered negligible in accordance with the RILEM recommendations (Andrade and Alonso 2004).

However, in the marine environment (rich in chlorides), these can diffuse through the concrete pore network and trigger localised destruction of the passive layer, favouring the triggering of active corrosion (Cao 2014). As the process develops in very localised areas, the corrosion rate is high (higher than in cases where generalised corrosion occurs), and the damage is severe, as the mechanical properties of the steel are severely damaged. This phenomenon also leads to a severe decrease in the steel-concrete bond (Glass and Buenfeld 2000).

One of the main problems of this electrochemical process lies in if it is possible to detect the damage prematurely. Some authors have pointed out that only through the implementation of embedded sensors is it possible to carry out these tasks. Current visual inspection or analysing cores technique require the displacement of qualified staff, the total or partial stoppage of a construction or infrastructure and the economic cost that all this implies. The difficulty of early detection of damage lies in the fact that corrosion corresponds to an electrochemical phenomenon that develops internally. The metal of the reinforcement corrodes, causing new compounds to form, larger in volume than those that initially existed. These new compounds generate internal stresses around the reinforcement cover and cause it to crack (Ramón-Zamora et al. 2023). Visually, the cracks that appear on the outside of the reinforced concrete parts, or rust stains, are only detectable when the damage is already very advanced. This forces high-cost repairs to be carried out, as well as compromising the structural safety of reinforced concrete constructions.

All these data reflect the importance of carrying out reliable and accurate periodic assessments of reinforced concrete structures or, on the other hand, using corrosion monitoring techniques that ensure continuous monitoring of the process and allow corrosion to be detected prematurely (Lliso-Ferrando et al. 2024). This is particularly relevant in areas close to the sea (marine environments), where the presence of chlorides can cause premature corrosion and lead to a reduction in the service life of structures.

To demonstrate the seriousness of this situation, this paper presents a case study carried out in the city of Valencia in the year 2023. For several months, a visual inspection of different areas of the city and its closest villages was carried out. During this study, more than a hundred buildings and infrastructures with serious corrosion damage were detected, some even at risk of collapse, but still in service.

Methods

The inspection of the internal condition of the reinforcement normally requires the complementary use of different techniques and methodologies: visual inspection, in situ measurements, measurements on cores, etc. However, the magnitude of the work made it impossible to carry out a detailed study and was limited to a visual inspection of the buildings and infrastructures of the city of Valencia and the nearby villages. Due to this, the usual practice in these cases has been paying special attention to the presence of damps, cracks, rust stains or the possible cracking and splitting and spalling of the concrete cover, as indicated in the different files that have been prepared.

En la Imagen 1 y la Imagen 2 se recogen identificadas las zonas de estudio, distinguiendo entre construcciones que se corresponden a edificaciones y, por otro lado, infraestructuras, respectivamente.

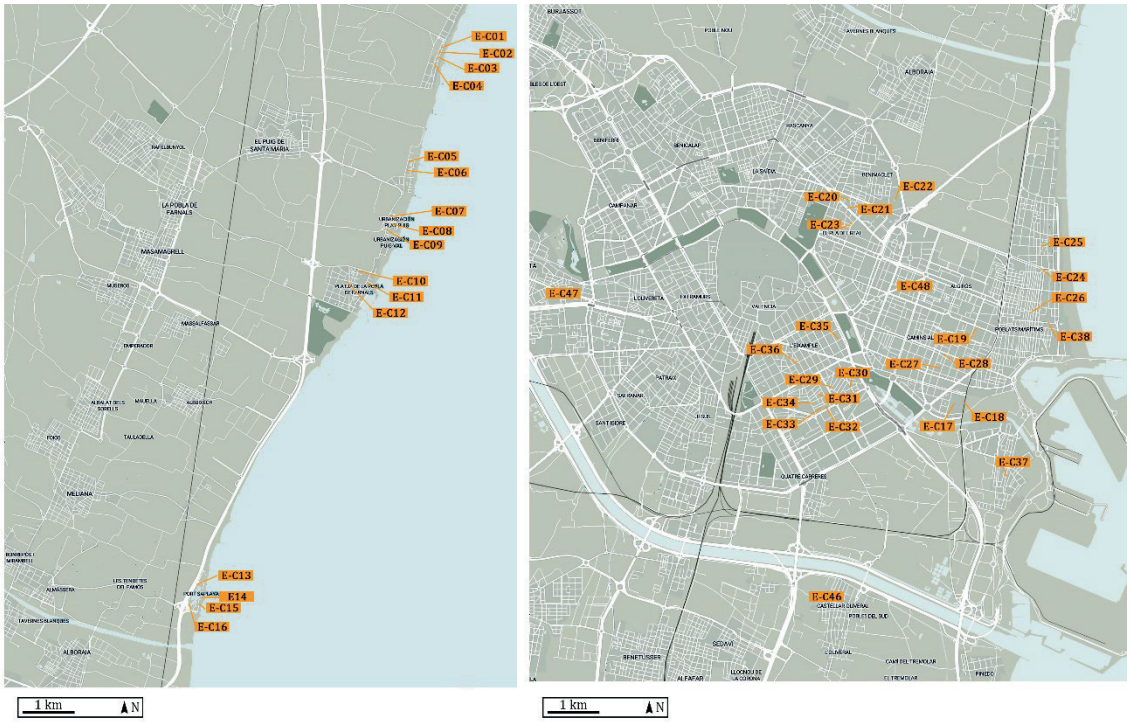


Imagen 1. Localización de las edificaciones analizadas. Image 1. Residential buildings were analysed.

Resultados y Discusión

En este apartado se presentan algunas de las más de 100 fichas elaboradas durante el periodo de tiempo que duró el estudio (imágenes 3 a 6). Estas fichas llevan asociado un código, en el que se recoge la ubicación (aproximada en algunos casos para garantizar la privacidad), el año de construcción (aproximado en muchos casos y basado en catastro) y las características básicas. Junto con estos datos se incluye una breve descripción del daño detectado y una conclusión extraída tras la observación detallada del riesgo que supone el estado de la construcción.

De entre los datos más reseñables que se pueden destacar, los autores quieren señalar la presencia de numerosas edificaciones unifamiliares en estado de ruina y abandonadas, sobre todo aquellas situadas en primera línea de costa. Sin embargo, también existen numerosas edificaciones plurifamiliares y bloques de viviendas con graves daños por corrosión, comprometiendo no solo la integridad estructural de las edificaciones, sino también la seguridad de viandantes. Debe señalarse que la mayoría de ellas se encuentran en uso, poniendo en peligro también a sus propietarios.

Por otro lado, los autores también quieren señalar la despreocupación existente en algunos casos, en los que la propiedad ha detectado el daño por corrosión, pero no ha actuado, sino que se minimiza el impacto de este utilizando mallas que permitan recoger la posible caída de restos del recubrimiento a la vía pública. Este tipo de acciones no están encaminadas a paliar el daño, sino a reducir el impacto. El proceso electroquímico cuenta con la posibilidad de seguir desarrollándose libremente y acrecentar el problema.

Respecto a las infraestructuras analizadas, se ha detectado que la mayoría de ellas suponen obras clave en la economía de la ciudad: principales vías de acceso a la ciudad como túneles o puentes, y que se utilizan diariamente por miles de personas. Todas ellas requieren trabajos de mantenimiento que garanticen la seguridad estructural y permitan extender su vida útil reduciendo el coste que reparaciones tardías pueden llevar asociado. Junto con estas, también se ha detectado que existen numerosos edificios públicos (colegios, centros universitarios o centros de ocio) que también requieren de revisión debido al grave estado que presentan.

Image 1 and Image 2 show the study areas. They are identified, distinguishing between constructions that correspond to buildings and, on the other hand, infrastructures, respectively.

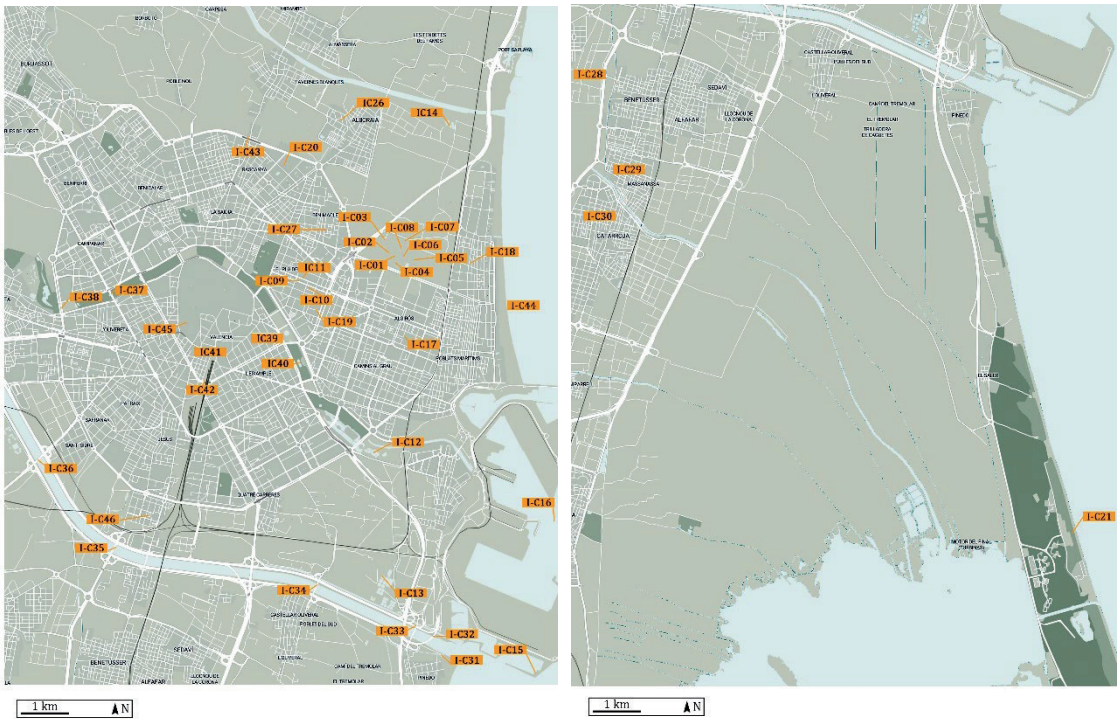


Imagen 2. Localización de las infraestructuras analizadas. Image 2. Infrastructures were analysed.

Results and Discussion

In this section, the authors present some of the more than 100 cards produced during the period of the study (images 3 to 6). These cards have a code associated with them, which includes the location (approximate in some cases to guarantee privacy), the year of construction (approximate in many cases and based on the land registry) and the basic characteristics. Along with these data, a brief description of the damage detected, and a conclusion drawn after detailed observation of the risk posed by the state of the building are included.

Among the most noteworthy data that can be highlighted, the authors would like to point out the presence of numerous single-family buildings in ruin conditions and abandoned, especially those located on the coastline. However, there are also numerous residential buildings showing serious corrosion damage, compromising not only the structural integrity of the buildings, but also the safety of pedestrians. It should be noted that most of them are in use, endangering also their owners.

On the other hand, the authors also want to point out the lack of concern that exists in some cases, in which the property has detected the corrosion damage, but has not acted, but rather minimises the impact of this by using meshes that prevent the possible fall of the remains of the concrete cover onto the public road. This type of action is not aimed at mitigating the damage, but at reducing the impact. The electrochemical process has the potential to continue to develop freely and increase the problem.

Regarding the infrastructures analysed, it has been detected that most of them involve key works in the city's economy: main access roads to the city such as tunnels or bridges, which are used daily by thousands of people. All of them require maintenance work to ensure structural safety and to extend their service life, reducing the cost of later repairs. Along with these, it has also been detected that there are numerous public buildings (schools, university centres or leisure centres) that also need to be overhauled due to the serious condition they are in.



Imagen 3. Ejemplo de algunas de las fichas creadas (edificación). Image 3. Example of some of the cards created (residential buildings).

También se debe señalar que en algunos casos se ha detectado que la promotora ha detectado los daños por corrosión y ha intervenido mediante reparaciones, siendo el caso más habitual las reparaciones mediante parcheado. En muy pocos casos se ha detectado la implementación de ánodos de sacrificio como una metodología para prevenir futuros problemas por corrosión (ejemplos extraídos de obras realizadas por diferentes empresas).



Imagen 4. Ejemplo de algunas de las fichas creadas (edificación). Image 4. Example of some of the cards created (residential buildings).

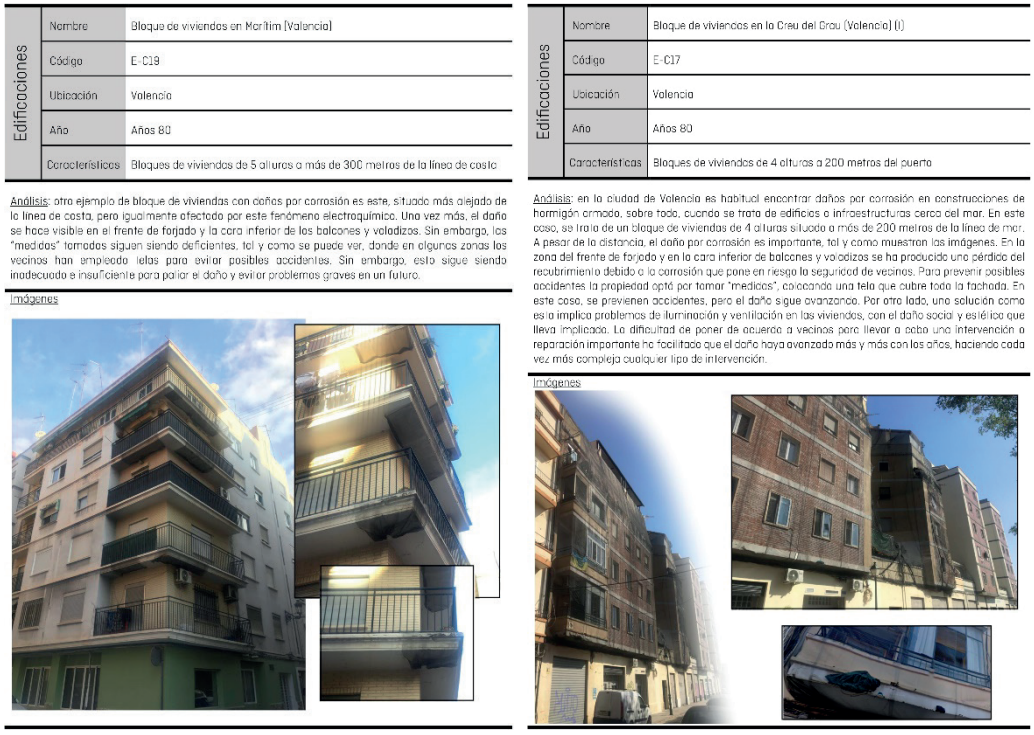


Imagen 5. Ejemplo de algunas de las fichas creadas (edificación). Image 5. Example of some of the cards created (residential buildings).

It should also be noted that in some cases it has been identified that the owners have detected corrosion damage and have intervened by means of repairs, the most common case being repaired by patching. In very few cases, the implementation of sacrificial anodes has been detected as a methodology to prevent future corrosion problems (examples taken from works carried out by different companies).



Imagen 6. Ejemplo de algunas de las fichas creadas (trabajos reparados). Image 6. Example of some of the cards created (repaired works).

En este estudio los autores también han planteado la posibilidad de incluir algunas fichas dedicadas a construcciones que se ejecutarán en la ciudad de Valencia en los próximos años. En este grupo se han incluido ejemplos de edificaciones y, sobre todo, infraestructuras que, por su singularidad o especial relevancia pueden suponer un riesgo importante para la ciudad si adolecen de problemas por corrosión de manera prematura. Su revisión periódica y las tareas de mantenimiento serán fundamentales para mantener en condiciones cada caso durante la vida útil para la que sean diseñadas.

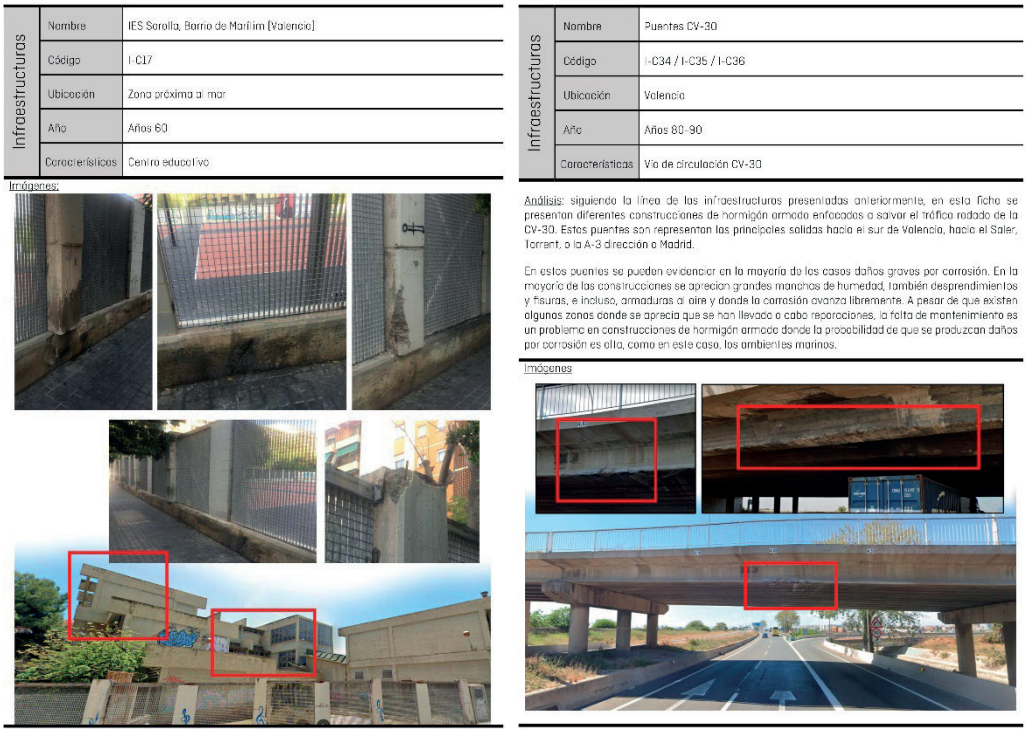


Imagen 7. Ejemplo de algunas de las fichas creadas (futuras obras). Image 7. Example of some of the cards created (future constructions).

Conclusiones

El trabajo recogido en esta memoria refleja la problemática de la corrosión en las construcciones de hormigón armado en la ciudad de Valencia. La proximidad al mar, la existencia de cloruros, y la humedad del ambiente favorecen que se desarrollen procesos de corrosión de manera acelerada. Sin embargo, la ausencia de protocolos de inspección y mantenimiento permiten que el daño evolucione, se desarrolle y conduzca a graves problemas con un coste económico asociado importante. Debe señalarse además que este trabajo únicamente se ha llevado a cabo mediante una aproximación básica, la inspección visual. La utilización de técnicas complementarias como medidas in situ o catas habría favorecido la detección de muchas más construcciones con graves problemas por corrosión.

Este trabajo pone de relevancia la importancia de llevar a cabo tareas de inspección periódicas de manera efectiva o servirse de sistemas de monitorización autónomos que puedan alertar de manera prematura la aparición de procesos de corrosión. Estos trabajos permitirán paliar o minimizar el daño en las primeras etapas y prevenir graves problemas y costosas reparaciones.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte de una memoria mucho más extensa presentada a la 24ª Edición de los Premios Sandalio Miguel-María Aparicio, y galardonada con el primer premio. Los autores quieren agradecer a la Fundación Domus su trabajo organizando este concurso y fomentando la difusión de la ciencia y la investigación en la ciudad de Valencia.

In this study, the authors have also considered the possibility of including some cards dedicated to constructions that will be built in the city of Valencia in the coming years. This group includes examples of buildings and, above all, infrastructures which, due to their singularity or special relevance, could pose a significant risk to the city if they suffer from corrosion problems prematurely. Their periodic revision and maintenance tasks will be essential to keep each case in good condition during the service life for which they were designed.

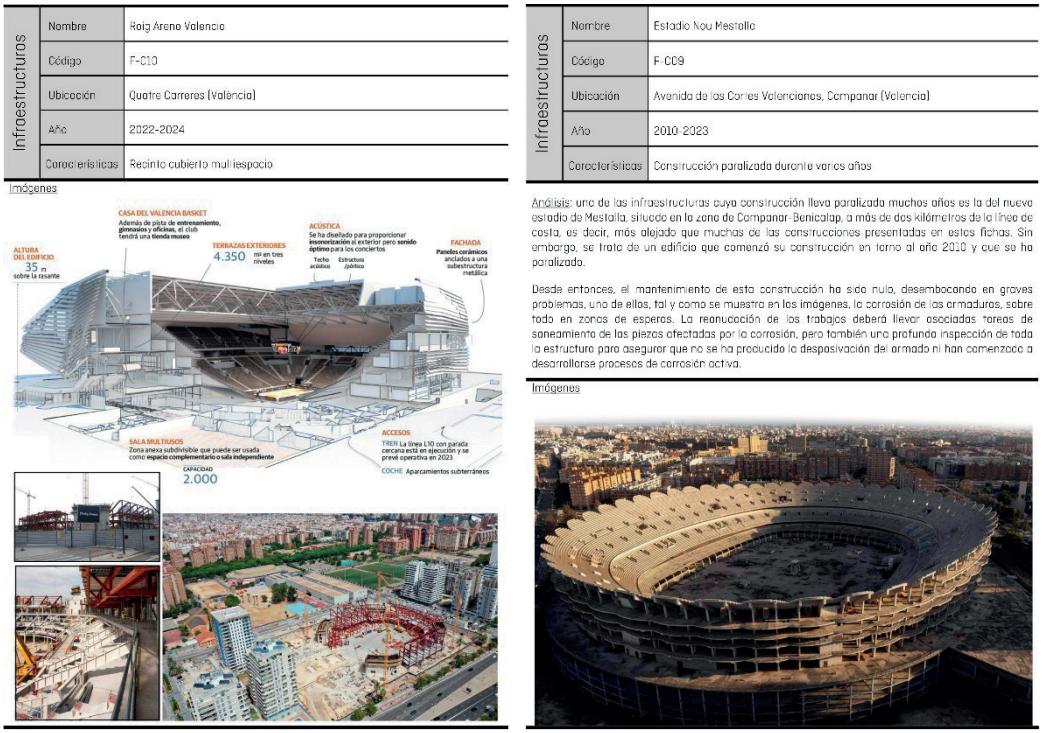


Imagen 8. Ejemplo de algunas de las fichas creadas (próximas obras). Image 8. Example of some of the cards created (future constructions).

Conclusions

The work included in this report reflects the problem of corrosion in reinforced concrete constructions in the city of Valencia. The proximity to the sea, the existence of chlorides and the humidity of the environment favours the accelerated development of corrosion processes. However, the absence of inspection and maintenance protocols allows the damage to evolve, develop and lead to serious problems with a significant associated economic cost. It should also be noted that this work has only been carried out using a basic approach, visual inspection. Using complementary techniques such as in situ measurements or testings would have favoured the detection of many more constructions with serious corrosion problems.

This work highlights the importance of carrying out effective periodic inspection tasks or using autonomous monitoring systems that can provide early warning of the appearance of corrosion processes. Such work will help to mitigate or minimise damage at an early stage and prevent serious problems and costly repairs.

Acknowledgements

This work is part of a much more extensive report submitted to the 24th Edition of the Sandalio Miguel-María Aparicio Awards. It was awarded with the first prize. The authors would like to thank the Domus Foundation for its work in organising this competition and promoting the dissemination of science and research in the city of Valencia.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- Alhozaimy, Abdulrahman, Raja Rizwan Hussain, and Abdulaziz Al-Negheimish. 2016. "Significance of Oxygen Concentration on the Quality of Passive Film Formation for Steel Reinforced Concrete Structures during the Initial Curing of Concrete." *Cement and Concrete Composites* 65: 171–76. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.022.
- Andrade, C., and C. Alonso. 2004. "Recommendations of RILEM TC-154-EMC: 'Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion' Test Methods for on-Site Corrosion Rate Measurement of Steel Reinforcement in Concrete by Means of the Polarization Resistance Method." *Materials and Structures* 37 (273): 623–43. https://doi.org/10.1617/13952.
- Cao, Chong. 2014. "3D Simulation of Localized Steel Corrosion in Chloride Contaminated Reinforced Concrete." *Construction and Building Materials* 72: 434–43. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.030.
- Glass, G K, and N R Buenfeld. 2000. "Chloride-Induced Corrosion of Steel." *Progress in Structural Engineering and Materials.*, 448–58.
- Lliso-ferrando, Josep Ramon, Ana Mart, Enrique Ram, and Manuel Gand. 2024. "Applied Sciences Corrosion Assessment in Reinforced Concrete Structures by Means of Embedded Sensors and Multivariate Analysis — Part 2 : Implementation."
- Ramón-Zamora, J.E., J.R. Lliso-Ferrando, A. Martínez-Ibernón, and J. M. Gandiá-Romero. 2023. "Corrosion Assessment in Reinforced Concrete Structures by Means of Embedded Sensors and Multivariate Analysis . Part 1 : Laboratory Validation." *Sensors* 23 (21). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s23218869.
- Sánchez, M., J. Gregori, C. Alonso, J. J. García-Jareño, H. Takenouti, and F. Vicente. 2007. "Electrochemical Impedance Spectroscopy for Studying Passive Layers on Steel Rebars Immersed in Alkaline Solutions Simulating Concrete Pores." *Electrochimica Acta* 52 (27 SPEC. ISS.): 7634–41. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.02.012.
- Santhanam, M., and M. Otieno. 2016. "Deterioration of Concrete in the Marine Environment." *Marine Concrete Structures* 1: 137–49. https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100081-6.00005-2.

RIESGO DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN AMBIENTE MARINO A PARTIR DE LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA

CORROSION RISK IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES LOCATED IN THE MARINE ENVIRONMENT THROUGH ELECTRICAL RESISTANCE ANALYSIS

Josep Ramon Lliso-Ferrando
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Ana Martínez-Ibernón
Investigadora en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Roberto Vengut-Tro
Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: roventr@etsid.upv.es
Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: roventr@etsid.upv.es
Isabel Gasch-Molina
Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: igasch@mes.upv.es
Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: igasch@mes.upv.es
José Manuel Gandía-Romero
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: joganro@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: joganro@csa.upv.es
Manuel Valcuende Payá
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es

Abstract

The main cause of accelerated deterioration in reinforced concrete structures is steel corrosion. This is a costly phenomenon, especially because of the repair work that is often associated with it. To prevent this type of work, many authors recommend regular inspections to detect the damage in advance. However, they require qualified staff who can analyse the results. However, the measurement of electrical resistivity is a much simpler and more effective measurement to determine the corrosion risk (qualitative measurement). This paper presents a two-year electrical resistivity monitoring study of reinforced concrete. The monitoring was carried out on two pillars made of different mixtures that were subjected to a marine environment (combining exposure conditions XS1, XS2 and XS3). The results show how this parameter can facilitate the detection of areas with a higher risk of corrosion in a practical and simple way.

Keywords
Concrete, Durability, Resistivity, Corrosion, Marine Environment

Introducción

La corrosión es un grave problema que acarrea consecuencias nefastas para las estructuras de hormigón armado (Angst 2018). La corrosión del acero origina una pérdida importante de la capacidad mecánica de los elementos que la sufren, pero, además, se produce una merma importante en la adherencia acero-hormigón. A todo esto, se le debe sumar el daño estético y funcional que se produce en las estructuras de hormigón armado, como son las manchas de óxido en superficie, o la fisuración y el "spalling" o "splitting" del recubrimiento (Capozucca 1995; Apostolopoulos and Papadakis 2008).

Para prevenir todo ello, los especialistas recomiendan llevar a cabo revisiones periódicas sobre las estructuras de hormigón armado que permitan detectar con antelación el daño en estas construcciones. Sin embargo, es algo que normalmente no se realiza por diferentes motivos: costes económicos asociados, desplazamiento de personal cualificado, o necesidad de accesibilidad a los elementos analizados entre otros (Ramón-Zamora et al. 2023). Una alternativa mucho más eficiente que en los últimos años está ganando importancia es la utilización de sistemas de monitorización embebidos que permitan realizar un seguimiento de la corrosión en tiempo real para su detección prematura. Sin embargo, tal y como se ha destacado en anteriores trabajos, aunque ya se han validado muchos ejemplos en laboratorio, este campo todavía requiere de mucho esfuerzo para su implementación sobre casos reales (Lliso-Ferrando et al. 2024). Entre los principales motivos de esto, destaca que se precisan técnicas de medida electroquímicas fiables y precisas, y también que el sistema de monitorización debe tener una vida útil adecuada con un coste económico acorde a ello.

Como alternativa a todo ello, en este trabajo se plantea utilizar la medida de la resistencia eléctrica como un parámetro cualitativo que permita identificar las zonas con mayor potencial de sufrir daños por corrosión. Se trata de un parámetro extensamente analizado en bibliografía. Aunque su medida en laboratorio y sobre probetas es algo habitual y su procedimiento aparece definido en varias normativas (por ejemplo, UNE-EN 12390-19:2023 (AENOR 2023)), la medida in situ todavía cuenta con diferentes limitaciones. El método más habitual es la medida mediante el método de Wenner (Morris, Moreno, and Sagüés 1996; Wenner 1916; Gowers and Millard 1999). Se trata de un sistema de medida que se sirve de una herramienta compuesta por cuatro electrodos alineados. Sobre los dos electrodos exteriores se hace circular una corriente alterna (frecuencia entre 100 y 1000 Hz). La herramienta fue diseñada con un sistema de medida que pudiera recoger la caída de potencial entre los dos electrodos internos y, a través de la siguiente ecuación, obtener la resistividad eléctrica:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R_e \qquad [1]$$

donde a es la separación entre electrodos y R_e la resistencia eléctrica del material obtenida del cociente entre la diferencia de potencial medida (ΔV) y el campo de corriente aplicado (ΔI):

$$R_e = \frac{\Delta V}{\Delta I} \qquad [2]$$

Esta herramienta requiere ser manipulada por personal cualificado capaz de interpretar la señal, pero, por otro lado, accesibilidad a las piezas bajo análisis. El equipo de medida (los 4 electrodos) debe apoyar sobre la superficie de hormigón analizada, que previamente habrá sido limpiada y humedecida, retirando cualquier tipo de protección existente (como, por ejemplo, pintura), tal y como indican las normas que describen la medida (RILEM TC 154-EMC (Polder et al. 2000) o UNE-EN 12390-19:2023 (AENOR 2023)). Todos estos hechos limitan su implementación en casos reales, siendo la monitorización de esta propiedad una alternativa viable para llevar a cabo la evaluación de las estructuras de hormigón armado.

Debido a esto, en el presente trabajo se describe un caso de estudio en el que sobre dos soportes de hormigón armado se monitorizó la resistencia eléctrica con el objetivo de identificar las zonas con mayor potencial de sufrir daños por corrosión. En este caso, se trata de dos soportes fabricados con diferentes hormigones, para analizar también la durabilidad del material, en el que fueron embebidos diferentes sensores. Respecto a las condiciones de exposición, los soportes fueron parcialmente sumergidos en agua con cloruros, y se recrearon tanto ciclos de mareas como salpicaduras. Una parte de los soportes se mantuvo aireada. De esta forma, se reprodujeron las tres clases locales de agresividad recogidos en el Código Estructural para zonas donde se pueda producir la corrosión inducida por cloruros de origen marino.

Introduction

Corrosion is a serious problem that implies consequences for reinforced concrete structures (Angst 2018). Steel corrosion causes a significant loss in the mechanical properties of the elements that suffer from it, but, in addition, there is a significant decrease in the steel-concrete bond. In addition to all this, there is the aesthetic and functional damage that occurs in reinforced concrete structures, such as surface rust stains, or concrete cover cracking, spalling or splitting (Capozucca 1995; Apostolopoulos and Papadakis 2008).

To prevent all of this, specialists recommend carrying out periodic inspections of reinforced concrete structures to detect damage to these constructions in advance. However, this is something that is not normally done for different reasons: associated economic costs, displacement of qualified staff, or the need for accessibility to the analysed elements, among others (Ramón-Zamora et al. 2023). A much more efficient alternative that has been increasing in importance in recent years is the use of embedded monitoring systems that allow corrosion to be monitored in real time for early detection. However, as highlighted in previous works, although many examples have already been validated in the laboratory, it still requires a lot of effort to implement them in real cases (Lliso-Ferrando et al. 2024). One of the main reasons for this is that reliable and accurate electrochemical measurement techniques are needed, and that the monitoring system must have an adequate service life with a corresponding economic cost.

As an alternative to this, this work proposes to use the measurement of electrical resistance as a qualitative parameter to identify the areas with the greatest potential for corrosion damage. This parameter has been extensively analysed in the literature. Although its measurement in the laboratory and on test specimens is commonplace, and its procedure is defined in several standards (for example, UNE-EN 12390-19:2023 (AENOR 2023)), in situ measurement still has different limitations. The most common method is measurement using the Wenner method (Morris, Moreno, and Sagüés 1996; Wenner 1916; Gowers and Millard 1999). This measurement needs a tool consisting of four aligned electrodes. An alternating current (frequency typically between 100 and 1000 Hz) is circulated over the two outer electrodes. The tool was designed with a measuring system that could measure the potential drop between the two inner electrodes and, by means of the following equation, obtain the electrical resistivity:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R_e \qquad [1]$$

where a is the electrode gap and R_e is the electrical resistance of the material obtained from the quotient of the measured potential difference (ΔV) and the applied current field (ΔI):

$$R_e = \frac{\Delta V}{\Delta I} \qquad [2]$$

This tool requires to be handled by qualified staff capable of analysing the signal, but, on the other hand, accessibility to the pieces under analysis. The measuring equipment (the 4 electrodes) must contact on the concrete surface under analysis, which will have been previously cleaned and moistened, removing any type of existing protection (such as, for example, painting), as indicated in the standards describing the measurement (RILEM TC 154-EMC (Polder et al. 2000) or UNE-EN 12390-19:2023 (AENOR 2023)). All these facts limit its implementation in real cases, being the monitoring of this parameter a viable alternative to carry out the evaluation of the reinforced concrete structure.

For this reason, this paper presents a case study in which the electrical resistance of two reinforced concrete supports was monitored to identify the areas with the greatest potential for corrosion damage. In this case, two pillars cast with different concretes were used to analyse the durability of the material, in which different sensors were embedded. Regarding the exposure conditions, the pieces were partially submerged in water containing chlorides, and both tidal cycles and splash area were recreated. A part of the pillars was kept aerated. In this way, the three local classes of aggressivity listed in the Structural Code for areas where corrosion induced by chlorides of marine origin can occur were reproduced.

Plan Experimental

Materiales, Probetas y Métodos de Ensayo

Para poder evaluar la eficacia de la medida de la resistencia eléctrica sobre elementos de hormigón armado, el grupo de investigación SMaRT del Laboratorio de Electroquímica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación fabricó dos soportes como los que se describen en la Imagen 1. Se trata de dos pilares a escala prismáticos (dimensiones 100x130x1200 mm). En cada soporte se embebieron segmentos de armadura aislados eléctricamente. Cada uno de estos segmentos fue fabricado con conexión eléctrica en la zona inferior y superior del mismo, tal y como se detalla en la imagen, de manera que se pudieran aislar en cualquier momento a través de una caja de conexiones.

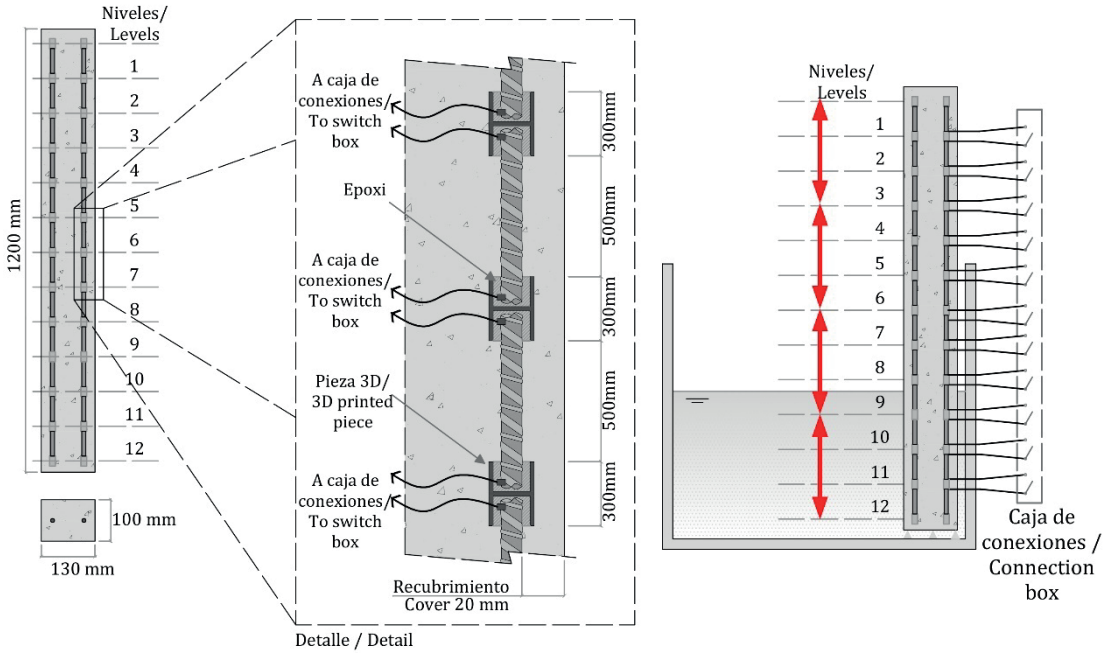


Imagen 1. Descripción de los elementos de hormigón armado fabricados a escala. Image 1. Manufactured reinforced concrete specimens.

El hormigón utilizado para la fabricación de cada pilar fue distinto. Uno de los pilares fue fabricado con una mezcla con una relación agua/cemento 0,5 (referido de aquí en adelante como H-0.5). En este caso, para su fabricación se utilizó un CEM III 42,5 A, es decir, un cemento que cuenta con adición de escoria de alto horno. Esta adición, además de reducir el impacto medioambiental del cemento al reutilizar desechos industriales, mejora la durabilidad del material endurecido al reducir la red capilar del hormigón, reduciendo también el tamaño y número de los poros (Müller 2023). Para la elaboración del hormigón se utilizó una arena silícea 0/4 y dos gravas silíceas 4/8 y 4/16. En la dosificación también se introdujo un superplastificante modelo Sika ViscoCrete-20HE para mejorar la trabajabilidad de la mezcla. Este aditivo fue introducido en un 1% respecto al peso de cemento. La dosificación se detalla en la Tabla 1.

El segundo de los elementos estructurales fabricados a escala fue preparado con una dosificación en la que la relación agua/cemento aumentó a 0,6 (referido de aquí en adelante como H-0.6). Se trata de una relación agua/cemento no adecuada para ambientes marinos. Además, el cemento utilizado en este caso fue un CEM II 42,5 M-M (Q-L). Tanto los áridos como el superplastificante utilizado fueron los mismos y en igual cantidad que la dosificación descrita anteriormente. La dosificación se detalla en la Tabla 1.

Experimental Plan

Materials, Test Specimens and Methods

To evaluate the effectiveness of electrical resistance measurement on reinforced concrete elements, the SMaRT research group based in the Electrochemistry Laboratory of the Building Engineering School manufactured two pillars as described in Image 1. These are two prismatic scale pillars (dimensions 100x130x1200 mm). Electrically insulated reinforcement segments were embedded in each support (divided by levels). Each of these segments was manufactured with an electrical connection at the bottom and top of the support, as shown in the picture, so that they could be isolated at any time through a switch box.

The concrete used for the manufacture of each column was different. One of the columns was made with 0.5 water/cement ratio mixture (hereafter referred to as H-0.5). In this case, a CEM III 42.5 A was used for its manufacture, i.e. a cement with the addition of blast furnace slag. This addition reduces the environmental impact of the cement by reusing industrial waste and improves the durability of the hardened material by reducing the capillary network of the concrete, also reducing the size and number of pores (Müller 2023). A 0/4 silica sand and two silica gravels, 4/8 and 4/16, were used to prepare the concrete. A Sika ViscoCrete-20HE superplasticizer was also introduced in the dosage to improve the workability of the mix. This additive was introduced at 1% by weight of cement. The dosage is detailed in Table 1.

The second column was cast using a 0.6 water/cement ratio mixture (hereafter referred to as H-0.6). This is a water/cement ratio not suitable for marine environments. In addition, the cement used in this case was a CEM II 42.5 M-M (Q-L). Both the aggregates and the superplasticizer used were the same and in the same quantity as the dosage described above. The dosage is detailed in Table 1.

Tabla 1. Dosificaciones base para la obtención de material reciclado (kg/m^3).
Table 1. Dosages for obtaining recycled material (kg/m^3).

	H-0.5	H-0.6
Relación agua/cemento / Water/cement ratio	0.50	0.60
Cemento / Cement (Cem III 42.5-A)	325	-
Cemento / Cement (Cem II 42.5 B-M (Q-L))	-	250
Agua / Water	162	150
Arena 0/4 / Sand 0/4	1060	
Grava 4/8 / Gravel 4/8	370	
Grava 4/16 / Gravel 4/16	490	
Superplastificante / Superplasticizer	3.25	2.50

Together with the structural elements described in Image 1, a series of test specimens were also prepared for the characterisation of the material. All the pieces, once cast, were kept in their moulds for the first 24 hours. Once this period of time had elapsed, the specimens were demoulded and they were transferred to a curing chamber (20±ºC and Relative Humidity above 90%) until they reached the age of 28 days.

After the curing period, the specimens were used to characterise the material. For this purpose, a series of tests were carried out at both 28 and 90 days of age, which are indicated in Table 2, together with the regulations describing these tests and the geometry and number of specimens used in each case.

Junto con los elementos estructurales fabricados a escala descritos en la Imagen 1 se prepararon también una serie de probetas para la caracterización del material. Todas las piezas, una vez hormigonadas, fueron mantenidas en sus moldes durante las primeras 24 horas. Una vez transcurrido este periodo de tiempo, las muestras fueron desmoldadas y los elementos desencofrados, y fueron trasladados a cámara de curado (20±ºC y Humedad Relativa superior al 90%) hasta alcanzar la edad de 28 días.

Finalizado el periodo de curado, las probetas fueron utilizadas para la caracterización del material. Para ello, se realizaron una serie de ensayos tanto a 28 como a 90 días de edad que se indican en la Tabla 2, junto con la normativa que describe dichos ensayos y la geometría y número de probetas utilizadas en cada caso.

Tabla 2. Ensayos realizados, normativa y número de probetas y geometría.
Table 2. Performed tests, standard tests and test specimens.

	Método de ensayo/ Standard test method	Probetas/ Test specimens
Resistencia a compresión / Compressive strength	UNE-EN 12390-3: 2020	2x(Ø100x200 mm)
Porosidad accesible al agua / Porosity accesible to water	UNE 83980: 2014	3x(100x100x50 mm)
Permeabilidad al gas / Gas permeability	UNE 83981: 2008	3x(Ø150x50 mm)
Resistencia a la carbonatación / Carbonation resistance	UNE-EN 12390-10: 2019	1x(100x100x400 mm)
Coeficiente de difusión de cloruros (migración)/ Non-steady state migration coefficient	UNE-EN 12390-18: 2021	3x(Ø100x200 mm)
Resistividad eléctrica / Electrical resistivity	UNE-EN 12390-19: 2023	3x(100x100x50 mm)

Los pilares fabricados fueron trasladados a un contenedor, donde fueron parcialmente sumergidos en agua de mar (concentración 3% NaCl). Además, se preparó un sistema de desplazamiento de aguas que permitiera subir y bajar el nivel de agua (reproduciendo mareas) y un sistema de bombeo de agua que generara una humectación mediante un sistema de aerosol, reproduciendo unas condiciones similares a las salpicaduras del agua de mar. De esta forma, la configuración de las condiciones de exposición fue la siguiente: el nivel de agua se mantuvo constante entre los niveles 9 y 10, de manera que los niveles 10, 11 y 12 permanecieron durante todo el periodo de exposición sumergidos (condiciones de exposición XS2 (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022)). Los niveles 7, 8 y 9 fueron situados en zona de mareas, sometidos a ciclos de humectación y secado, mientras que los niveles 4, 5 y 6 fueron sometidos a salpicaduras (condiciones de exposición XS3 (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022)). El desplazamiento de mareas se realizó cada 12 horas y las salpicaduras fueron programadas para realizarse cada 48 horas. Los restantes niveles (1, 2 y 3) permanecieron durante todo el periodo de exposición aireados (ambiente de exposición XS1 (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022)). Estas condiciones de exposición se lograron mantener durante todo el periodo de estudio gracias a la utilización de diferentes bombas modelo iL280P/iL280P-24 y programadores de tipo enchufe modelo Garza. Estas condiciones se mantuvieron durante dos años.

Durante este periodo de tiempo, todos los sensores permanecieron conectados eléctricamente entre ellos. Periódicamente, estos fueron aislados y se midió la resistencia eléctrica entre cada pareja de sensores situados al mismo nivel. Para ello, por cada pareja de sensores situados en cada nivel de los pilares se midió la conductividad con un conductímetro modelo Crison Gl32. El valor considerado fue el obtenido tras tres minutos desde el comienzo de la medida, para asegurar obtener una señal estable. La resistencia eléctrica fue la obtenida a partir de la inversa de la conductividad.

The pillars were transferred to a container and partially submerged in seawater (concentration 3% NaCl). In addition, a water displacement system was prepared to raise and lower the water level (reproducing tides) and a water pumping system was prepared to generate humidification by means of a spray system, recreating conditions similar to seawater splashing. Thus, the configuration of the exposure conditions was as follows: the water level remained constant between levels 9 and 10, so that levels 10, 11 and 12 remained submerged throughout the exposure period (exposure conditions XS2 (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022)). Levels 7, 8 and 9 were in the tidal zone, subjected to wetting and drying cycles, while levels 4, 5 and 6 were subjected to splashing (exposure conditions XS3 (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022)). Tidal displacement was performed every 12 hours and splashing was scheduled to be performed every 48 hours. The remaining levels (1, 2 and 3) remained aerated throughout the exposure period (exposure environment XS1 (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022)). These exposure conditions were maintained throughout the study period thanks to the use of different iL280P/iL280P-24 pumps and Garza plug-in controllers. These conditions were maintained for two years.

During this period, all sensors remained electrically connected to each other. Periodically, they were isolated and the electrical resistance between each pair of sensors at the same level was measured. For this purpose, for each pair of sensors located on each level of the pillars, the conductivity was measured with a Crison Gl32 conductivity meter. The value considered was that obtained after three minutes from the start of the measurement, to ensure a stable signal was obtained. The electrical resistance was obtained from the inverse of the conductivity.

Results

Table 3 shows the results of the characterisation carried out. As can be seen, and comparing the data with the thresholds proposed by other authors, H-0.5 concrete showed a higher durability than H-0.6 concrete (Baroghel-Bouny 2004; Wang et al. 2014). These data demonstrate the influence of the water/cement ratio of each dosage on the durability of the material, but also the influence of the type of cement in the manufactured samples.

Tabla 3. Resultados obtenidos durante la caracterización del material.
Table 3. Results obtained during material characterisation.

	H-0.5		H-0.6	
	28 días/28 days	90 días/90 days	28 días/28 days	90 días/90 days
Resistencia a compresión (MPa) / Compressive strength (MPa)	47.25	56.73	29.18	30.89
Porosidad accessible al agua / Porosity accessible to water	12.66	11.34	15.40	13.54
Permeabilidad al gas ($x10^{-18}$ m^2)/ Gas permeability ($x10^{-18}$ m^2)	8.62	6.51	40.22	28.60
Resistencia a la carbonatación (mm/año) / Carbonation resistance (mm/year)	36.61		75.62	
D_{nssm} ($x10^{-12}$ m^2/s)/ D_{nssm} ($x10^{-12}$ m^2/s)	2.46	3.90	26.26	25.76
Resistividad eléctrica (Ωm) / Electrical resistivity (Ωm)	209.31		65.43	

Images 2 and 3 show the results obtained from the electrical resistance monitoring, by element and level. It should be noted that both graphs have the axis in logarithmic scale.

Resultados

En la Tabla 3 se recogen los resultados de caracterización llevados a cabo. Como se puede ver, y comparando los datos con los umbrales propuestos por otros autores, el hormigón H-0.5 demostró una durabilidad más alta que el hormigón H-0.6 (Baroghel-Bouny 2004; Wang et al. 2014). Estos datos demuestran la influencia de la relación agua/cemento de cada dosificación en la durabilidad del material, pero también la influencia del tipo de cemento en las muestras fabricadas.

En la Imagen 2 y 3 se presentan los resultados obtenidos de la monitorización de la resistencia eléctrica, por elemento y nivel. Debe señalarse que ambas gráficas cuentan con el eje en escala logarítmica.

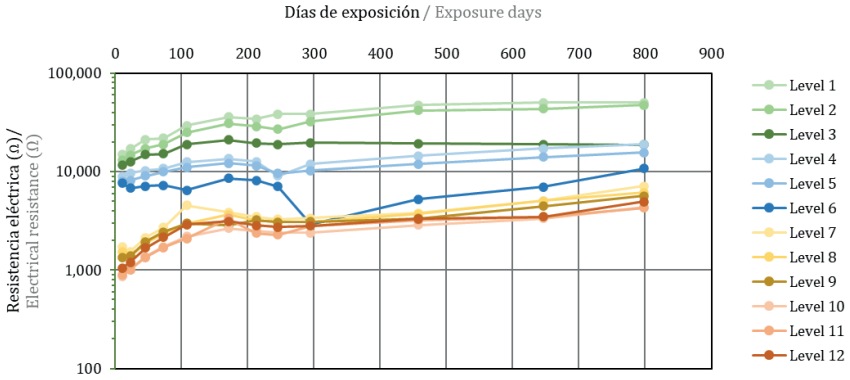


Imagen 2. Resistencia eléctrica H-0.5. Image 2. Electrical resistance H-0.5.

Como se puede ver, los resultados muestran grandes diferencias entre cada pieza y dentro de cada pieza, entre cada nivel. Para el caso del hormigón H-0.6, los niveles inferiores (sumergidos y en mareas, 7-12) alcanzaron resultados por debajo de 300 Ω. Los sensores en la zona de mareas (4-6) y el más próximo de la zona aireada alcanzaron a obtener valores por encimad e 1.000 Ω, aunque la tendencia denota un descenso progresivo. Por otro lado, en los sensores 1 y 2 los resultados se situaron por encima de los 10.000 Ω y denotando una tendencia ascendente. En el caso de estudio H-0.5, los resultados fueron visiblemente diferentes. En este caso, se obtuvieron valores más altos, todos ellos por encima de los 5.000 Ω al final del periodo de estudio. En todos los casos, también se pudieron apreciar notables diferencias entre niveles sumergidos, en salpicaduras y aireados. Estos datos están en consonancia con los obtenidos durante la caracterización del material (Tabla 3) que demuestran una durabilidad más alta del hormigón H-0.5 que el H-0.6 (por ejemplo, menor porosidad o mayor resistencia a la difusión de cloruros).

La dificultad en este caso reside en establecer ahora los umbrales para clasificar el riesgo de corrosión a partir los datos obtenidos de medida de la resistencia eléctrica. Se trata de una relación difícil de cuantificar debido a la inexistencia de datos en bibliografía. Además, los datos referenciados en bibliografía corresponden a la resistividad (resistencia eléctrica normalizada por el área y distancia entre electrodos), algo que no se puede llevar cabo en este caso de manera matemática, pero sí aproximada. Para ello, se propone plantear de inicio la hipótesis de los umbrales definidos en las recomendaciones RILEM que se adjuntan en la Tabla 4 (Polder et al. 2000). Los datos deberán corroborarse con medidas de la intensidad de corrosión sobre cada sensor para validar el estudio, algo en lo que el grupo de investigación está trabajando actualmente. Para otras situaciones de estudio, se requiere una calibración previa.

Conclusiones

En este estudio se plantea una primera aproximación sobre la posibilidad de utilizar la monitorización de la resistencia eléctrica como parámetro para estimar el riesgo de corrosión de las armaduras embebidas en hormigón. No se trata de una medida cuantitativa, sino cualitativa, pero su interpretación puede resultar más sencilla que la medida de la intensidad de corrosión. Por otro lado, se debe señalar que su implementación en casos reales puede ser mucho más sencilla que la de sistemas de monitorización de la corrosión. Este trabajo todavía requiere continuar desarrollándose para poder ser validado.

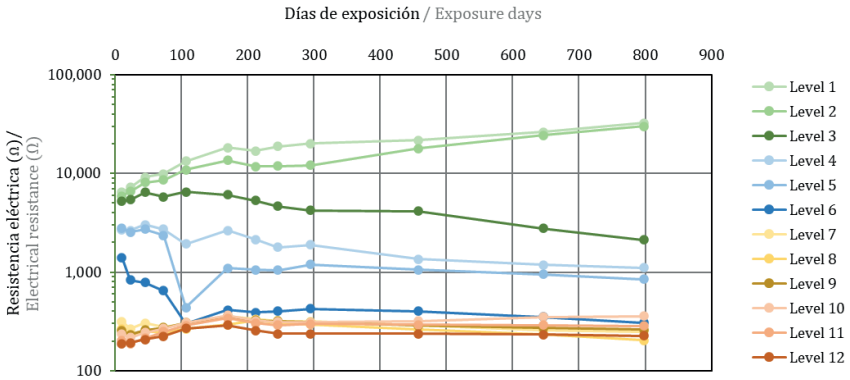


Imagen 3. Resistencia eléctrica H-0.6. Image 3. Electrical resistance H-0.6.

As can be seen, the results show large differences between each part and within each part, between each level. For the case of concrete H-0.6, the lower levels (submerged and tidal, 7-12) achieved results below 300 Ω. The sensors in the tidal zone (4-6) and the one closest to the aerated zone achieved values above 1,000 Ω, although the trend shows a progressive decrease. On the other hand, in sensors 1 and 2 the results were above 10,000 Ω and denoted an upward trend. In study case H-0.5, the results were visibly different. In this case, higher values were obtained, all of them above 5,000 Ω at the end of the study period. In all cases, notable differences between submerged, splashed and aerated levels could also be seen. These data are in line with those obtained during the material characterisation (Table 3) which showed a higher durability of H-0.5 concrete than H-0.6 (e.g. lower porosity or higher resistance to chloride diffusion).

The most difficult thing now consists of establishing the thresholds for classifying the corrosion risk from the electrical resistance measurement data. This is a difficult relationship to quantify due to the lack of data in the literature. Furthermore, the data referenced in the bibliography correspond to resistivity (electrical resistance normalised by the area and distance between electrodes), which cannot be carried out mathematically in this case, but can be approximated. For this purpose, it is proposed to start with the assumption of the thresholds defined in the RILEM recommendations attached in Table 4 (Polder et al. 2000). The data will have to be corroborated with corrosion intensity measurements on each sensor to validate the study, which the research group is currently working on. For other study situations, prior calibration is required.

Tabla 4. Resistividad eléctrica, valores de referencia a 20º (Ωm).
Table 4. Electrical resistivity, 20º reference values (Ωm).

	Hormigones CEM I/ Concretes CEM I	Hormigones con escoria o ceniza volante/ Concretes including blast furnace slag or fly ahs
Húmedo, sumergido / Wet, submerged	50-200	300-1000
Exterior, aireado / Outside, exposed	100-400	500-2000
Exterior, protegido / Outside, coated	200-500	1000-4000
Carboantado / Carbonated	>1000	2000-6000
Interiores / Indoor	>3000	4000-10000

Conclusions

This study presents a first approach to the possibility of using electrical resistance monitoring as a parameter to estimate the corrosion risk of reinforcement embedded in concrete. This is not a quantitative but a qualitative measure, but its interpretation may be simpler than the measurement of corrosion intensity. On the other hand, it should be noted that its implementation in real cases can be much simpler than that of corrosion monitoring systems. This work still requires further development to be validated.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. 2023. "UNE-EN 12390-19:2023. Determinación de La Resistividad Eléctrica."
- Angst, Ueli M. 2018. "Challenges and Opportunities in Corrosion of Steel in Concrete." *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 51 (1): 1–20. https://doi.org/10.1617/s11527-017-1131-6.
- Apostolopoulos, C. A., and V. G. Papadakis. 2008. "Consequences of Steel Corrosion on the Ductility Properties of Reinforcement Bar." *Construction and Building Materials* 22 (12): 2316–24. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.006.
- Baroghel-Bouny, V. 2004. "Conception Des Bétons Pour Une Durée de Vie Donnée Des Ouvrages—Maîtrise de La Durabilité Vis-à-Vis de La Corrosion Des Armatures et de l'alcali-Réaction—Etat de l'art et Guide Pour La Mise En Oeuvre d'une Approche Performantielle et Prédictive Sur La Bas." Bagneux, France. http://eprints.uanl.mx/5481/1/1020149995.PDF.
- Capozucca, Roberto. 1995. "Damage to Reinforced Concrete Due to Reinforcement Corrosion." *Construction and Building Materials* 9 (5): 295–303. https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00033-C.
- Gowers, K, and S Millard. 1999. "Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion." *ACI Materials Journal* 96 (5): 536–41.
- Lliso-ferrando, Josep Ramon, Ana Mart, Enrique Ram, and Manuel Gand. 2024. "Applied Sciences Corrosion Assessment in Reinforced Concrete Structures by Means of Embedded Sensors and Multivariate Analysis — Part 2 : Implementation."
- Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España. 2022. *Código Estructural*.
- Morris, W., E.I. Moreno, and A. A. Sagüés. 1996. "Practical Evaluation of Resistivity of Concrete in Test Cylinders Using a Wenner Array Probe." *Cement and Concrete Research* 26 (12): 1779–87.
- Müller, Christoph. 2023. "How Standards Support Sustainability of Cement and Concrete in Europe." *Cement and Concrete Research* 173 (July): 107288. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107288.
- Polder, R, C Andrade, B Elsener, O Vennesland, J Gulikers, R Weidert, and M Raupach. 2000. "Rilem TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion - Test Methods for on Site Measurement of Resistivity of Concrete." *Materials and Structures* 33 (December 2000): 603–11. https://doi.org/10.1007/BF02480599.
- Ramón-Zamora, J.E., J.R. Lliso-Ferrando, A. Martínez-Ibernón, and J. M. Gandiá-Romero. 2023. "Corrosion Assessment in Reinforced Concrete Structures by Means of Embedded Sensors and Multivariate Analysis . Part 1 : Laboratory Validation." *Sensors* 23 (21). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s23218869.
- Wang, Wei, Jian Liu, Franck Agostini, Catherine A. Davy, Frédéric Skoczylas, and Dominique Corvez. 2014. "Durability of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) under Progressive Aging." *Cement and Concrete Research* 55: 1–13. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.09.008.
- Wenner, F. 1916. "A Method of Measuring Earth Resistivity." *Bulletin of the Bureau of Standards* 12 (4): 469. https://doi.org/10.6028/bulletin.282.

ESTUDIO GRANULOMÉTRICO DE ÁRIDOS DE CANTERA Y ÁRIDOS PROVENIENTES DEL RECICLAJE DE RESIDUOS DE DEMOLICIÓN

GRADING STUDY OF QUARRY AGGREGATES AND RECYCLED AGGREGATES FROM DEMOLITION WASTE

Josep Ramon Lliso-Ferrando
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Alba Arenós-Barrachina
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valencia, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: laumarod@alumni.upv.es
Architecture School, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: laumarod@alumni.upv.es
Ana Martínez-Ibernón
Investigadora en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Isabel Gasch-Molina
Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: igasch@mes.upv.es
Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: igasch@mes.upv.es
José Manuel Gandía-Romero
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: joganro@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: joganro@csa.upv.es
Manuel Valcuende Payá
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es

Abstract

Concrete is the most widely used construction material in the world. Only in Spain, in 2023, more than 26 million cubic metres were produced, 5.6% more than the previous year, proving a growing trend. It is manufactured by mixing water, cement, sand and gravel in appropriate proportions. Normally, the volume of aggregates accounts for between 60% and 85%, which requires a significant consumption of this natural resource. Its extraction is associated with numerous disadvantages: alteration of the landscape by quarrying, destruction of natural habitats, and pollution of both air and water. In view of all this, it is essential that the possibility of replacing the consumption of natural aggregates with recycled aggregates be studied in the coming years. This study presents a first analysis of the possibility of using construction demolition waste as recycled aggregates. In this case, the work focuses on ceramic brick waste. A grading study of different samples is included, and the basis for future developments is laid.

Keywords
Concrete, Aggregates, Recycling, Crushed Brick

Introducción

El hormigón es un material fundamental para el crecimiento y desarrollo de un país. Se trata del material de construcción más utilizado del mundo. Su consumo se corresponde al doble que la suma de todos los demás materiales de construcción juntos (Gagg 2014; Sandanayake et al. 2020). El hormigón ofrece unas buenas prestaciones mecánicas. Además, tiene una durabilidad adecuada y se trata de un material con una gran versatilidad. Por otro lado, la facilidad para su fabricación, el coste de las materias primas y la disponibilidad de estas favorece su uso extensivo (Ramón-Zamora et al. 2023). Actualmente, el hormigón armado es el material de construcción escogido para la ejecución de infraestructuras clave (puentes, túneles o puertos), fundamentales como motor económico de los países desarrollados y aquellos en vías de desarrollo (Lliso-Ferrando et al. 2024).

En los últimos años se ha observado que la demanda de hormigón preparado está creciendo de manera importante. En el año 2017 se estimó que la producción mundial de hormigón superaba los 30 mil millones de toneladas, lo que se corresponde con un consumo total de 3,75 toneladas de hormigón por persona en el mundo (Monteiro, Miller, and Horvath 2017; Miller and Moore 2020). Resulta complejo aglutinar datos de todos los países, pero en algunos casos sí que es posible encontrar información detallada. Asociaciones como ERMCO (European ready-Mixed Concrete Organization) publican anualmente informes que aglutinan bastante información al respecto de los últimos años. Por ejemplo, en uno de los últimos informes (año 2019), se recoge la producción de hormigón en diferentes países: en Estados Unidos se superaron los 280 millones de metros cúbicos, más del doble que en toda América del Sur, cuyo consumo fue de 134,5 millones de metros cúbicos. En otros países como Japón o Turquía la producción es más baja, alcanzando los 84,8 y 67 millones de metros cúbicos, respectivamente. En el conjunto de la Unión Europea la producción de hormigón preparado superó los 260 millones de metros cúbicos, aunque el consumo promedio por países fue ligeramente superior a los 16 millones de metros cúbicos (ERMCO 2019) (Imagen 1). Los datos en España, actualizados hasta el año 2023 muestran una producción de hormigón por encima de la media, superando los 26 millones de metros cúbicos (ANEFHOP 2024) (Imagen 2).

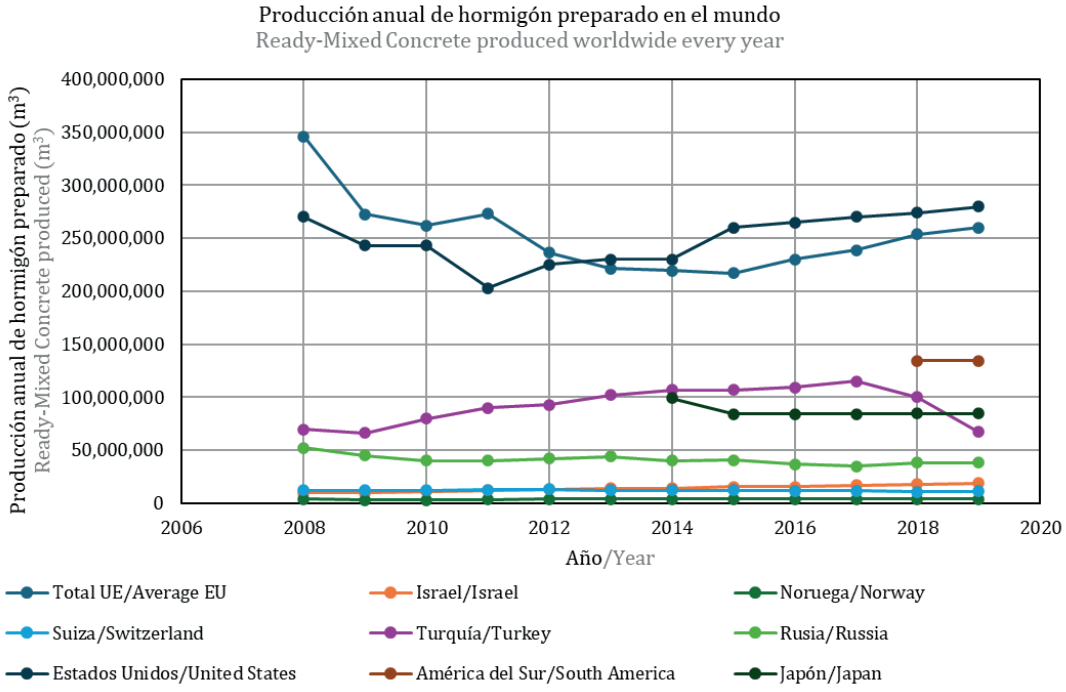


Imagen 1. Producción anual de hormigón preparado por países (ERMCO). Image 1. Ready-mixed concrete production per countries (ERMCO).

Introduction

Concrete is a fundamental material for the growth and development of countries. It is the most widely used construction material in the world. Its consumption is twice that of all other building materials combined (Gagg 2014; Sandanayake et al. 2020). Concrete offers good mechanical performance. In addition, it has adequate durability, and it is a material with great versatility. On the other hand, the ease of its manufacture, the low cost of raw materials and the availability of all of them favours its extensive use (Ramón-Zamora et al. 2023). Currently, reinforced concrete is the construction material of choice for the construction of key infrastructures (bridges, tunnels or ports), really important in developed and developing countries (Lliso-Ferrando et al. 2024).

In recent years, it has been observed that the demand of ready-mixed concrete is growing significantly. In 2017, it was estimated that concrete production exceeded 30 billion tonnes, which corresponds to a total consumption of 3.75 tonnes of concrete per person in the world (Monteiro, Miller, and Horvath 2017; Miller and Moore 2020). It is difficult to aggregate data from all countries, but in some cases, it is possible to find detailed information. Some associations such as ERMCO (European Ready-Mixed Concrete Organization) publish annual reports that bring together quite a lot of information from recent years. For example, in one of the latest reports (year 2019), the concrete production in different countries is shown: in the United States, more than 280 million cubic metres were produced, more than twice as much as in the whole of South America, where consumption was 134.5 million cubic metres. In other countries such as Japan and Turkey, production is lower, at 84.8 and 67 million cubic metres respectively. In the European Union as a whole, ready-mixed concrete production exceeded 260 million cubic metres, although the average consumption per country was slightly more than 16 million cubic metres (ERMCO 2019) (Figure 1). Data for Spain, updated to 2023, show an above-average production of concrete, exceeding 26 million cubic metres (ANEFHOP 2024) (Figure 2).

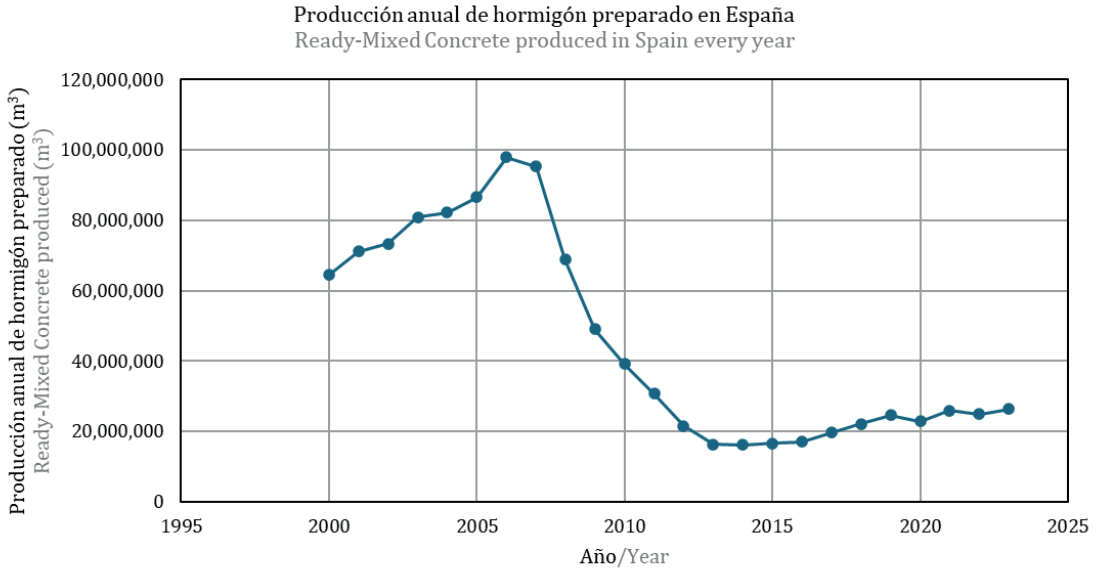


Imagen 2. Producción anual de hormigón preparado en España (ANEFHOP). Image 2. Ready-mixed concrete production in Spain (ANEFHOP).

The production of concrete is a process of mixing water, cement, sand and gravel in the appropriate proportions. In some cases, it is also possible to introduce additions or additives that provide new characteristics or properties to the mixture in its fresh state or once it has hardened. Regarding the aggregates (sand and gravel), it should be pointed out that they are an inert material that makes up between 60% and 85% of the total volume of concrete. This makes its characteristics and properties closely related to the performance of concrete throughout its lifetime, playing a crucial role especially in its strength and durability (Wang et al. 2021).

La producción de hormigón consiste en un proceso de mezcla, en las proporciones adecuadas, de agua, cemento, arena y grava. En algunos casos, es posible introducir también adiciones o aditivos que aporten nuevas características o propiedades a la mezcla en estado fresco o una vez endurezca. Respecto a los agregados (arena y grava), se debe indicar que se trata de un material inerte que supone entre el 60% y el 85% del volumen total de hormigón. Esto hace que sus características y propiedades estén estrechamente relacionadas con el rendimiento del hormigón a lo largo de su vida útil, desempeñando un papel crucial sobre todo en su resistencia y durabilidad (Wang et al. 2021). Teniendo en cuenta esto, y las estadísticas anteriores en torno a la producción de hormigón anual, y el volumen de agregados que se deben utilizar, tanto las arenas como las gravas se han convertido en un recurso natural con una fuerte demanda (Dinh et al. 2022). Sin embargo, esto también lleva asociados diferentes aspectos negativos.

- Alteración del paisaje. La explotación de canteras modifica de manera drástica el entorno natural afectando la topografía y la estética del paisaje. En los casos que la minería se realiza en ríos también se produce la alteración de sedimentos, pero también la modificación de cauces y corrientes naturales, o el flujo habitual del agua. Esto puede conducir a acrecentar los daños cuando se producen crecidas en ríos y arroyos ocasionando graves inundaciones. La modificación drástica de los sedimentos altera también el discurrir natural de los ríos y las sustancias que estos transportan, ocasionando la erosión acelerada de playas en las desembocaduras (Rentier and Cammeraat 2022).
- Contaminación de agua y aire. La minería contamina terrenos y acuíferos, afectando gravemente la salud humana y medioambiental (Singhal, Goel, and Sengupta 2020). Por otro lado, algunos autores también destacan la contaminación del aire. Estudios recientes demuestran que las emisiones de polvo inorgánico en las proximidades de una cantera exceden habitualmente la concentración máxima idónea para la vida humana, haciendo necesaria la utilización de herramientas como aspersores para reducir dicho fenómeno (Sozaeva and Kagermazov 2020).
- Pérdida de la biodiversidad. Los factores descritos anteriormente no solo alteran el paisaje, sino también la biodiversidad que los habita. La contaminación del aire reduce la idoneidad para la vida, y la alteración de hábitats favorece el desplazamiento de especies endémicas (Ozcelik 2022).

A todo ello se le deben sumar los costes directos e indirectos de la explotación de canteras. Para tener una visión global, por ejemplo, en España, el consumo de áridos empleados en el sector de la construcción en el año 2024 fue superior a los 140 millones de toneladas (75% del mercado de los áridos) según datos de la Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos (ANEFA 2024).

Como se puede ver, es necesario mitigar estos efectos mediante prácticas más responsables y un control estricto de las emisiones. Sin embargo, los datos indican un crecimiento anual en el consumo de los áridos, lo que hace difícil controlar estos daños. Esta situación ha obligado a que en los últimos años muchos autores hayan comenzado a buscar alternativas a las arenas y gravas para la fabricación de hormigón. Uno de los recursos que más éxito está cosechando es la reutilización de residuos de demolición de construcción. De hecho, el actual Código Estructural, normativa de aplicación para la ejecución de estructuras de hormigón armado, ya permite emplear áridos reciclados (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022). En este caso, solo se permiten utilizar residuos de demolición provenientes de construcciones de hormigón, y sustituyendo hasta en un 20% los áridos naturales. En el caso de porcentajes de sustitución más altos se obliga a un estudio previo y la validación por parte de la Dirección Facultativa.

Una alternativa planteada en los últimos años ha sido la utilización de ladrillo triturado (reciclado de demolición) para la sustitución parcial o completa de los áridos naturales en la fabricación de hormigón. Esta práctica no solo reduce la demanda de recursos naturales, sino que también ofrece una solución para la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD). En España, el sector de la construcción genera una cantidad significativa de RCD. Aunque no se dispone de datos exactos sobre la proporción específica de ladrillos del conjunto de estos residuos, se estima que una parte considerable corresponde a materiales cerámicos, incluyendo ladrillos y tejas. La gestión adecuada de estos residuos es crucial para minimizar su impacto ambiental y promover la economía circular (Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición 2010).

Considering the above statistics on annual concrete production, and the volume of aggregates to be used, both sands and gravels have become a natural resource with a strong demand (Dinh et al. 2022). However, this situation also has different negative aspects associated with it.

- Alteration of the landscape. Quarrying drastically modifies the natural environment, affecting the topography and aesthetics of the landscape. In cases where mining is carried out in rivers, there is also the alteration of sediments, but also the modification of natural channels and streams, or the usual flow of water. This can lead to increased damage when rivers and streams flood and cause severe flooding. The drastic modification of sediments also alters the natural flow of rivers and the substances they carry, leading to accelerated beach erosion at river mouths (Rentier and Cammeraat 2022).
- Water and air pollution. Quarrying also pollutes land and aquifers, seriously affecting human and environmental health (Singhal, Goel, and Sengupta 2020). On the other hand, some authors also highlight air pollution. Recent studies show that inorganic dust emissions in the vicinity of a quarry usually exceed the maximum concentration suitable for human life, making it necessary to use tools such as sprinklers to reduce this phenomenon (Sozaeva and Kagermazov 2020).
- Loss of biodiversity. The factors described above not only alter the landscape, but also the biodiversity that inhabits it. Air pollution reduces the suitability for life, and habitat alteration favours the displacement of endemic species (Ozcelik 2022).

To this must be added the direct and indirect costs of quarrying. To give an overview, for example, in Spain, the consumption of aggregates used in the construction sector in 2024 was over 140 million tonnes (75% of the aggregates market) according to data from the national association of aggregates manufacturers, ANEFA (ANEFA 2024).

As can be seen, there is a need to mitigate these effects through more responsible practices and strict emission controls. However, data indicate an annual growth in the consumption of aggregates, which makes it difficult to control this damage. This situation has meant that in recent years, many authors have begun to look for alternatives to sands and gravels for the concrete manufacture. One of the most successful resources is the reuse of construction demolition waste. In fact, the current Spanish Standard, the regulation applicable to the construction of reinforced concrete structures, already allows the use of recycled aggregates (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, Gobierno de España 2022). In this case, only demolition waste from concrete constructions may be used, replacing up to 20% of natural aggregates. In the case of higher replacement percentages, a prior study and validation of the Project Management is required. One alternative proposed in recent years has been the use of crushed brick (demolition recycling) for the partial or complete replacement of natural aggregates in the manufacture of concrete. This practice not only reduces the demand for natural resources, but also offers a solution for the management of construction and demolition waste. In Spain, the construction sector generates a significant amount of it. Although exact data on the specific proportion of bricks in this waste is not available, it is estimated that a considerable share is accounted for by ceramic materials, including bricks and tiles. Proper management of this waste is crucial to minimise its environmental impact and promote the circular economy (Spanish Association for Construction and Demolition Waste Recycling 2010).

Despite being a research line with great potential, the casuistry involved in using recycled aggregates makes it necessary to carry out thorough and detailed studies before being implemented in real works. For this reason, this paper presents a granulometric study of different aggregates of natural and recycled origin (ceramic waste). The aim of the work is to analyse the recycled aggregate and validate it for use as a total or partial substitute for natural aggregate when mixing concrete.

Experimental Plan

Materials and Test Methods

A total of 7 aggregates supplied by Canteras El Cerro were analysed in this study. Of the aggregates analysed, these can be grouped into one gravel of siliceous origin (G.S.1.), one limestone gravel (G.C.1.), two siliceous sands (A.S.1. and A.S.2.) and three aggregates of recycled origin from demolition ceramic waste, one gravel (G.R.1.) and two sands (A.R.1. and A.R.2.).

A pesar de ser una línea de investigación con un gran potencial, la casuística que implica utilizar áridos reciclados obliga a llevar a cabo estudios minuciosos y detallados antes de implementarse en obra real. Debido a esto, en el presente trabajo se presenta un estudio granulométrico de diferentes áridos de origen natural y reciclados (residuos cerámicos). El objetivo del trabajo es analizar el árido reciclado y validarlos para ser empleados como sustituto total o parcial del árido natural en la fabricación de hormigón.

Plan Experimental

Materiales y Métodos de Ensayo

En el presente estudio se analizaron un total de 7 áridos suministrados por Canteras El Cerro. De los agregados analizados, estos se pueden agrupar en una grava de origen silíceo (G.S.1.), una grava caliza (G.C.1.), dos arenas silíceas (A.S.1. y A.S.2.) y tres áridos de origen reciclado que provienen de residuos cerámicos de demolición, una grava (G.R.1.) y dos arenas (A.R.1. y A.R.2.).

Cada uno de estos áridos fue sometido a un estudio granulométrico de acuerdo a lo señalado en la norma española UNE-EN 933-1: 2012 (AENOR 2024). En este caso, y siguiendo las recomendaciones de este documento, en primer lugar, se seleccionó por cada uno de los áridos anteriormente descritos una muestra con una masa superior a la señalada en el Código Estructural (la normativa señala la masa mínima con la que se debe trabajar de acuerdo con el tamaño máximo de árido, y que para este caso de estudio oscila entre 600 y 1200 gramos), definida como M_1. Una vez las muestras a analizar fueron seleccionadas, estas fueron sometidas a un primer tratamiento de lavado. Para ello, cada muestra y de manera independiente, fue depositada en un recipiente que se rellenó con agua desionizada y se agitó hasta conseguir la separación y suspensión de las partículas más finas. La muestra fue posteriormente tamizada con un tamiz de 0,063 previamente humectado, obteniendo así el contenido de finos (muestra que pasa). Tras el secado de la muestra a 110±5 ºC hasta masa constante, se registró este valor como M_2, es decir, la muestra libre de finos. Esta muestra fue posteriormente sometida a un tamizado. Este procedimiento es habitual llevarlo a cabo mediante columna y agitación mecánica. Sin embargo, todo el proceso se realizó de manera manual, con los tamices disponibles en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación. En la Imagen 3 se muestran fotografías de todo el proceso de selección de muestras, tamizado y cálculo y procesado de los datos obtenidos.

Los datos obtenidos fueron procesados para obtener los siguientes parámetros. Por cada muestra y tamaño de abertura de tamiz se recopiló el dato de masa de material retenido (R_n). El porcentaje de material retenido en cada tamiz fue calculado de acuerdo con la ecuación:

$$R_n(\%) = \frac{R_n(gramos)}{M_1(gramos)} x100 \qquad [1]$$

Por otro lado, el porcentaje acumulado en cada tamiz (masa retenida en el tamiz y en sus superiores) se calculó según:

$$R_{n,a}(\%) = 100 - \sum \frac{R_i(gramos)}{M_1(gramos)} x100 \qquad [2]$$

El porcentaje de finos se obtuvo según:

$$f(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} x100 \qquad [3]$$

En paralelo a este estudio, y a partir de los datos obtenidos, se estimó también el módulo granulométrico de cada árido. Éste, se define como la suma de los porcentajes retenidos acumulados en cada tamiz, dividido por 100, es decir:

$$m = \frac{\sum R_{i,a}(\%)}{100} \qquad [4]$$

Resultados

En la Imagen 4 se muestran las curvas granulométricas obtenidas para cada uno de los áridos analizados.

Each of these aggregates was subjected to a granulometric study in accordance with the Spanish standard UNE-EN 933-1: 2012 (AENOR 2024). In this case, and following the recommendations of this document, firstly, for each of the aggregates described above, a sample was selected with a mass greater than the indicated in Spanish Standard (the standard indicates the minimum mass with which to work according to the maximum aggregate size, which for this case study ranges between 600 and 1200 grams), defined as M_1. Once the samples to be analysed were selected, they were subjected to a first washing treatment. For this, each sample was independently placed in a container filled with deionised water and shaken until the fine particles were separated and suspended. The sample was then sieved with a 0.063 sieve, previously wetted, to obtain the fine content (passing sample). After drying the sample at 110±5 ºC to constant mass, this value was recorded as M_2, i.e. the sample free of fine particles. This sample was then subjected to sieving. This procedure is usually carried out by column and mechanical agitation. However, the whole process was carried out manually, with the sieves available in the Materials Laboratory of the Building Engineering School. Image 3 shows photographs of the entire process of sample selection, sieving, calculation and processing of the data obtained.



Imagen 3. Ensayos realizados. Image 3. Performed tests.

The data obtained were processed to obtain the following parameters. For each sample and sieve opening size, the mass of retained material (R_n) was collected. The percentage of material retained on each sieve was calculated according to the equation:

$$R_n(\%) = \frac{R_n(gramos)}{M_1(gramos)} x100 \qquad [1]$$

On the other hand, the cumulative percentage on each sieve (mass retained on the sieve and above) was calculated according to:

$$R_{n,a}(\%) = 100 - \sum \frac{R_i(gramos)}{M_1(gramos)} x100 \qquad [2]$$

The percentage of fines was obtained according to:

$$f(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} x100 \qquad [3]$$

In parallel to this study, and from the data obtained, the particle size modulus of each aggregate was also estimated. This is defined as the sum of the accumulated retained percentages in each sieve, divided by 100, that is to say:

$$m = \frac{\sum R_{i,a}(\%)}{100} \qquad [4]$$

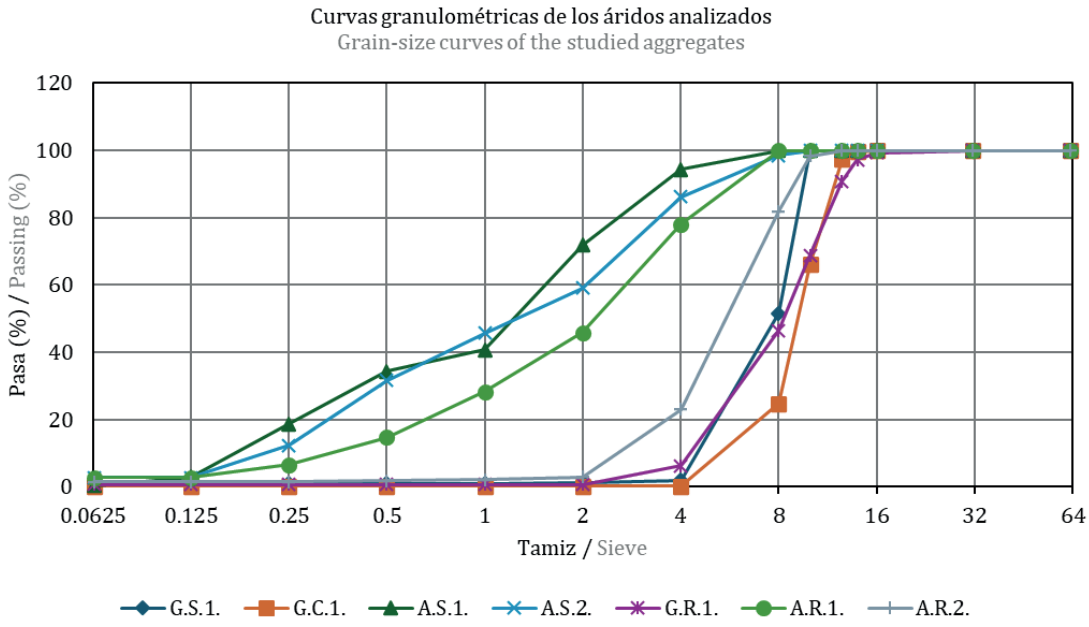


Imagen 4. Curvas granulométricas de los áridos estudiados. Image 4. Grain-size curves of the studied aggregates.

Por otro lado, en la Tabla 1 se señalan los datos más relevantes de cada muestra. De esta tabla, tanto el tamaño máximo del árido como el tamaño mínimo se determinaron de acuerdo con lo señalado en el Código Estructural (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España 2022). Este documento, entre su articulado (30.3) señala que el tamaño máximo de un árido se corresponde con la mínima abertura del tamiz UNE-EN 933-2 que retiene menos del 10% (si D>11,2) o del 15% (si D<11,2). Respecto al tamaño mínimo de un árido grueso, este se corresponde con la máxima abertura del tamiz que deja pasar como máximo el 15% (si D>11,2) o del 20% (si D<11,2).

Conclusiones

El presente estudio ha demostrado que es posible encontrar en el mercado numerosos ejemplos de áridos reciclados, en este caso, constituidos por residuos cerámicos provenientes de demoliciones de construcción. Sin embargo, el estudio granulométrico de estos y la comparativa con otros áridos naturales ha demostrado que no se puede llevar a cabo una sustitución directa, ya que existen diferencias en aspectos como tamaño máximo, módulo granulométrico o contenido de finos. A pesar de esto, combinando diferentes áridos reciclados, será posible conseguir mezclas cuya granulometría sea similar al árido natural.

Futuros trabajos

En el marco de futuros trabajos se propone el desarrollo de planes experimentales que aglutinen estudios de caracterización de hormigones en los que se realice la sustitución parcial o total de áridos naturales por áridos reciclados constituidos por residuos cerámicos provenientes de demoliciones de construcción. Unido a este trabajo, será posible validar la adecuación de estos residuos como una alternativa real que favorezca la reducción en el consumo de áridos naturales.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la Cátedra de Cambio Climático (Universitat Politècnica de València) y la Conselleria de Medio Ambiente, Infraestructuras y Territorio (Generalitat Valenciana) la adjudicación de la beca para realizar prácticas en empresa (Laboratorio de Electroquímica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación) a Alba Arenós Barrachina.

Results

Figure 4 shows the particle size curves obtained for each of the aggregates analysed.

On the other hand, Table 1 shows the most relevant data for each sample. From this table, both the maximum aggregate size and the minimum aggregate size were determined in accordance with the Spanish Standard (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, Gobierno de España 2022). This document, among its articles (30.3) states that the maximum size of an aggregate corresponds to the minimum opening of the UNE-EN 933-2 sieve that retains less than 10% (if D>11.2) or 15% (if D<11.2). Regarding the minimum size of a coarse aggregate, this corresponds to the maximum sieve opening that allows a maximum of 15% (if D>11.2) or 20% (if D<11.2) to pass through.

Tabla 1. Resultados.
Table 1. Results obtained.

ÁRIDO/ AGGREGATE	G.S.1.	G.C.1.	A.S.1.	A.S.2.	G.R.1.	A.R.1.	A.R.2.
Muestra/ Sample (g)	1690.2	1275.8	876.8	1232	1431.2	1125.3	852.8
D / D	8	12.5	4	4	12.5	10	4
d / d	4	4	0	0	4	0	0
m / m	7.40	8.11	4.37	4.61	7.87	6.85	5.21

Conclusions

This study has shown that it is possible to find numerous examples of recycled aggregates on the market, in this case, made up of ceramic waste from construction demolition. However, the granulometric study of these and the comparison with other natural aggregates has shown that a direct substitution cannot be carried out, as there are differences in aspects such as maximum size, granulometric modulus or fines content. Despite this, by combining different recycled aggregates, it is possible to obtain mixtures with a similar particle size to natural aggregates.

Future Works

Within the framework of future work, it is proposed to develop experimental plans that bring together studies on the characterisation of concrete in which the partial or total replacement of natural aggregates with recycled aggregates made up of ceramic waste from construction demolition is carried out. Together with this work, it will be possible to validate the suitability of this waste as a real alternative that favours the reduction in the consumption of natural aggregates.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Cátedra de Cambio Climático (Universitat Politècnica de València) and the Conselleria de Medio Ambiente, Infraestructuras y Territorio (Generalitat Valenciana) for the internship grant awarded to Alba Arenós Barrachina (Electrochemistry Laboratory, Building Engineering School).

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. 2024. *UNE-EN 933-1- Ensayos Para Determinar Las Propiedades Geométricas de Los Áridos. Parte 1. Determinación de La Granulometría de Las Partículas. Método Del Tamizado*.
- ANEFA. 2024. "Anuario 2023-2024 ANEFA."
- ANEFHOP, (Asociación Nacional Española de Fabricantes de Hormigón Preparado). 2024. "Datos Estadísticos Del Sector 2023."
- Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición. 2010. "Guía Española de Áridos Reciclados Procedentes de Residuos de Construcción y Demolición." http://www.caminospaisvasco.com/Profesion/documentostecnicos/guia.
- Dinh, H. L., J. Liu, Dominic E.L. Ong, and J. H. Doh. 2022. "A Sustainable Solution to Excessive River Sand Mining by Utilizing By-Products in Concrete Manufacturing: A State-of-the-Art Review." *Cleaner Materials* 6 (May): 100140. https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100140.
- ERMCO, Euroepan Ready-Mixed Concrete Organization. 2019. "Ready-Mixed Concrete Industry Statistics. Year 2019," no. July: 21.
- Gagg, Colin R. 2014. "Cement and Concrete as an Engineering Material: An Historic Appraisal and Case Study Analysis." *Engineering Failure Analysis* 40: 114–40. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004.
- Lliso-Ferrando, Josep-Ramon, Ana Martínez-Ibernón, José Enrique Ramón Zamora, and José Manuel Gandía-Romero. 2024. "Corrosion Assessment in Reinforced Concrete Structures by Means of Embedded Sensors and Multivariate Analysis — Part 2 : Implementation." *Applied Sciences (Switzerland)*.
- Miller, Sabbie A., and Frances C. Moore. 2020. "Climate and Health Damages from Global Concrete Production." *Nature Climate Change* 10 (5): 439–43. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0733-0.
- Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España. 2022. *Código Estructural*.
- Monteiro, Paulo J.M., Sabbie A. Miller, and Arpad Horvath. 2017. "Towards Sustainable Concrete." *Nature Materials* 16 (7): 698–99. https://doi.org/10.1038/nmat4930.
- Ozcelik, Mehmet. 2022. "Comparison of the Environmental Impact and Production Cost Rates of Aggregates Produced from Stream Deposits and Crushed Rock Quarries." *Geoheritage* 14 (1): 1–10. https://doi.org/10.1007/s12371-022-00659-y.
- Ramón-Zamora, J.E., J.R. Lliso-Ferrando, A. Martínez-Ibernón, and J. M. Gandiá-Romero. 2023. "Corrosion Assessment in Reinforced Concrete Structures by Means of Embedded Sensors and Multivariate Analysis . Part 1 : Laboratory Validation." *Sensors* 23 (21). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s23218869.
- Rentier, E. S., and L. H. Cammeraat. 2022. "The Environmental Impacts of River Sand Mining." *Science of the Total Environment* 838 (May): 155877. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155877.
- Sandanayake, Malindu, Yanni Bouras, Robert Haigh, and Zora Vrcelj. 2020. "Current Sustainable Trends of Using Waste Materials in Concrete—a Decade Review." *Sustainability (Switzerland)* 12 (22): 1–38. https://doi.org/10.3390/su12229622.
- Singhal, Abhishek, Sudha Goel, and Debashish Sengupta. 2020. "Physicochemical and Elemental Analyses of Sandstone Quarrying Wastes to Assess Their Impact on Soil Properties." *Journal of Environmental Management* 271 (March): 111011. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111011.
- Sozaeva, Lezhinka, and Arthur Kagermazov. 2020. "Environmental Impacts of Mining and Processing of Sand-Gravel Mix." *E3S Web of Conferences* 157. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015702020.
- Wang, Bo, Libo Yan, Qiuni Fu, and Bohumil Kasal. 2021. "A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete." *Resources, Conservation and Recycling* 171 (March): 105565. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105565.

ESTUDIO DE DIFERENTES MÉTODOS PARA LA REPARACIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO AFECTADAS POR LA CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS

METHODOLOGY FOR REPAIR OF CORROSION AFFECTED REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Josep Ramon Lliso-Ferrando
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Isabel Gasch Molina
Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: igasch@mes.upv.es
Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: igasch@mes.upv.es
Ana Martínez-Ibernón
Investigadora en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
José Manuel Gandía-Romero
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: joganro@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: joganro@csa.upv.es
Manuel Valcuende Payá
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es

Abstract

It is well known that corrosion of reinforcement is one of the main causes of premature deterioration and failure of reinforced concrete structures (RCS). This situation makes it necessary to carry out periodic inspections and, in some cases, repair works. However, these tasks are not always carried out properly, and in many cases repaired RCSs require maintenance work, which implies a high economic cost.

The aim of this work is to demonstrate the impact of using appropriate repair methods when intervening on RCSs. To this end, a patch repair was simulated, and different variables were analysed: two commercial repair mortars, surface applied passivators and passivators applied on the reinforcement. The experimental plan includes, on the one hand, an analysis of bond between concrete and reinforcement depending on passivator applied. On the other hand, a corrosion monitoring work over a period of more than three years is also presented. The results obtained demonstrate the reliability of the repairs carried out using appropriate methods and materials.

Keywords
Concrete Repairs, Concrete Durability, Corrosion, Bond

Introducción

La corrosión de las armaduras es un fenómeno habitual en estructuras de hormigón armado y está considerada como una de las principales causas de deterioro y fallo prematuro de este tipo de construcciones (Rodrigues, R. et al., 2021). Inicialmente, las armaduras quedan protegidas por una capa de óxidos originada por la alta alcalinidad de la matriz cementante (Jin, Z. et al., 2022). Sin embargo, la estabilidad de esta protección puede verse afectada por la llegada de agentes precursores de la corrosión, como la carbonatación (Fuhaid, A. & Niaz, A., 2022) o la difusión de cloruros en el hormigón (Zheng, H., 2018). Tal y como describió Tuutti (1982), mientras la capa pasiva se mantenga, la corrosión de las armaduras puede considerarse despreciable (periodo de iniciación). Sin embargo, su alteración ocasiona el incremento de la velocidad de corrosión (periodo de propagación). El avance de este proceso electroquímico origina tensiones internas en el hormigón a causa de la creación de productos de mayor tamaño que los originales. Estas tensiones propician la aparición de fisuras y cuando el daño se encuentra suficientemente avanzado, la pérdida del recubrimiento de las armaduras (Raupach, M., 1996). Por otro lado, se produce también una pérdida importante de la sección efectiva de acero de las armaduras y un descenso en la adherencia acero-hormigón. Todos estos factores generan una pérdida de capacidad mecánica importante en los elementos de hormigón armado y una disminución de la vida útil de estas construcciones (Raupach, M., 1996). Todo ello se resume en la Imagen 1.

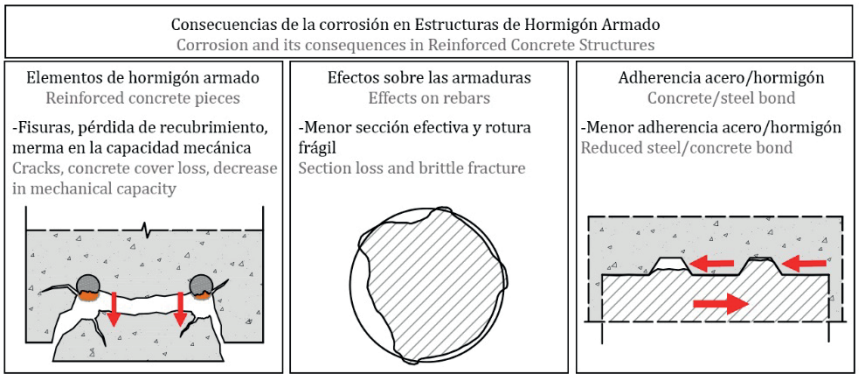


Imagen 1. Corrosión en las estructuras de hormigón armado y sus consecuencias. Image 1. Corrosion in reinforced concrete structures and its consequences.

Con la finalidad de paliar los daños por corrosión en las estructuras de hormigón armado, es muy habitual llevar a cabo tareas de reparación que permitan extender la vida útil de estas construcciones. Aunque hay diferentes métodos, el procedimiento más habitual es llevar a cabo reparaciones mediante parcheado (Su, N., 2021). Este método implica diferentes fases:

-(1) detección de las zonas afectadas por la corrosión mediante ensayos como el mapeo de potencial o el análisis de la resistividad del hormigón. Aunque son medidas cualitativas, ambas son complementarias;

-(2) una vez detectadas las zonas a reparar, la segunda fase se corresponde con la retirada del recubrimiento de las armaduras y el saneado de estas mediante cepillado;

-(3) tras la tarea de limpieza, las armaduras son protegidas con un mortero pasivante que, además, aumenta la adherencia acero-hormigón;

-(4) por último, la reparación concluye con el rellenado del parcheado empleando morteros de retracción controlada o ligeramente expansivos.

En algunos casos, es habitual además aplicar, tras la última fase, protecciones en superficie que permitan reducir la difusión de los cloruros o el avance de la carbonatación hacia el interior.

A pesar de ser procedimiento habitual y definido en diferentes estándares y recomendaciones (AENOR, 2007), son muchos los trabajos donde estas tareas no se efectúan de manera adecuada, ignorando algunas de las fases o utilizando materiales inadecuados (Andrade, C. et al., 2021; Wilkie, F., et al. 2024). Estos errores implican la necesidad de acometer tareas periódicas para mitigar los daños por los errores cometidos, lo que lleva asociado un alto coste económico.

Introduction

Reinforcement corrosion is a common phenomenon in reinforced concrete structures, and it is one of the main causes of deterioration and premature failure of this type of constructions (Rodrigues, R. et al., 2021). Initially, the reinforcement is protected by an oxide layer formed by the high alkalinity of the cementitious matrix (Jin, Z. et al., 2022). However, the stability of this protection can be affected by the arrival of corrosion precursors such as carbonation (Fuhaid, A. & Niaz, A., 2022) or chlorides (Zheng, H., 2018). As described by Tuutti (1982), if the passive layer is maintained, the corrosion of the reinforcement can be considered negligible (initiation period). However, its alteration causes the corrosion rate to increase (propagation period). The increase in this electrochemical process causes internal stresses in the concrete due to the formation of products larger than the original ones. These stresses lead to the appearance of cracks and, if the damage is sufficiently advanced, to splitting and spalling (Raupach, M., 1996). On the other hand, the effective steel section is reduced and steel-concrete bond is weakened. All these factors result in a significant reduction in the mechanical performance of the reinforced concrete elements and in the service life of these structures (Raupach, M., 1996). All this is summarised in Figure 1.

In order to mitigate corrosion damage in reinforced concrete structures, it is very common to carry out repair work to extend the service life of these constructions. Although there are different methods, the most common procedure is to carry out patch repairs (Su, N., 2021). This method consists of several phases:

-(1) detection of areas affected by corrosion through tests such as potential mapping or concrete resistivity analysis. Although they are qualitative measurements, both of them are complementary;

-(2) once the areas to be repaired have been identified, the second phase consists of removing the concrete cover and cleaning the reinforcement by brushing;

-(3) after cleaning, the reinforcement is protected with a passivating mortar which also improves the steel-concrete bond;

-(4) finally, the repair is completed by filling the patch using repair mortars.

In some cases, after the last phase it is also common to apply a surface protection to reduce the diffusion of chlorides or the concrete carbonation.

Although it is a standard procedure and it is defined in different recommendations (AENOR, 2007), there are many jobs where these tasks are not carried out properly, some of the phases are ignored or inadequate materials are used (Andrade, C. et al., 2021; Wilkie, F., et al. 2024). These errors imply the need to carry out periodic tasks to mitigate the damage caused by the mistakes made, which is associated with a high economic costs.

The aim of this work is to demonstrate the influence of carrying out corrosion repair tasks on reinforced concrete structures in an appropriate manner. To this end, the experimental plan was divided into two phases: a first test to demonstrate the improvement in the steel-concrete bond brought about using passivators applied to the reinforcement, and a second study in which the corrosion of several reinforced concrete specimens was monitored for more than three years. They were partially immersed in seawater and patch repairs were simulated on them.

Experimental Plan

Materials

In order to carry out a study covering different casuistry, three different concrete mixes were prepared, one corresponding to an ordianry concrete, and two others prepared with commercial repair mortars distributed by Sika Spain S.L. For the manufacture of the ordinary concrete, a mixture with a water-cement ratio of 0.8 was used. This dosage is outside the limits established by the Structural Code (0.65), but it is usual in research tasks to analyse the behaviour of reinforced concrete, obtaining results in a short period of time. The cement used was CEM I 42.5 from Lafarge and the aggregates used were a mixture of two sands (0/2 and 0/4) and gravel (4/8).

El objetivo de este trabajo es demostrar la influencia de llevar a cabo tareas de reparación de la corrosión en construcciones de hormigón armado de manera adecuada. Para ello, el plan experimental se ha dividido en dos fases: un primer ensayo para demostrar la mejora que supone la utilización de pasivadores aplicados sobre armadura en la adherencia acero-hormigón, y un segundo estudio, en el que se ha monitorizado durante más de tres años la corrosión sobre armaduras embebidas en hormigón y expuestas a un ambiente con cloruros donde se había simulado previamente una reparación mediante parcheado.

Plan Experimental

Materiales

Con la finalidad de realizar un estudio que abarque diferentes casuísticas, se prepararon tres dosificaciones distintas, una que se corresponde con un hormigón convencional, y otras dos preparadas con morteros de reparación comerciales distribuidos por Sika España S.L. Para la fabricación del hormigón convencional se utilizó una mezcla con una relación agua-cemento de 0,8. Esta dosificación se encuentra fuera de los límites establecidos por el Código Estructural (0,65), pero es habitual en tareas de investigación para analizar el comportamiento del hormigón armado obteniendo resultados en un corto periodo de tiempo. El cemento utilizado fue un CEM I 42.5 de la casa comercial Lafarge y como agregados, se utilizó una mezcla de dos arenas (0/2 y 0/4) y grava (4/8). Por otro lado, los morteros de reparación utilizados fueron el Sika SFG 412 (SFG 412) y el Sika Monotop 442 (MT 442). En estos morteros se incluyó también grava (4/8). Las dosificaciones empleadas para fabricar ambos morteros fueron las especificadas en la ficha técnica del producto. En la Tabla 1 se recoge la descripción de las dosificaciones para un metro cúbico (excepto para los morteros de reparación, referenciadas para 25 kg de producto, de acuerdo con las fichas técnicas de cada uno). Además, se muestran los resultados de resistencia a compresión obtenidos realizados sobre probetas cilíndricas de diámetro 100 mm y altura 200 mm, analizadas a los 28 días de edad (habiendo permanecido en cámara de curado desde su fabricación y desmoldado).

Métodos de ensayo

Monitorización de la corrosión

Por cada una de las dosificaciones descritas en la Tabla 1, se fabricaron 12 probetas cilíndricas de diámetro 50 mm y altura 100 mm, tal y como se describen en la Figura 2. En el eje central de las probetas se embebió una armadura (B500SD, Ø10 mm y altura 100 mm) que fue parcialmente protegida con tubería de PVC y resina epoxi, limitando la superficie de contacto con el hormigón a 50 mm lineales, es decir, 1,571 mm^2.

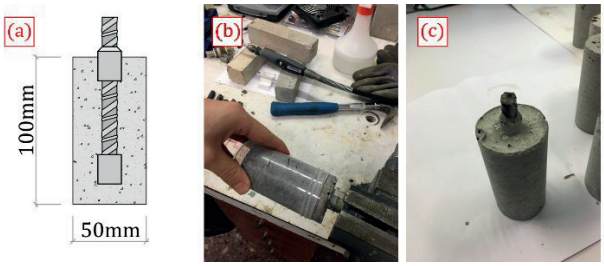


Imagen 2. Probetas fabricadas. Image 2. Manufactured test specimens.

De las 12 probetas fabricadas por cada dosificación (Tabla 1), sobre 6 de ellas se aplicó previamente al hormigonado un pasivador sobre las armaduras (Sika 910s). Se trata de un mortero a base de cemento, mejorado con resina sintética y humo de sílice, que se utiliza como capa de adherencia y como pasivador para la protección de las armaduras frente a la corrosión. Además, a los 28 días de edad, y antes de someter las probetas a las condiciones de exposición del estudio, sobre su superficie se aplicó un pasivador, en este caso, el producto Sika Ferrogard-903 Plus. Se trata de un inhibidor de corrosión activo basado en componentes orgánicos, para su aplicación en superficie, diseñado para usar mediante impregnación del hormigón armado. De cuerdo con la documentación técnica, el producto penetra en el hormigón y forma una capa protectora monocelular en la superficie del acero. Este subgrupo de probetas simula una reparación ejecutada siguiendo el procedimiento óptimo para asegurar la pasivación de las armaduras tras una reparación.

The repair mortars used were Sika SFG 412 (SFG 412) and Sika Monotop 442 (MT 442). Gravel (4/8) was also included in these mixes. The dosages used to produce both mortars were as specified in the product data sheet. Table 1 shows the description of the dosages in terms of one cubic metre (except for the repair mortars, which are in terms of 25 kg of product, according to the technical data sheets for each). Also shown are the compressive strength results obtained on cylindrical specimens (Ø 100 mm and height 200 mm) analysed after 28 days (curing period).

Tabla 1 Dosificaciones (kg/m^3 de hormigón).
Table 1 Concrete mixtures (kg/m^3).

	Concrete	SFG 412*	MT 442*
CEM I 42,5 R/SR / CEM I 42.5 R/SR	275		
Sika SFG 412 / Sika SFG 412		25	
Sika Mono Top 442 / Sika Mono Top 442			25
Agua / Water	220	3.75	4.5
Superplastificante / Superplasticizer	1.38		
Arena (0/2) / Sand (0/2)	100		
Arena (2/4) / Sand (2/4)	1302		
Grava (4/8) / Gravel (4/8)	434	10	10
Relación agua/material cementante / Water/binder ratio	0.80		
f_c (MPa) / f_c (MPa)	23.45	48.36	53.49

*La dosificación para los morteros de reparación están referidas para 25 kg de producto, tal y como se indica en la ficha técnica de los productos. *The mixture for repair mortars are in terms of 25 kg of product, according to the technical data sheets for each.

Test methods

Corrosion monitoring

For each mixture described in Table 1, 12 cylindrical specimens (Ø50 mm and height 100 mm) were produced, as described in Figure 2. A reinforcement (B500SD, Ø10 mm and height 100 mm) was embedded in the central axis of the specimens, which was partially protected with PVC pipe and epoxy painting, limiting the contact area in contact with the concrete to 50 linear mm, i.e. 1,571 mm^2.

Of the 12 specimens produced for each mix (Table 1), 6 had a passivating agent (Sika 910s) applied to the reinforcement prior to production. This is a cement-based mortar reinforced with synthetic resin and silica fume, which is used as a bonding layer and as a passivating agent to protect the reinforcement from corrosion. In addition, after a 28-day curing period, a surface-applied passivating agent, in this case Sika Ferrogard-903 Plus, was applied. This is an active corrosion inhibitor based on organic components, for surface application, designed for use by impregnation of reinforced concrete. According to the technical documentation, the product penetrates the concrete and forms a single-cell protective layer on the steel surface. This subset of specimens simulates a repair carried out according to the optimum procedure to ensure passivation of the reinforcement (patch repair described above).

Once the surface-applied passivator had dried, all specimens were partially immersed in seawater, as shown in Figure 3. The objective of carrying out this exposure method was to simulate extreme aggressive conditions, which would correspond to an XS3 exposure environment according to the current Structural Code.

The specimens were subjected to these exposure conditions for three years. The corrosion rate measurements were carried out periodically. For this purpose, the Potentiometry by Potential Steps (PSV) technique developed and patented by the SMaRT research group of the Electrochemistry Laboratory of the Higher Technical School of Building Engineering of the Polytechnic University of Valencia (Ramon Zamora, J.E., 2018) was used.

Una vez secado el pasivador aplicado en superficie, todas las probetas fueron parcialmente sumergidas en agua de mar, tal y como se muestra en la Imagen 3. El objetivo de llevar a cabo este método de exposición era simular unas condiciones de agresividad extremas, que se podrían corresponder con un ambiente de exposición XS3 de acuerdo al actual Código Estructural.

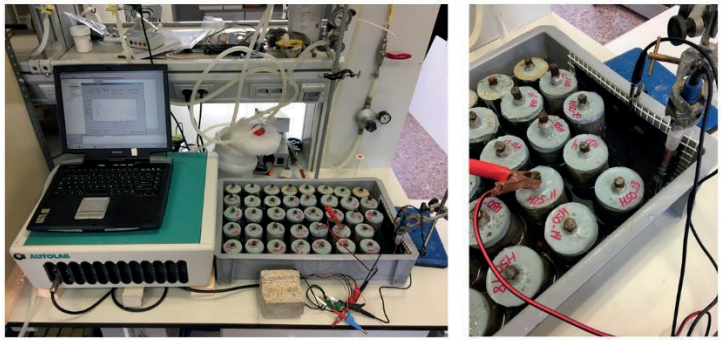


Imagen 3. Monitorización de la corrosión. Image 3. Corrosion monitoring.

Durante tres años, las probetas fueron sometidas a estas condiciones de exposición. Periódicamente se llevaron a cabo medidas de la velocidad de corrosión de cada una de las armaduras: Para ello, se utilizó la técnica de Potenciometría mediante Escalones de Potencial (PSV) desarrollada y patentada por el grupo de investigación SMaRT, del Laboratorio de Electroquímica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación de la Unviersitat Politècnica de València (Ramon Zamora, J.E., 2018). Esta técnica permite obtener la intensidad de corrosión de las armaduras embebidas en hormigón mediante la reconstrucción de las regiones lineales de las ramas anódica y catódica de Tafel. Entre las ventajas del método destacan su precisión y fiabilidad, pero también la velocidad de ensayo (menos de 15 minutos) y la no polarización de la muestra (Lliso-Ferrando, J.R., 2022). La celda utilizada para llevar a cabo el ensayo se muestra en la Imagen 3 y se compone de tres elementos: como electrodo de trabajo y elemento sobre el que se realizaron las medidas, se utilizaron cada una de las armaduras embebidas en las probetas; como contraelectrodo, se utilizó una pieza de gran superficie de acero inoxidable parcialmente sumergida en la disolución. Por último, como electrodo de referencia, se utilizó un electrodo comercial SCE (Radiometer Analytical XR110) también parcialmente sumergido en la disolución.

Ensayo de adherencia acero-hormigón

En paralelo al estudio de monitorización de la corrosión, se realizó un análisis de la influencia que tiene la utilización de pasivadores aplicados en la superficie de las armaduras sobre la adherencia acero hormigón. Para ello, se fabricaron probetas cúbicas de 200 mm de lado, con una armadura (B500 SD, Ø16mm) atravesando la misma de 750 mm de longitud, tal y como se muestra en la Figura 4. La superficie de la armadura en contacto con hormigón se limitó a cinco veces el diámetro, siendo por tanto 4,021 mm^2.

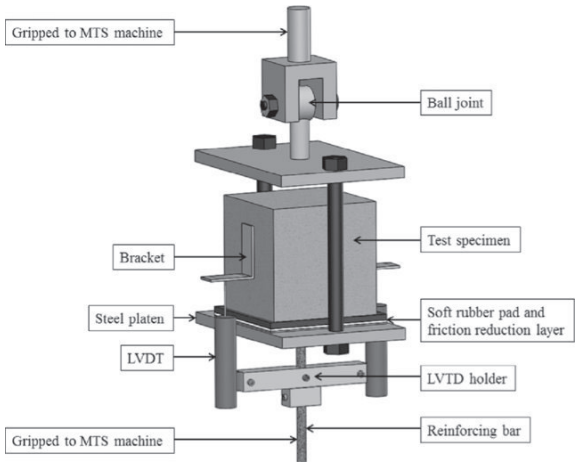


Imagen 4. Ensayo de adherencia acero-hormigón. Image 4. Pull-out test (Anderson et al., 2018).

This technique makes it possible to obtain the corrosion rate of reinforcement embedded in concrete by reconstructing the linear regions of the anodic and cathodic Tafel slopes. Among the advantages of the method are its precision and reliability, but also the testing time (less than 15 minutes) and the rebar non-polarisation (Lliso-Ferrando, J.R., 2022). The cell used to carry out the test is shown in Figure 3 and is made up of three elements: rebar as working electrode, a large stainless-steel piece partially immersed in the solution as counter electrode and a commercial SCE (Radiometer Analytical XR110) electrode, also partially immersed in the solution, as a reference electrode.

Steel-concrete bond test

In parallel to the corrosion monitoring study, the influence of passivators on the steel-concrete bond was also investigated. For this purpose, cubic specimens (200 mm height) were prepared. A 750 mm long transverse reinforcement (B500 SD, Ø16mm) was embedded as shown in Figure 4. The surface area of the reinforcement in contact with the concrete was limited to five times the diameter (i.e. 4.021 mm^2).

All samples were produced at the same time. After production, the samples were kept in their moulds for 48 hours under laboratory conditions (20±5ºC and relative humidity of 60±5%). After this initial period, the specimens were removed from the moulds and stored in a curing chamber (20±2ºC and relative humidity above 95%) for 28 days.

A total of 12 specimens were manufactured, 9 with ordinary concrete and three with Sika 442 repair mortar, the dosages of which are shown in Table 1. On the specimens manufactured with ordinary concrete, in three of them no treatment was applied, while in the other six different treatments were applied: on three of them the passivator was applied on the surface 24 hours before concreting, allowing it to dry, while on the other three the passivator was applied only two hours before, concreting while the concrete was still in a fresh state (conditions defined in the product data sheet as optimal for carrying out repair tasks). On the other hand, the specimens made with the repair mortar, the passivator was also applied to the reinforcement two hours before concreting.

After curing, the samples were subjected to a bond test as defined in the ASTM C234-91a Standard. This is a test in which the samples are subjected to a pull-out force that indirectly allows the steel-concrete bond to be measured.

Results

Pull-out tests

Figure 5 shows the results of the 12 pull-out tests carried out on the previously defined test specimens. This figure shows the evolution of the displacement versus the normalised bond stress.

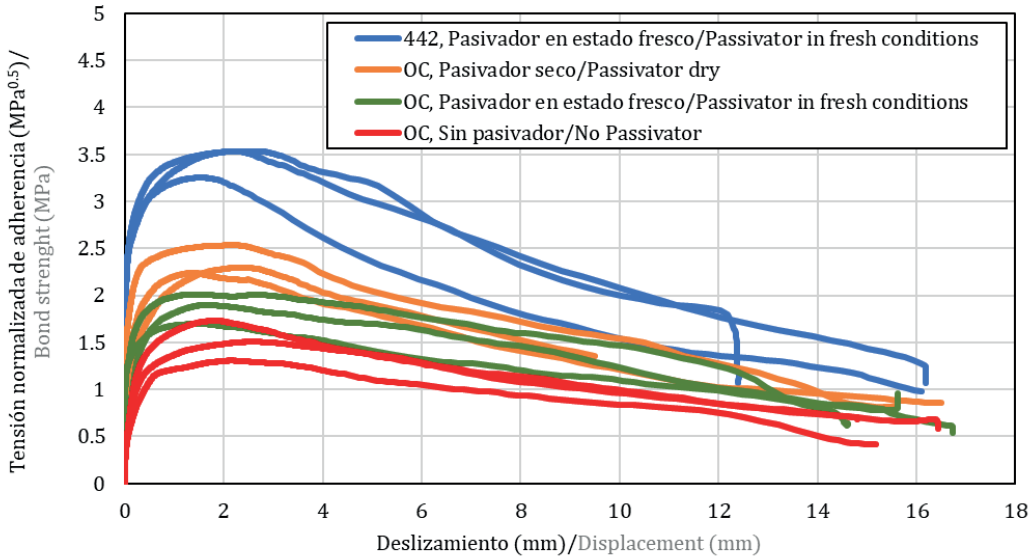


Imagen 5. Resultados del ensayo de adherencia acero-hormigón. Image 5. Pull-out test results.

La fabricación de estas probetas se llevó a cabo al mismo tiempo que todo el plan experimental. Una vez fabricadas, las probetas fueron mantenidas en sus moldes durante 48 horas, en condiciones de laboratorio (20±5ºC y humedad relativa del 60±5%). Tras este primer periodo, las muestras fueron desmoldadas y almacenadas en cámara de curado (20±2ºC y humedad relativa por encima del 95%) hasta la edad de 28 días.

En total se fabricaron 12 probetas, 9 con hormigón convencional, y tres de ellas con el mortero de reparación Sika 442, cuyas dosificaciones se indicaban en la Tabla 1. Sobre las probetas fabricadas con hormigón convencional, en tres de ellas no se aplicó ningún tratamiento sobre la superficie del acero, mientras que en las otras seis sí: sobre tres de ellas se aplicó el pasivador en superficie 24 horas antes del hormigonado, permitiendo que secara, mientras que sobre las otras tres el pasivador se aplicó solo dos horas antes, hormigonando mientras este todavía se mantenía en estado fresco (condiciones definidas en la ficha técnica del producto como óptimas para llevar a cabo tareas de reparación). Por otro lado, las probetas fabricadas con el mortero de reparación, sobre la armadura se aplicó también el pasivador dos horas antes del hormigonado.

Tras el curado, las muestras fueron sometidas a un ensayo de adherencia tal y como se define en la norma de ensayo ASTM C234-91a. Se trata de un ensayo en el que las muestras son sometidas a una fuerza de arrancamiento que indirectamente permite medir la adherencia acero-hormigón.

Resultados

Ensayos de pull-out

En la Imagen 5 se recogen los resultados de los 12 ensayos de pull-out llevados a cabo sobre las muestras definidas previamente. En esta figura se recoge la evolución del deslizamiento frente a la tensión de adherencia normalizada.

Tal y como muestran los datos, la utilización de pasivadores aplicados sobre las armaduras no reduce la adherencia acero-hormigón, sino que, por el contrario, la mejora entre un 20% y un 25%. Por otro lado, se puede afirmar que las diferencias entre hormigonar cuando el pasivador se encuentra en estado fresco o en estado endurecido son mínimas. En cambio, la utilización de pasivadores y morteros de reparación demostró tener una mejora en la adherencia de casi un 50% respecto al hormigón convencional.

Monitorización de la corrosión

En la Imagen 6 se muestran los resultados promedio de la velocidad de corrosión obtenidos durante los tres años que se realizó la monitorización de la corrosión.

Como se puede ver, las muestras fabricadas con los morteros de reparación mostraron cierto comportamiento errático durante el primer año, sin embargo, los últimos datos obtenidos estaban por debajo de 0,1 $\mu A/cm^2$, umbral considerado para estimar una velocidad de corrosión despreciable. No se pudieron establecer diferencias claras entre las muestras con pasivador y sin pasivador, lo que denota la eficacia del mortero de reparación. Por otro lado, las muestras fabricadas con el hormigón convencional mostraron velocidades de corrosión medias más altas, alcanzando al final del estudio valores por encima de 1 $\mu A/cm^2$, lo que denota una intensidad de corrosión alta.

Conclusiones

En el presente estudio se ha demostrado la influencia que tiene la utilización de productos y metodologías adecuadas a la hora de efectuar una reparación por corrosión en estructura de hormigón armado. Los resultados obtenidos demuestran que la utilización de morteros de reparación, junto con pasivadores en superficie y sobre armadura consiguen mitigar hasta 10 veces el daño por corrosión que se produciría en hormigón convencional. Por otro lado, se ha demostrado la mejora en la adherencia que genera la utilización de pasivador sobre la armadura. No solo protege del daño por corrosión, sino que además mejora en casi un 50% la adherencia acero-hormigón.

The data show that using passivators applied to the reinforcement does not reduce the steel-concrete bond, but on the contrary improves it by 20% to 25%. On the other hand, the differences between concreting with fresh and hardened passivators are minimal. On the other hand, using passivators and repair mortars showed an improvement in bond strength of almost 50% compared to normal concrete.

Corrosion Monitoring

Figure 6 shows the average corrosion rate results obtained during monitoring period.

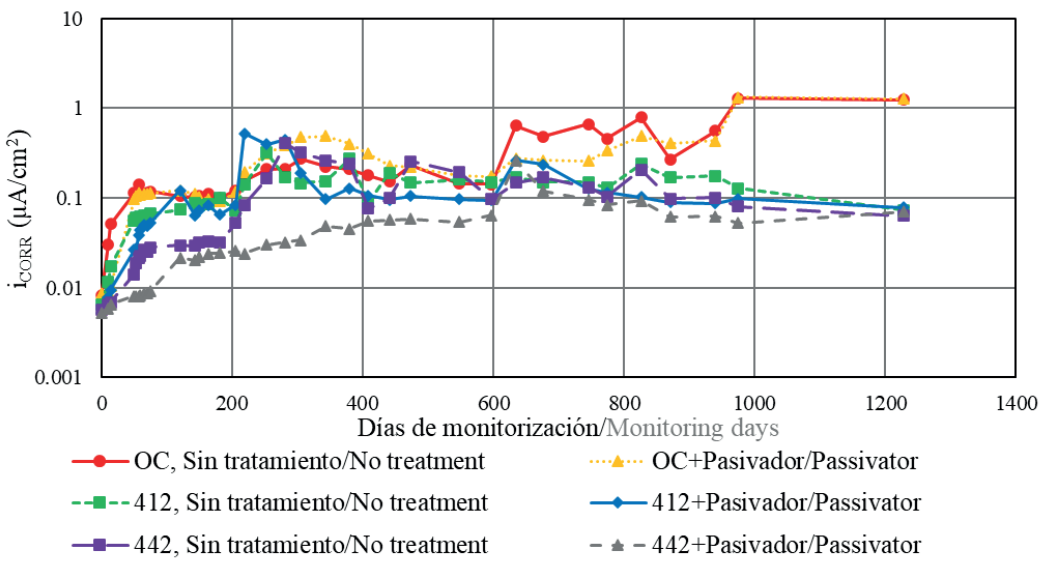


Imagen 6. Resultados promedio de la monitorización de la corrosión. Image 6. Average results obtained during corrosion monitoring.

As can be seen, the samples made with the repair mortars showed some erratic behaviour during the first year, however, the last data obtained were below 0.1 µA/cm^2, a threshold considered to estimate a negligible corrosion rate. No clear differences could be established between the passivated and non-passivated samples, denoting the effectiveness of the repair mortar. On the other hand, the samples made with the ordinary concrete showed higher average corrosion rates, reaching values above 1 µA/cm^2 at the end of the study, which denotes a high corrosion rate.

Conclusions

This study has proved the influence of using appropriate products and methodologies when carrying out corrosion repairs on reinforced concrete structures. The results obtained showed that the use of repair mortars, together with passivators on the surface and on the reinforcement, can mitigate up to 10 times the corrosion damage that would occur in ordinary concrete. On the other hand, the improvement in bond stress generated by using passivator on the reinforcement has been demonstrated. Not only does it protect against corrosion damage, but it also improves steel-concrete adhesion by almost 50%.

AGRADECIMIENTOS/ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the Spanish Government for the Grant PID2020-119744RB-C21 funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033.Furthermore, they thank the support of the Universitat Politècnica de València. The predoctoral scholarship granted to Josep Ramon Lliso Ferrando as part of the "Formación de Personal Investigador" programme from the Universitat Politècnica de València (FPI-UPV-2018) and the Grant FPU 16/00723 funded by MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 and by "ESF Investing in your future".

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- AENOR, A. E. de N. y C. *UNE-EN 1504-7:2007. Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Definiciones, requisitos, control de calidad y evaluación de la conformidad. parte 7: protección contra la corrosión de las armaduras*. , (2007).
- Andrade Perdrix, M. del C., Castro-Borges, P., & Pazini, E. (2021). Detección del riesgo de corrosión al lado de las reparaciones por parcheo. *Hormigón y Acero*, *72*(294/295), 41–58. https://doi.org/10.33586/hya.2021.3066
- Fuhaid, A. F. Al, & Niaz, A. (2022). Carbonation and Corrosion Problems in Reinforced Concrete Structures. *Buildings*, *12*(5), 1–20. https://doi.org/10.3390/buildings12050586
- Jin, Z., Zhao, X., Du, Y., Yang, S., Wang, D., Zhao, T., & Bai, Y. (2022). Comprehensive properties of passive film formed in simulated pore solution of alkali-activated concrete. *Construction and Building Materials*, *319*(December 2021), 126142. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126142
- Lliso-Ferrando, J. R. (2022). *Monitorizacion de la durabilidad de estructuras existentes de hormigon armado mediante la inserción de una red de sensores*. Universitat Politècnica de València.
- Ramon Zamora, J. E. (2018). *Sistema de Sensores Embebidos para Monitorizar la Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado . Fundamentos , Metodología y Aplicaciones*.
- Raupach, M. (1996). Chloride-induced macrocell corrosion of steel in concrete--theoretical background and practical consequences. *Construction and Building Materials*, *10*(5), 329–338.
- Rodrigues, R., Gaboreau, S., Gance, J., Ignatiadis, I., & Betelu, S. (2021). Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring. *Construction and Building Materials*, *269*, 121240. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121240
- Su, N., Lou, L., Amirkhanian, A., Amirkhanian, S. N., & Xiao, F. (2021). Assessment of effective patching material for concrete bridge deck -A review. *Construction and Building Materials*, *293*, 123520. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123520
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of Steel in Concrete*. Swedish Cement and Concrete Research institute, Stockholm.
- Wilkie, S., Farrell, D., Lauder, N., & Goncalves, A. P. A. (2024). Performance Evaluation of Patch Repairs on Historic Concrete Structures (PEPS): Preliminary Results from Two English Case Studies. *RILEM Bookseries*, *46*, 899–912. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39450-8_73
- Zheng, H., Dai, J. G., Li, W., & Poon, C. S. (2018). Influence of chloride ion on depassivation of passive film on galvanized steel bars in concrete pore solution. *Construction and Building Materials*, *166*, 572–580. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.174

DURABILIDAD DE HORMIGONES FABRICADOS CON DISTINTOS CEMENTOS

CORROSION PERFORMANCE OF CONCRETES MANUFACTURED WITH DIFFERENT CEMENTS

Josep Ramon Lliso-Ferrando
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Isabel Gasch Molina
Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: igasch@mes.upv.es
Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: igasch@mes.upv.es
Ana Martínez-Ibernón
Investigadora en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
José Manuel Gandía-Romero
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: joganro@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: joganro@csa.upv.es
Manuel Valcuende Payá
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es
Juan Soto Camino
Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València. E-mail: jsotoca@upv.es
Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: jsotoca@upv.es

Abstract

Concrete is the most widely used building material in the world. However, its production and that of its components are one of the processes that emits the most carbon dioxide emissions into the atmosphere (close to 6%). Because of this, there are a lot of works focused on reducing the environmental impact of its production. One of the most interesting lines of work is the development of cement with additions. In this work, the corrosion performance of four identical concretes prepared with different cements is evaluated. On the one hand, results of characterization tests are presented, and on the other hand, a corrosion monitoring study of rebars embedded in each type of concrete which were exposed to a marine environment is presented too. The study lasted more than a year and demonstrated the advantages of concrete with additions both in terms of performance and the environmental benefits of their use.

Keywords
Concrete, Corrosion Performance, Durability, Sustainability

Introducción

Actualmente, el hormigón es el material de construcción más utilizado del mundo (Ahmad et al., 2021; Federico & Chidiac, 2009). Esto se debe a diversos factores, como por ejemplo su versatilidad, las propiedades que ofrece o la disponibilidad y el reducido coste de sus componentes. Uno de ellos es el cemento. Las últimas estadísticas indican que la producción de cemento está aumentando en un 2,5% anualmente. En 2005 se alcanzaron a producir 2300 millones de toneladas, en 2020 se superaron los 3500 millones de toneladas, y está previsto superar en 2050 los 4000 millones (Ahmad et al., 2021). Sin embargo, el proceso de producción de cemento también ha sido identificado como uno de los procesos más contaminantes y que más gases de efecto invernadero emite a la atmósfera.

La producción de cemento implica una combinación controlada de elementos químicos como calcio, silicio, aluminio o hierro. Estos materiales se encuentran en la naturaleza combinados con otros minerales, lo que requiere un proceso industrial de trituración y homogeneización, además de calcinación de materiales, tal y como se resume en la Imagen 1.

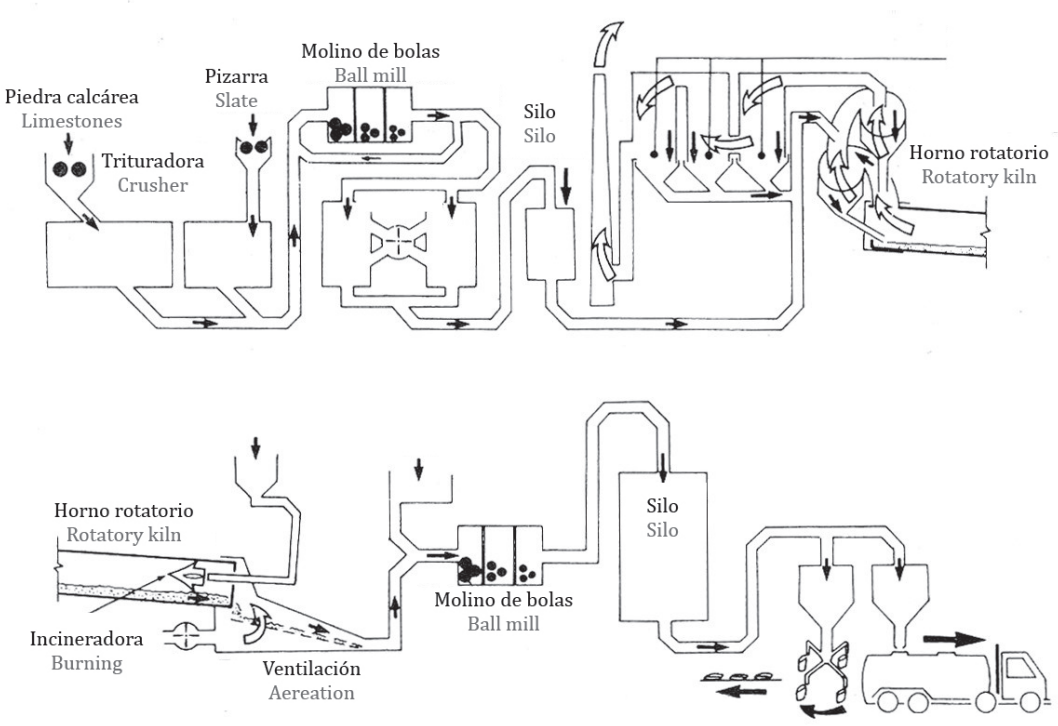


Imagen 1. Diagrama sobre el proceso de producción de cemento. Image 1. Diagram of the cement production process.

Todo este proceso ha sido identificado como altamente contaminante por diferentes razones, y que se pueden resumir en los siguientes puntos (Bildirici, 2019; Chen et al., 2015):

- Emisiones de dióxido de carbono (CO_2). La producción de cemento es uno de los procesos industriales que más dióxido de carbono emite a la atmósfera. Casi un 6% del total mundial. La principal fuente de emisiones de CO_2 en la fabricación de cemento es el proceso de calcinación de las materias primas.
- La calcinación de las materias primas requiere también un gran consumo de energía. En muchas ocasiones, la dependencia de combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo o el gas natural para calentar los hornos contribuye indirectamente también a las emisiones de gases de efecto invernadero y a la contaminación atmosférica.
- Emisiones de partículas volátiles. Los hornos y el proceso de molienda del cemento pueden generar emisiones de polvo y partículas finas perjudiciales para la salud y que pueden ocasionar problemas respiratorios. Además, contribuyen a la reducción de la calidad del aire en las zonas circundantes.

Introduction

Currently, concrete is the most widely used building material in the world (Ahmad et al., 2021; Federico & Chidiac, 2009). This is due to several factors, such as its versatility, the properties it offers and the availability and low cost of the raw materials. One of these is cement. The latest statistics indicate that cement production is increasing by 2.5% annually. In 2005 2.3 billion tonnes of cement were produced, in 2020 it exceeded 3.5 billion tonnes, and in 2050 it is expected to exceed 4 billion tonnes (Ahmad et al., 2021). However, the cement production process has also been identified as one of the most polluting and greenhouse gas emitting processes.

Cement production involves a controlled combination of chemical elements such as calcium, silicium, aluminium or iron. These materials are found in nature combined with other minerals, which requires an industrial process of crushing and homogenisation, as well as calcination of materials, as summarised in Figure 1.

This whole process has been identified as highly polluting for different reasons, which can be summarised as follows (Bildirici, 2019; Chen et al., 2015):

- Carbon dioxide (CO_2) emissions. Cement production is one of the industrial processes that emits the most carbon dioxide into the atmosphere. Almost 6% of the world total. The main source of CO_2 emissions in the manufacture of cement is the process of calcining the raw materials.
- The calcination of raw materials also requires high energy consumption. In many cases, the reliance on fossil fuels such as coal, oil or natural gas to heat the cement kilns also indirectly contributes to greenhouse gas emissions and air pollution.
- Volatile particulate emissions. Cement kilns and the cement grinding process can generate emissions of dust and fine particles that are harmful to health and can cause respiratory problems. They also contribute to the reduction of air quality in the surrounding areas.
- On the other hand, although to a lesser extent, emissions of other components such as nitrogen oxides, sulphur dioxide and mercury emissions are also generated, which are also highly polluting.
- Finally, aspects such as water and soil pollution should not be forgotten, especially due to inadequate storage processes, damaging entire ecosystems (Oluseyi et al., 2011). Noise pollution in the surroundings of cement producing industries must also be considered.

To reduce the environmental impact of this process, much work has focused on partial substitution of cement composites. One of the most successful products is blast slag furnace.

Blast slag furnace is a mineral residue, obtained from the smelting of iron in blast furnaces. It contains calcium, silica and aluminium oxides in different proportions to the usual Portland cement. This composition means that the partial replacement of cement with this component is currently being considered, taking advantage of an inert mineral waste for a new process, in this case, the manufacture of concrete. The environmental benefits have been extensively studied and demonstrated (Li et al., 2016). However, there is still some uncertainty about the response that concretes made with blast slag furnace can offer from a durability point of view (Osborne, 1999; Osmanovic et al., 2018).

Due to this, the authors of this work present an analysis of the behaviour of concretes with blast slag furnace by means of the analysis of different properties related to durability. For this purpose, tests of different parameters have been carried out, and, in addition, the response of these concretes with respect to reinforcement corrosion, identified as one of the most frequent pathologies in reinforced concrete structures, has been analysed.

Experimental Plan

Materials

In order to carry out the analysis of the response of different cements in terms of durability, 4 different concretes were manufactured, the dosage of which is shown in Table 1.

- Por otro lado, y aunque en menor medida, también se generan emisiones de otros componentes, como óxidos de nitrógeno, dióxido de sulfuro y emisiones de mercurio, que también son altamente contaminantes.
- Por último, no se deben olvidar aspectos como la contaminación de agua y suelos, sobre todo por procesos de almacenamiento inadecuados, dañando ecosistemas completos (Oluseyi et al., 2011). La contaminación acústica en los entornos de las industrias productoras de cemento debe ser también considerada.

Para reducir su impacto ambiental, muchos trabajos se han centrado en buscar la sustitución parcial de los compuestos de cemento. Uno de los productos que más éxito ha cosechado es la escoria de alto horno.

La escoria de alto horno es un residuo mineral, obtenido de la fundición de hierro en hornos altos. Continente óxidos de calcio, sílice y aluminio en proporciones diferentes al cemento Portland habitual. Esta composición permite que se contemple actualmente la sustitución parcial de cemento por este componente, aprovechando un residuo mineral inerte para un nuevo proceso, en este caso, la fabricación de hormigón. Las ventajas a nivel medioambiental han sido ampliamente estudiadas y demostradas (Li et al., 2016). Sin embargo, existe todavía cierta incertidumbre sobre la respuesta que los hormigones fabricados con escoria de alto horno pueden ofrecer desde el punto de vista de la durabilidad (Osborne, 1999; Osmanovic et al., 2018).

Debido a esto, los autores de este trabajo presentan un análisis sobre el comportamiento de hormigones con escoria de alto horno mediante el análisis de diferentes propiedades relacionadas con la durabilidad. Para ello, se han llevado a cabo ensayos de distintos parámetros, y, además, se ha analizado la respuesta de estos hormigones respecto a la corrosión de las armaduras, identificada como una de las patologías más frecuentes en estructuras de hormigón armado.

Plan Experimental

Materiales

Para llevar a cabo el análisis de la respuesta que tienen diferentes cementos en lo que respecta a durabilidad, se fabricaron 4 hormigones distintos, cuya dosificación se muestra en la Tabla 1. Como se puede apreciar, se trata de 4 hormigones idénticos en cuanto a dosificación, donde únicamente varía el tipo de cemento utilizado. De los cuatro materiales preparados, uno fue preparado con CEM I 42.5, lo que se corresponde a un cemento sin ningún tipo de adición, y dos de las mezclas fueron preparadas con CEM II 42.5, una de tipo A-L y otra B-M. En este caso, se trata de mezclas que incorporan varias adiciones en diferentes proporciones. El cuarto hormigón fue preparado con CEM III 42.5, es decir, con alto contenido en escoria de alto horno. Todos los hormigones fueron preparados con una mezcla de áridos silíceos (arena 0/4 y grava 4/8) y la inclusión de aditivo superplastificante (SP) (Sika Viscocrete-20HE).

Tabla 1 Dosificaciones (kg/m^3 de hormigón).
Table 1 Mixtures (kg/m^3).

Cemento/Cement	Cemento/Cement	SP/SP	Arena/Sand	Grava/Gravel	Agua/Water
C42.5-CEM I	313,3	1,88	1.202,48	676,73	188
C42.5-CEM II A-L	313,3	1,88	1.202,48	676,73	188
C42.5-CEM II B-M	313,3	1,88	1.202,48	676,73	188
C42.5-CEM III	313,3	1,88	1.202,48	676,73	188

En total por cada hormigón se fabricaron 35 L, correspondiente al volumen necesario para preparar las probetas necesarias para realizar los ensayos descritos en la Tabla 2. Todas las probetas fueron fabricadas libres de armaduras, excepto 2 cúbicas (150x150x150 mm) donde se embebieron cuatro armaduras B500SD de Ø10 mm y 150 mm de longitud, pero cuya superficie en contacto con hormigón se limitó a 50 mm lineales (1,571 mm^2 de superficie efectiva). Esto se realizó fabricando un encapsulado con tubería de PVC rellena de pintura epoxi.

As can be seen, these are 4 identical concretes in terms of dosage, where only the type of cement used varies. Of the four materials prepared, one was prepared with CEM I 42.5, which corresponds to a cement without any type of addition, and two of the mixtures were prepared with CEM II 42.5, one of type A-L and the other B-M. In this case, these are mixes incorporating various additions in different proportions. The fourth concrete was prepared with CEM III 42.5, i.e. with a high blast furnace slag content. All concretes were prepared with a mixture of siliceous aggregates (sand 0/4 and gravel 4/8) and the inclusion of superplasticising (SP) admixture (Sika Viscocrete-20HE).

A total of 35 L were manufactured for each concrete, corresponding to the volume necessary to prepare the specimens required to carry out the tests described in Table 2. All the specimens were manufactured free of reinforcement, except for 2 cubic specimens (150x150x150 mm) where four B500SD reinforcements of Ø10 mm and 150 mm in length were embedded, but whose surface in contact with concrete was limited to 50 linear mm (1,571 mm2 of effective surface area). This was done by manufacturing an encapsulation with PVC pipe filled with epoxy paint.

Once the specimens were manufactured, they remained in their moulds for 48 hours under laboratory conditions (25±2ºC and relative humidity between 55% and 75%). To avoid excessive moisture loss and to favour curing, the samples were protected with hessian sacks. Once this period was over, the specimens were demoulded and stored in a curing chamber (20±2ºC and relative humidity above 90%) until they reached the age of 28 days, when the corresponding tests were carried out.

Tabla 2 Probetas fabricadas.
Table 2 Manufactured test specimens.

Probetas Test specimens	Volumen (Litros) Volume (Litres)	Número de probetas Test specimens number	Volumen total (Litros) Total volume (Litres)
15x15x15	3.375	2	6.75
10x10x10	1.000	2	2.00
Ø10x20	1.571	7	11.00
10x10x40	4.000	2	8.00
4x4x16 (x3)	0.768	1	0.77
		Total	28.51
		Total + 20%	≈35 L

Test methods

A summary of the tests carried out and the age at which they were performed is presented in Table 3. In some cases, tests were carried out at different ages (28 and 90 days), while others consisted of monitoring a specific parameter over time. One of these was the analysis of corrosion in embedded reinforcement, a process that lasted for more than a year. To carry out this measurement, the specimens were partially immersed in chloride water and corrosion intensity measurements were taken periodically. This measurement was carried out using the voltammetry method by means of potential steps, developed and validated in previous works (Lliso-Ferrando, 2022; Martínez-Ibernón et al., 2019; J. E. Ramón et al., 2019; Jose Enrique Ramón et al., 2021). For this purpose, a piece of stainless steel and a reference electrode (saturated calomel electrode) were partially immersed in the same solution where the specimens were located. In this way, a three-electrode measuring cell was created: each of the armatures as the working electrode, the stainless steel as the counter electrode and the calomel as the reference electrode.

Results

Materials characterization

Table 4 shows a summary of the results obtained for each of the tests detailed above.

Una vez fabricadas las probetas, estas permanecieron en sus moldes durante 48 horas en condiciones de laboratorio (25±2ºC y humedad relativa entre el 55% y 75%). Para evitar una pérdida excesiva de humedad y favorecer el curado, las muestras fueron protegidas con sacos de arpillera. Una vez finalizado este periodo, las probetas fueron desmoldadas y almacenadas en cámara de curado (20±2ºC y humedad relativa superior al 90%) hasta cumplir la edad de 28 días, cuando se llevaron a cabo los ensayos correspondientes.

Métodos de ensayo

En la Tabla 3 se presenta un resumen de los ensayos llevados a cabo y la edad a la que estos se realizaron. En algunos casos, hubo ensayos que se realizaron a edades distintas (28 y 90 días), mientras que otros consistieron en la monitorización de una propiedad concreta a lo largo del tiempo. Uno de ellos fue el análisis de la corrosión en armaduras embebidas, proceso que se extendió durante más de un año. Para llevar a cabo esta medida, las probetas fueron parcialmente sumergidas en agua con cloruros y periódicamente se realizaron medidas de la intensidad de corrosión. Esta medida se realizó utilizando el método de voltametría mediante escalones de potencial, desarrollada y validada en anteriores trabajos (Lliso-Ferrando, 2022; Martínez-Ibernón et al., 2019; J. E. Ramón et al., 2019; Jose Enrique Ramón et al., 2021). Para ello, en la misma disolución donde se encontraban las probetas, se sumergió parcialmente una pieza de acero inoxidable y un electrodo de referencia (electrodo de calomelanos saturado). De esta forma, se creó una celda de medida a tres electrodos: cada una de las armaduras como electrodo de trabajo, el acero inoxidable como contraelectrodo y el calomelanos como electrodo de referencia.

Tabla 3 Test methods.
Table 3 Test methods.

	Método Standard	Edad de ensayo Test age
Resistencia a compresión / Compressive strength	UNE 12390-3	28/90 días/days
Porosidad / Porosity accesible to water	UNE 83980	28/90 días/days
Absorción por capilaridad / Capillar absorption	UNE 83982	28/90 días/days
Difusión de cloruros / Chloride diffusion coefficient	NT-Build 492	28/90 días/days
Resistivity / Resistivity	UNE 83988	Monitorización/Monitoring
Monitorización de corrosión / Corrosion monitoring	-	Monitorización/Monitoring

Resultados

Caracterización de los materiales fabricados

En la tabla 4 se presenta un resumen de los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos detallados previamente.

Como se puede ver, el hormigón con mejores prestaciones es el fabricado con CEM III, es decir, aquel que incorpora escoria de alto horno. La inclusión de este residuo mineral permite reducir entre un 2% y un 4% propiedades como la porosidad o la absorción capilaridad, parámetros estrechamente relacionados con la durabilidad, ya que están vinculados a la dificultad que pueden tener agentes precursores de la corrosión (cloruros o carbonatación) de penetrar y alcanzar las armaduras. Por otro lado, el CEM III también ha demostrado tener una mayor resistencia a la difusión de cloruros lo que ralentizaría la aparición de procesos de corrosión. Además, el hormigón fabricado con CEM III ha demostrado tener una resistividad el doble de alta que los otros hormigones, denotando la dificultad de que se produjera movilidad iónica, y por tanto procesos electroquímicos como la corrosión, en el interior del material.

Monitorización de la corrosión

En la Imagen 2 se muestra la evolución de la intensidad de corrosión promedio de cada grupo de estudio. En esta gráfica se han señalado los umbrales establecidos en la recomendación RILEM-TC 145 para clasificar el nivel de corrosión.

Tabla 4 Resultados.
Table 4 Results.

	Type	28 días 28 days	90 días 90 days
Resistencia a compresión / Compressive strength	CEM I	32.96 MPa	32.93 MPa
Porosidad / Porosity accesible to water		15.08 %	14.87 %
Absorción por capilaridad / Capillar absorption		431.1 Δm/s	505.20 Δm/s
Difusión de cloruros / Chloride diffusion coefficient		$5.95x10^{-12}$ m^2/s	$4.99 x10^{-12}$ m^2/s
Resistencia a compresión / Compressive strength	CEM II A-L	27.59 MPa	28.13 MPa
Porosidad / Porosity accesible to water		15.43 %	15.32 %
Absorción por capilaridad / Capillar absorption		531.23 Δm/s	577.73 Δm/s
Difusión de cloruros / Chloride diffusion coefficient		$7.28 x10^{-12}$ m^2/s	$6.80 x10^{-12}$ m^2/s
Resistencia a compresión / Compressive strength	CEM II B-M	33.37 MPa	30.71 MPa
Porosidad / Porosity accesible to water		15.55%	15.82 %
Absorción por capilaridad / Capillar absorption		405.03 Δm/s	416.03 Δm/s
Difusión de cloruros / Chloride diffusion coefficient		$7.99 x10^{-12}$ m^2/s	$5.38 x10^{-12}$ m^2/s
Resistencia a compresión / Compressive strength	CEM III	34.52 MPa	34.92 MPa
Porosidad / Porosity accesible to water		14.56 %	13.81 %
Absorción por capilaridad / Capillar absorption		364.02 Δm/s	358.17 Δm/s
Difusión de cloruros / Chloride diffusion coefficient		$2.43 x10^{-12}$ m^2/s	$2.78 x10^{-12}$ m^2/s
Resistividad/Resistivity Resultado promedio/Average result	I	117.23 Ωm	
	II A-L	169.14 Ωm	
	II B-M	182.34 Ωm	
	III	311.07 Ωm	

As can be seen, the concrete with the best performance is that made with CEM III, i.e., that which incorporates blast furnace slag. The inclusion of this mineral residue reduces properties such as porosity or capillary absorption by between 2% and 4%, parameters closely related to durability, as they are linked to the difficulty that corrosion precursors (chlorides or carbonation) can have in penetrating and reaching the reinforcement. On the other hand, CEM III has also been shown to have a higher resistance to chloride diffusion, which would slow down the appearance of corrosion processes. Furthermore, concrete made with CEM III has been shown to have a resistivity twice as high as that of other concretes, indicating the difficulty of ionic mobility, and therefore electrochemical processes such as corrosion, occurring inside the material.

Corrosion monitoring

Figure 2 shows the evolution of the average corrosion intensity of each study group. This graph shows the thresholds established in the RILEM-TC 145 recommendation for classifying the level of corrosion.

The results obtained show a great difference between each of the concretes studied. The one made with CEM III was the only one that maintained a low corrosion level (below 0.1 μA/cm2) throughout the study. In contrast, the other three concretes showed a significant increase after 25-75 days, reaching corrosion values close to 1 μA/cm2 after almost one year of monitoring. These data demonstrate the low effectiveness of the three concretes (and, therefore, the cements used: CEM I, CEM II-A-L, and CEM II-B-M) in preventing the appearance of corrosion processes in marine environments. As can be seen, these data are a reflection of the results obtained during the characterization of the material.

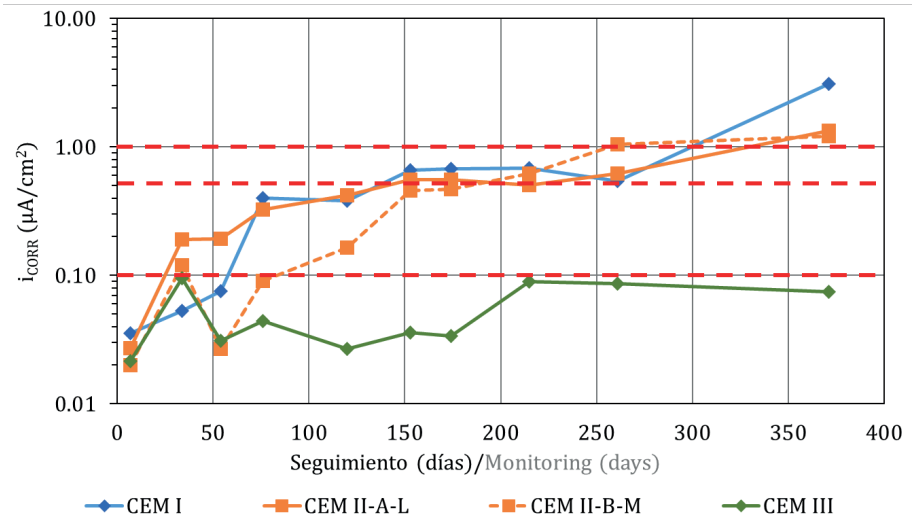


Imagen 2. Resultados obtenidos durante la monitorización. Image 2. Corrosion monitoring results.

Los resultados obtenidos demuestran una gran diferencia entre cada uno de los hormigones estudiados. Aquel fabricado con CEM III fue el único que mantuvo un nivel de corrosión bajo (por debajo de 0,1 µA/cm2) durante todo el estudio. En cambio, los otros tres hormigones mostraron un aumento significativo a partir de los 25-75 días, alcanzando valores de corrosión próximos a 1 µA/cm2 tras casi un año de monitorización. Estos datos demuestran la escasa eficacia de los tres hormigones (y, por tanto, los cementos utilizados: CEM I, CEM II-A-L, y CEM II-B-M) para prevenir la aparición de procesos de corrosión en entornos marinos. Como se puede apreciar, estos datos son un reflejo de los resultados obtenidos durante la caracterización del material.

En la Imagen 3 se muestra una estimación de la pérdida de peso de las armaduras, obtenida mediante la Ley de Faraday. Esta estimación permite visualizar el daño acumulado. El CEM III mostró un daño 14 veces inferior al observado en el CEM I y 10 veces inferior al observado en los hormigones fabricados en CEM II. Estos datos demuestran de nuevo la mejora que suponen este cemento en lo que a durabilidad se refiere.

Conclusiones

El presente estudio ha permitido comparar el comportamiento de 4 hormigones fabricados con distintos cementos desde diferentes puntos de vista. Por un lado, se han analizado propiedades físicas relacionadas con la durabilidad. Los resultados permitieron demostrar una mejora en el refinamiento de la red porosa de los hormigones fabricados con cementos adicionados con escoria de alto horno. Ello repercutió también en un aumento de la resistencia a la difusión de los cloruros, y también un aumento de la resistividad eléctrica del material.

Por otro lado, la monitorización de la corrosión durante más de un año de armaduras embebidas en cada hormigón permitió demostrar también el rendimiento de cada material en condiciones de exposición altamente agresivas, en este caso, ambiente marino. Los resultados demostraron que el hormigón fabricado con cemento adicionado con escoria volvió a mostrar un mejor rendimiento, previniendo la corrosión durante más de un año. En cambio, en el resto de los hormigones analizados se obtuvieron niveles de corrosión 10 veces más altos.

Con todo ello, este trabajo permite demostrar la mejora que ofrecen los cementos adicionados con escoria de alto horno desde el punto de vista de la durabilidad, y que no solo repercuten en un menor impacto medioambiental en lo que a producción de cemento se refiere.

Figure 3 shows an estimate of the loss of reinforcement weight, obtained using Faraday's Law. This estimate allows visualizing the accumulated damage. CEM III showed damage 14 times lower than that observed in CEM I and 10 times lower than that observed in concretes made with CEM II. These data demonstrate once again the improvement of this cement in terms of durability.

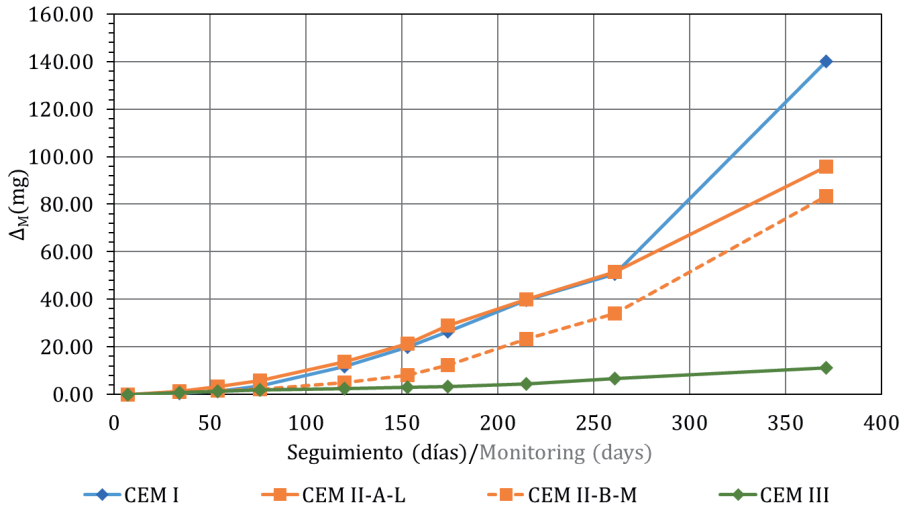


Imagen 3. Pérdida de masa estimada. Image 3. Mass loss estimation.

Conclusions

The present study has made it possible to compare the performance of 4 concretes made with different cements from different points of view. On the one hand, physical properties related to durability were analyzed. The results showed an improvement in the refinement of the porous network of the concretes made with cements added with blast furnace slag. This also resulted in an increase in the resistance to chloride diffusion, as well as an increase in the electrical resistivity of the material.

On the other hand, corrosion monitoring for more than one year of rebars embedded in each concrete also allowed demonstrating the performance of each material under highly aggressive exposure conditions, in this case, marine environment. The results showed that the concrete made with slag-added cement again showed better performance, preventing corrosion for more than one year. On the other hand, the rest of the concretes analyzed showed corrosion levels 10 times higher.

All in all, this work demonstrates the improvement offered by blast furnace slag-added cements from the point of view of durability, and that they not only have a lower environmental impact in terms of cement production.

AGRADECIMIENTOS/ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the Spanish Government for the Grant PID2020-119744RB-C21 funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033.Furthermore, they thank the support of the Universitat Politècnica de València. The predoctoral scholarship granted to Josep Ramon Lliso Ferrando as part of the "Formación de Personal Investigador" programme from the Universitat Politècnica de València (FPI-UPV-2018) and the Grant FPU 16/00723 funded by MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 and by "ESF Investing in your future".

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- Ahmad, W., Ahmad, A., Ostrowski, K. A., Aslam, F., & Joyklad, P. (2021). A scientometric review of waste material utilization in concrete for sustainable construction. *Case Studies in Construction Materials*, *15*(August), e00683. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00683
- Bildirici, M. E. (2019). Cement production, environmental pollution, and economic growth: evidence from China and USA. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *21*(4), 783–793. https://doi.org/10.1007/s10098-019-01667-3
- Chen, W., Hong, J., & Xu, C. (2015). Pollutants generated by cement production in China, their impacts, and the potential for environmental improvement. *Journal of Cleaner Production*, *103*, 61–69. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.048
- Federico, L. M., & Chidiac, S. E. (2009). Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete - Critical review of treatment methods. *Cement and Concrete Composites*, *31*(8), 606–610. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.02.001
- Li, Y., Liu, Y., Gong, X., Nie, Z., Cui, S., Wang, Z., & Chen, W. (2016). Environmental impact analysis of blast furnace slag applied to ordinary Portland cement production. *Journal of Cleaner Production*, *120*, 221–230. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.071
- Lliso-Ferrando, J. R. (2022). *Monitorizacion de la durabilidad de estructuras existentes de hormigon armado mediante la inserción de una red de sensores*. Universitat Politècnica de València.
- Martínez-Ibernón, A., Ramón, J. E., Gandía-Romero, J. M., Gasch, I., Valcuende, M., Alcañiz, M., & Soto, J. (2019). Characterization of electrochemical systems using potential step voltammetry. Part II: Modeling of reversible systems. *Electrochimica Acta*, *328*. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135111
- Oluseyi, T., Olayinka, K., & Adeleke, I. (2011). Assessment of ground water pollution in the residential areas of Ewekoro and Shagamu due to cement production. *African Journal of Environmental Science and Technology*, *5*(10), 786–794. http://www.academicjournals.org/AJEST
- Osborne, G. J. (1999). Durability of Portland blast-furnace. *Cement and Concrete Composites*, *21*, 11–21.
- Osmanovic, Z., Haračić, N., & Zelić, J. (2018). Properties of blastfurnace cements (CEM III/A, B, C) based on Portland cement clinker, blastfurnace slag and cement kiln dusts. *Cement and Concrete Composites*, *91*(May), 189–197. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.05.006
- Ramón, J. E., Martínez-Ibernón, A., Gandía-Romero, J. M., Fraile, R., Bataller, R., Alcañiz, M., García-Breijo, E., & Soto, J. (2019). Characterization of electrochemical systems using potential step voltammetry. Part I: Modeling by means of equivalent circuits. *Electrochimica Acta*, *323*. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.134702
- Ramón, Jose Enrique, Martínez, I., Gandía-romero, J. M., & Soto, J. (2021). An embedded-sensor approach for concrete resistivity measurement in on-site corrosion monitoring: Cell constants determination. *Sensors*, *21*(7). https://doi.org/10.3390/s21072481

PROBLEMAS EN REPARACIONES DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO AFECTADAS POR LA CORROSIÓN

PROBLEMS IN REPAIRS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES AFFECTED BY CORROSION

Josep Ramon Lliso-Ferrando
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Isabel Gasch Molina
Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: igasch@mes.upv.es
Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: igasch@mes.upv.es
Ana Martínez-Ibernón
Investigadora en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
José Manuel Gandía-Romero
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: joganro@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: joganro@csa.upv.es
Manuel Valcuende Payá
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es
Juan Soto Camino
Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València. E-mail: jsotoca@upv.es
Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: jsotoca@upv.es

Abstract

Corrosion in reinforced concrete structures is a very common damage that often requires repair works. These tasks are carried out using a technique known as "patch repair". The procedure consists of patching the reinforcement and protecting it with a new material, a repair mortar. However, to improve the workability of this new mortar, it is usual to add a greater quantity of water to the mixture.

This paper presents a study of the influence that a poorly mixed repair mortar can have. For this purpose, different properties of the material are evaluated, such as compressive strength, porosity, and chloride diffusion resistance. On the other hand, corrosion monitoring is carried out on embedded reinforcement to also evaluate the influence of a repair carried out with a mortar mixed with a higher amount of water.

Keywords
Concrete Equivalent Mortar, Self-Compacting Concrete, Specific Surface Area, Slump Flow

Introducción

Durante los años 60-70 del pasado siglo se produjo un incremento en el número de construcciones, tanto de infraestructuras como de edificaciones. Actualmente, muchas de estas construcciones han alcanzado o están llegando a superar el umbral de vida útil para el que fueron diseñadas, habitualmente, 50 años (Polder et al., 2012). Esto ha obligado a tener que intervenir muchas de las construcciones de aquellos años, la mayoría de las cuales fueron ejecutadas con hormigón armado. La principal causa de deterioro de este material ha demostrado ser la corrosión de las armaduras embebidas (Liu et al., 2023).

La corrosión es un proceso electroquímico por el que el acero tiende a volver a su estado natural, combinado con óxidos. En el caso del acero embebido en el hormigón, este proceso es mucho más complejo. Inicialmente, la alta alcalinidad de la matriz cementante permite generar una capa de óxidos sobre las armaduras que generan que la intensidad de corrosión sea despreciable. Sin embargo, la llegada de agentes precursores de la corrosión, como cloruros o la penetración del dióxido de carbono (carbonatación del hormigón) desestabilizan esta capa pasiva y generan incrementos de la corrosión significativos si se dan las condiciones de humedad y disponibilidad de oxígeno adecuadas (Tuutti, 1982). Esto conduce a una merma de la capacidad mecánica de los elementos con corrosión y la aparición de daños estéticos como las manchas de óxido en superficie (Poursaee, 2016).

Para hacer frente a estos problemas, es habitual llevar a cabo reparaciones mediante parcheado con la finalidad de sanear diferentes zonas de las estructuras (Ribeiro et al., 2013), tal y como se describe en la Imagen 1.

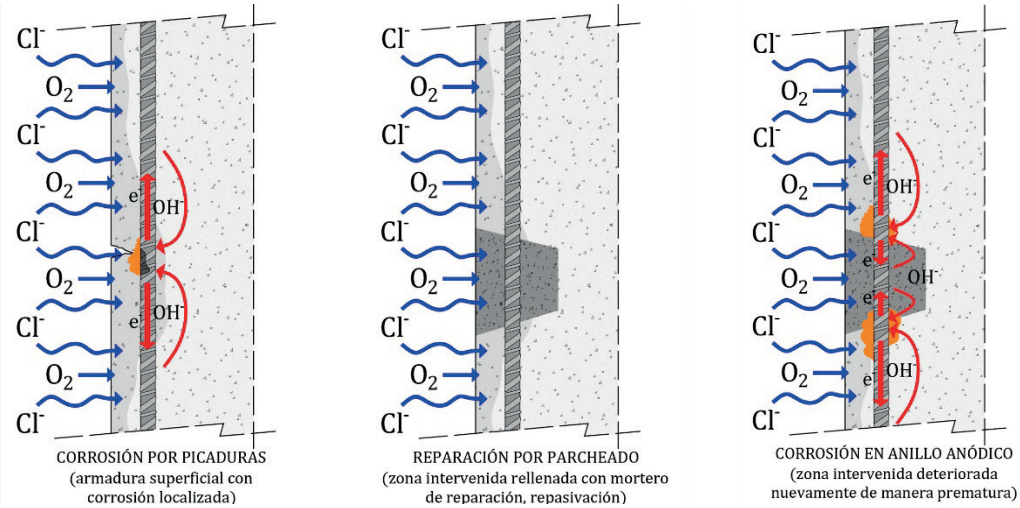


Imagen 1. Proceso de reparación mediante parcheado de una estructura de hormigón armado.

Image 1. Patching repair process of reinforced concrete structures.

El proceso para realizar estas tareas se resume en varias fases:

1.-En primer lugar, las tareas de reparación de la corrosión en estructuras de hormigón armado requieren de una inspección visual para determinar las zonas con mayor riesgo de estar bajo procesos de corrosión activa. Estos trabajos pueden apoyarse en medidas cualitativas como el estudio de la resistividad del recubrimiento o mapeos de potencial. Sin embargo, esto solo permite establecer el riesgo de existencia de corrosión. Otro enfoque puede ser realizar medidas cuantitativas con equipos portátiles, para determinar realmente la intensidad de corrosión de las armaduras.

2.-Una vez determinada la zona donde se va a actuar, el siguiente paso es identificar con precisión la localización de las armaduras mediante uso del pachómetro.

3.-La siguiente tarea consiste en la retirada del recubrimiento. Con la finalidad de no dañar la armadura, es habitual realizar estos trabajos con escarpe y martillo. Para una adecuada intervención, se debe retirar todo el hormigón que envuelve la armadura, tanto el más expuesto como la parte interna, liberando totalmente la armadura.

Introduction

During the 60s and 70s of the last century, there was an increase in the number of constructions, both infrastructure and buildings. Currently, many of these constructions have reached the service life period for which they were designed, usually 50 years [1]. This has made it necessary to repair in many of the constructions of those years, most of which were built with reinforced concrete. The main cause of deterioration of this material has been shown to be the corrosion of the embedded reinforcement [2].

Corrosion is an electrochemical process by which steel tends to return to its natural condition, combined with oxides. In case of steel embedded in concrete, this process is more complex. Initially, the high alkalinity of the cementitious matrix allows a layer of oxides to be generated on the reinforcement, which means that the corrosion intensity is negligible. However, corrosion precursors such as chlorides or the penetration of carbon dioxide (carbonation of the concrete) foster this passive layer instability and generate significant increases in corrosion under the right conditions of humidity and oxygen availability [3]. This leads to a decrease in the mechanical performance of corroded elements and the appearance of aesthetic damage such as surface rust stains [4].

To address these problems, it is common to carry out patch repairs in order to restore different areas of the structures [5], as described in Figure 1.

The process for carrying out these tasks can be summarised in several phases:

1.-Firstly, corrosion repair works on reinforced concrete structures require a visual inspection to determine the areas' most at risk of being under active corrosion processes. This work can be supported by qualitative measurements such as resistivity measurements or potential mapping. However, this can only establish the corrosion risk. Another approach can be to carry out quantitative measurements with portable equipment, to really determine the reinforcement corrosion rate.

2.-Once the area where the action is to be taken has been determined, the next step is to precisely identify the location of the rebars using the pachometer.

3.-The next task consists of removing the concrete cover. In order not to damage the reinforcement, it is usual to carry out this work with a scarp and hammer. For an adequate intervention, all the concrete that surrounds the reinforcement must be removed, both the most exposed and the internal part.

4.- Continued, the reinforcement must be subjected to an intense brushing process. The purpose of this work is to remove the oxides present on the surface, but also to identify the section loss that has occurred.

5.- Once the reinforcement has been cleaned up, the metal must be protected again. Firstly, a primer coating must be applied (to rebar and existing concrete), so as to ensure a good bond between the existing and the repair mortar that will be applied later.

6.- Filling the patch with a suitable repair mortar. These materials are supplied with a technical data sheet indicating their recommended mixture. In addition, these are products that have the property of being slightly expansive, to avoid shrinkage problems.

Although this process is quite widespread, one of the most common problems in real work is the omission of some of the steps or not carrying out some of the tasks properly. One of the most common mistakes occurs during the mixture of the repairing mortar. It is common on site that this material is not prepared correctly, trying to obtain a better workability. As a result, the amount of water added to the product is usually higher than that recommended by the supplier, leading to very different mixtures. In this work, a study is proposed to evaluate how much a poor mixture of the repair mortar can really influence it on corrosion performance. To this end, the authors carried out a characterisation study by means of different tests of a mortar mixed according to the manufacturer's recommendations and another with a higher amount of water than recommended. In addition, corrosion monitoring was carried out on rebars repaired following the procedure described above, but where the repair was carried out with both mortars. This study lasted almost a year, and the results were also compared with repair work carried out with conventional mortar.

4.- Una vez liberada la armadura, se debe someter a esta a un proceso de cepillado intenso, normalmente con la ayuda de medios mecánicos. La finalidad de este trabajo es retirar los óxidos presentes en la superficie, pero también identificar la pérdida de sección y de corruga que se ha producido.

5.- Cuando la armadura ya ha sido saneada, se debe recubrir de nuevo el metal. Para ello, lo primero es aplicar una capa de imprimación y adherencia sobre la superficie de la armadura y de todo el hormigón, de manera que se asegure un buen enlace entre lo existente y el mortero de reparación que se aplicará posteriormente.

6.- Rellenado del parcheado con un mortero de reparación adecuado. Estos materiales se suministran con una ficha técnica donde se indica su dosificación recomendada. Además, se trata de productos que tienen la propiedad de ser ligeramente expansivos o de retracción controlada, para evitar problemas de retracción.

Aunque este proceso está bastante extendido, uno de los problemas más habituales en obra real es la omisión de alguno de los pasos o no realizar alguna de las tareas adecuadamente. Uno de los errores más comunes se produce en la dosificación del mortero de reparación utilizado. Es habitual en obra que este material no se prepare correctamente, tratando de obtener una mejor trabajabilidad. Debido a esto, la cantidad de agua añadida al producto suele ser más alta que la recomendada por el fabricante, llevando a mezclas muy distintas. En este trabajo, se plantea un estudio para evaluar realmente cuanto puede influir una mala dosificación del mortero de reparación. Para ello, los autores realizaron un trabajo de caracterización mediante diferentes ensayos de un mortero dosificado de acuerdo con las recomendaciones del fabricante y otro con una cantidad de agua mayor a la recomendada. Además, se realizó una monitorización de la corrosión de armaduras reparadas siguiendo el procedimiento descrito anteriormente, pero donde la reparación se realizó con ambos morteros. Este estudio se extendió casi un año, y los resultados de compararon también con trabajos de reparación realizados con mortero convencional.

Plan Experimental

Materiales

Para llevar a cabo un estudio que abarcara diferentes casuísticas, se fabricaron 45 probetas cilíndricas (Ø50 mm y altura 100 mm). En el eje central de cada probeta se embebió una armadura B500SD (Ø10 mm) con una longitud de 140 mm, pero cuya superficie en contacto con hormigón se limitó a 50 mm lineales (superficie efectiva de 1.571 mm^2). Esto se realizó incorporando un encamisado fabricado con tubería de PVC rellenado con pintura epoxi, tal y como se muestra en la Imagen 2.

La fabricación de las 45 probetas se realizó considerando cinco casuísticas distintas. Del total de probetas, nueve de ellas fueron fabricadas con un hormigón convencional con una relación agua/cemento de 0,65. La dosificación fue preparada utilizando un CEM II 32.5 B-L y una mezcla de áridos silíceos (arena 0/4 y grava 4/8). Esta mezcla representa un hormigón convencional utilizado habitualmente. Su dosificación se detalla en la Tabla 1. El resto de las probetas se fabricaron utilizando un mortero de reparación de la casa comercial Sika (Sika MonoTop 4200 Multi Flow). Del total de probetas restantes, 18 fueron fabricadas empleando la dosificación recomendada por el fabricante, mientras que las 18 restantes fueron fabricadas incluyendo un 20% más de agua que la recomendada, generando una mezcla mucho más fluida. Las dosificaciones utilizadas se describen también en la Tabla 1. De ambos subgrupos, en la mitad de las muestras las armaduras fueron protegidas con un pasivador comercial (Sika Ferrogard-903 Plus). Los cinco subgrupos de trabajo se detallan en la Tabla 2.

Métodos de ensayo

Todas las probetas fueron fabricadas y almacenadas en cámara de curado (20±5ºC y humedad relativa superior al 90%) hasta la edad de 28 días. Junto con las probetas descritas anteriormente se fabricaron una serie de muestras para llevar a cabo diferentes ensayos. En la Tabla 3 se resumen los ensayos realizados, la norma donde se define el procedimiento para llevarlo a cabo y el número de probetas utilizadas por cada una de las tres mezclas presentadas en la Tabla 1.

Experimental Plan

Materials

In order to study different cases, 45 cylindrical specimens (Ø50 mm and height 100 mm) were manufactured. A B500SD reinforcement (Ø10 mm) with a length of 140 mm was embedded in the central axis of each specimen, but its surface in contact with concrete was limited to 50 linear mm (effective surface area of 1,571 mm2). This was made using PVC pipe and epoxy painting, as shown in Figure 2.

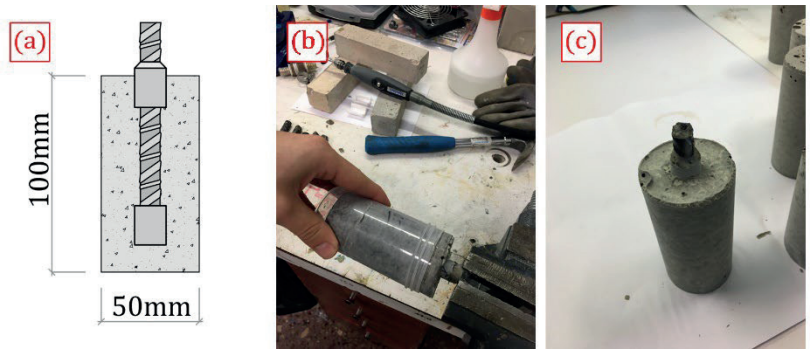


Imagen 2. Probetas fabricadas para el estudio. Image 2. Test specimens manufactured for the study.

The manufacture of the 45 specimens was carried out considering five different cases. Nine of the 45 test specimens were manufactured with an ordinary concrete with a water/cement ratio of 0.65. The mixture was prepared using a CEM II 32.5 B-L and a siliceous aggregate mixture (sand 0/4 and gravel 4/8). The concrete mixture is detailed in Table 1. The remaining specimens were manufactured using a repair mortar from Sika (Sika MonoTop 4200 Multi Flow). Of the remaining 18 specimens, 18 were manufactured using the manufacturer's recommended mixture, while the remaining 18 were manufactured including 20% more water than recommended, resulting in a more fluid mix. The mixtures used are also described in Table 1. In both subgroups, reinforcement was protected with a commercial passivator (Sika Ferrogard-903 Plus) in five test specimens. Subgroups analysed are detailed in Table 2.

Tabla 1 Dosificaciones (kg/m^3 de hormigón).
Table 1 Mixtures (kg/m^3).

	OC	4200	4200+20
CEM II 32,5 B-L / CEM II 32.5 B-L	289	-	-
Agua / Water	187	328	393
Sika MonoTop 4200 / Sika MonoTop 4200	-	1785	1785
Superplastificante / Superplasticizer	2.89		
Arena (0/4) / Sand (0/4)	1267		
Arena (4/8) / Sand (4/8)	685		
Relación agua/cemento / Water/binder ratio	0.65	0.18	0.22

Test methods

All the specimens were manufactured and stored in a curing chamber (20±5ºC and relative humidity above 90%) until the age of 28 days. Together with the specimens described above, a series of probes were manufactured to carry out different tests. Table 3 summarises the tests performed, the standard defining the test procedure and the number of specimens used for each of the three mixtures presented in Table 1.

Tabla 2 Test methods.
Table 2 Test methods.

	Standard	Specimens
[A] Resistencia a compresión / Compressive strength	UNE 12390-3	3x(Ø100x300 mm)
[B] Porosidad / Porosity accesible to water	UNE 83980	3x(100x100x50 mm)
[C] Absorción por capilaridad / Capillary absorption	UNE 83982	3x(100x100x50 mm)
[D] Difusión de cloruros / Chloride diffusion coefficient	NT-Build 492	3x(Ø100x50 mm)
[E] Resistivity / Resistivity	UNE 83988	6x(40x40x160 mm)

Por otro lado, las probetas fabricadas con una armadura embebida fueron parcialmente sumergidas en agua con cloruros, simulando unas condiciones de exposición que favorecieran la aparición de los procesos de corrosión. Durante 267 días se mantuvieron estas condiciones, y periódicamente se realizaron sobre las muestras medidas de la corrosión. Para las medidas se utilizó el método de potenciometría mediante escalones de potencial, presentado y validado en anteriores trabajos (Lliso-Ferrando, 2022; Ramón et al., 2020). Como electrodo de trabajo se utilizaron cada una de las armaduras embebidas, como contraelectrodo una pieza de acero inoxidable parcialmente sumergida en la misma disolución, y como electrodo de referencia un electrodo saturado de calomelanos. El proceso de exposición y medida se describe en la Imagen 3.

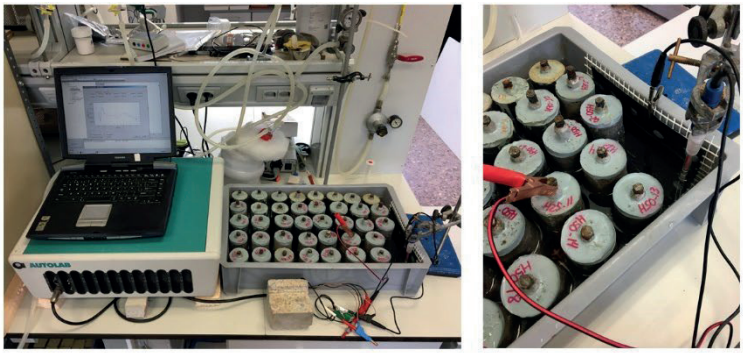


Imagen 3. Monitorización de la corrosión. Image 3. Corrosion monitoring.

Resultados

Caracterización de los materiales

En la Tabla 4 se presenta un breve resumen de los resultados obtenidos mediante los ensayos de caracterización de cada uno de los tres materiales.

Tabla 4 Resultados de caracterización.
Table 4 Characterization results.

	Resultados/Results OC	Resultados/Results 4200	Resultados/Results 4200+20
[A] (MPa)	28.06	46.85	37.89
[B] ($kg/cm^2 \cdot min^{0.5}$)	$7.15x10^{-4}$	$1.93x10^{-4}$	$2.19x10^{-4}$
[C] (%)	13.55	11.26	12.61
[D] (m^2/s)	$18.03x10^{-11}$	$0.99x10^{-11}$	$3.09x10^{-11}$
[E] (Ωm)	65.78	161m31	120.69

Tabla 3 Condiciones de exposición.
Table 3 Exposure conditions.

	Condiciones/Conditions
OC	Hormigón convencional/Ordinary concrete
4200	Mortero de reparación/Repair mortar
4200+P	Mortero de reparación y pasivador/Repair mortar and passivator
4200+20	Mortero con 20% más de agua/Repair mortar including 20% more water
4200+20+P	Mortero con 20% más de agua y pasivador/ Repair mortar including 20% more water and passivator

On the other hand, specimens made with embedded reinforcement were partially immersed in water containing chlorides, simulating exposure conditions that favoured the appearance of corrosion processes. These conditions were maintained for 267 days, and corrosion measurements were carried out periodically on the samples. For the measurements, the potential step voltammetry (PSV) method was used. It has been validated in previous works [7], [8]. Each of the embedded rebars was used as a working electrode, a piece of stainless steel partially immersed in the same solution was used as a counter electrode, and a calomel-saturated electrode was used as a reference electrode. The exposure and measurement process is described in Figure 3.

Results

Materials characterization

Table 4 gives a brief summary of the results obtained from the characterisation tests for each of the three materials.

As can be seen, in all cases the performance of the repair mortar compared to ordinary concrete is better. The results are remarkable when parameters such as chloride diffusion or resistivity are compared. The repair mortar manages to generate a much denser and less porous cementitious matrix, which results in a higher electrical resistivity and a lower chloride diffusion coefficient. On the other hand, the inclusion of 20% more water in the repair mortar reduces the performance of the material, but allows it to maintain slightly better properties than conventional concrete.

Corrosion monitoring

Figure 4 shows the evolution of the average of each group analysed. The figure shows the thresholds indicated in the RILEM TC 154 EMC recommendation [9] for classifying the corrosion rate in reinforcement embedded in concrete. The following expression derived from Faraday's law is used to calculate the corrosion rate from the corrosion density value:

$$V_{corr} = 3.27 * \frac{i_{corr} * M}{\rho * n} \qquad [1]$$

Where:

V_{corr} is the corrosion rate in mm/year;

i_{corr} corresponds to the corrosion density in µA/cm2;

M refers to the atomic mass of Fe in g/mol;

ρ identifies the density of Fe in g/cm3;

n is the number of electrons involved in the reaction (in this case 2).

Como se puede ver, en todos los casos las prestaciones del mortero de reparación frente al hormigón convencional son mejores. Los resultados son notables cuando se comparan parámetros como la difusión de los cloruros o la resistividad. El mortero de reparación consigue generar una mezcla mucho más densa y menos porosa, lo que repercute en una mayor resistividad eléctrica y un menor coeficiente de difusión de los cloruros. Por otro lado, la inclusión de un 20% más de agua en el mortero de reparación reduce las prestaciones del material, pero permite mantener unas propiedades ligeramente superiores a las del hormigón convencional.

Monitorización de la corrosión

En la Imagen 4 se muestra la evolución del promedio de cada grupo analizado. En la figura se han señalado los umbrales indicados en la recomendación RILEM TC 154 EMC (Andrade et al., 2004) para clasificar la velocidad de corrosión en armaduras embebidas en hormigón. Para el cálculo de la velocidad de corrosión, a partir del valor de densidad de corrosión, se utiliza la siguiente expresión que se deriva de la ley de Faraday:

$$V_{corr} = 3.27 * \frac{i_{corr} * M}{\rho * n} \qquad [1]$$

Donde:

V_{corr} es la velocidad de corrosión en mm/año;

i_{corr} corresponde a la densidad de corrosión en μA/cm^2;

M hace referencia a la masa atómica de Fe en g/mol;

ρ identifica la densidad del Fe en g/cm^3;

n es el número de electrones involucrados en la reacción (en este caso 2).

Como se puede ver, existe una gran diferencia entre cada uno de los cinco grupos analizados. Las muestras fabricadas con el hormigón convencional alcanzaron en los primeros días valores superiores a 1 μm/año, y al final del periodo de estudio eran 10 veces más altos, alcanzando valores por encima de 10 μm/año, lo que se corresponde con un nivel corrosión alto. En cambio, las muestras fabricadas con los morteros de reparación mantuvieron valores bajos, prácticamente despreciables. No se pudieron establecer diferencias entre los 4 grupos. En la Imagen 5 se muestra el estudio de la pérdida de sección promedio en cada grupo de estudio, obtenida a partir de la integración de los datos de monitorización:

$$P_{PIT} = V_{corr} * 10 * t \qquad [2]$$

El estudio de la pérdida de sección permite apreciar el daño acumulado en cada grupo de trabajo. Como se puede apreciar, en menos de un año, el daño fue de casi 7 veces más alto en muestras embebidas en hormigón convencional, que en muestras fabricadas con las diferentes metodologías estudiadas que imitan la reparación por parcheado. Por otro lado, se detectó que no existe una gran influencia en la inclusión de más agua en la dosificación del mortero. Aun así, se trata de un procedimiento inadecuado y que se debe evitar en todos los casos a la hora de realizar una reparación por parcheado en estructuras de hormigón armado.

Conclusiones

El presente estudio demuestra uno de los problemas habituales cuando se realizan reparaciones por parcheado en estructuras de hormigón armado, una mala dosificación del mortero de reparación utilizado. Esto conduce a una merma significativa de las prestaciones del material final tal y como se ha visto mediante los ensayos de caracterización realizados. En cambio, demostró tener una menor importancia en la respuesta del material frente al desarrollo de procesos de corrosión a corto plazo (menos de un año de estudio).

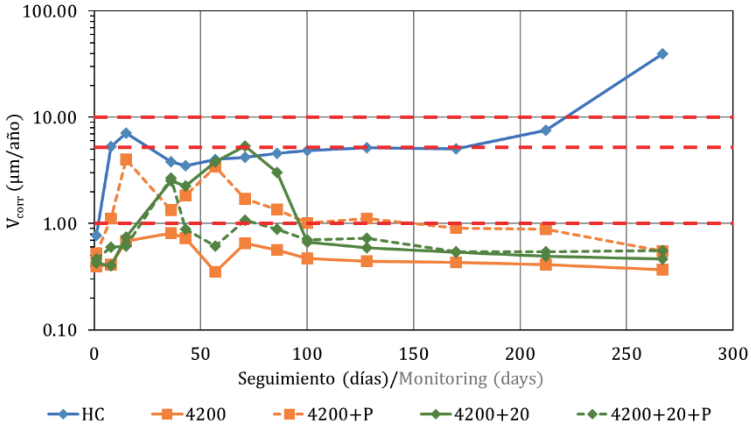


Imagen 4. Evolución de la velocidad de corrosion. Image 4. Corrosion rate results.

As can be seen, there is a large difference between each of the five groups analysed. The samples made with the conventional concrete reached values above 1 µm/year in the first days, and at the end of the study period they were 10 times higher, reaching values above 10 µm/year, which corresponds to a high corrosion level. On the other hand, the samples made with the repair mortars maintained low values, practically negligible. No differences could be established between the 4 groups. Figure 5 shows the study of the average section loss in each study group, obtained from the integration of the monitoring data:

$$P_{PIT} = V_{corr} * 10 * t \qquad [2]$$

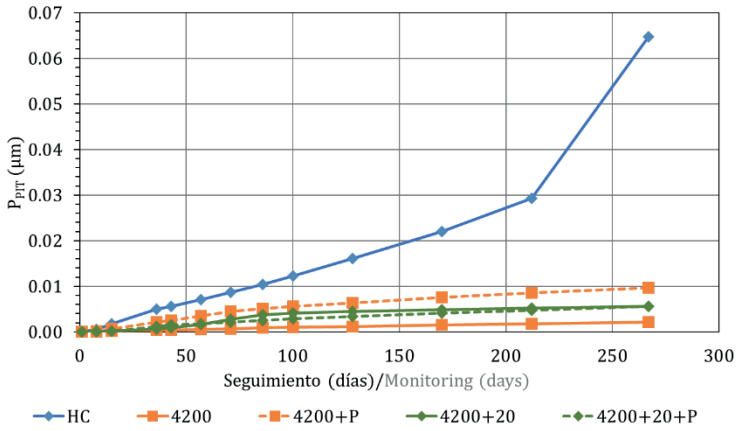


Imagen 5. Pérdida de sección estimada. Image 5. Estimated section los.

The section loss estimations allow to appreciate the accumulated damage in each working group. As can be seen, in less than one year, the damage was almost 7 times higher in samples embedded in conventional concrete than in samples manufactured with the different methodologies studied that mimic patch repair. On the other hand, it was found that there is no great influence on the inclusion of more water in the mortar dosage. Even so, this is an inappropriate procedure and should be avoided in all cases when carrying out a patch repair in reinforced concrete structures.

Conclusions

This study demonstrates one of the common problems when patch repairs are carried out on reinforced concrete structures, a poor dosage of the repair mortar used. This leads to a significant decrease in the performance of the final material as shown by the characterisation tests carried out. On the other hand, it proved to be of less importance in the response of the material to the development of corrosion processes in the short term (less than one year of study).

AGRADECIMIENTOS/ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the Spanish Government for the Grant PID2020-119744RB-C21 funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033.Furthermore, they thank the support of the Universitat Politècnica de València. The predoctoral scholarship granted to Josep Ramon Lliso Ferrando as part of the "Formación de Personal Investigador" programme from the Universitat Politècnica de València (FPI-UPV-2018) and the Grant FPU 16/00723 funded by MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 and by "ESF Investing in your future".

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- Andrade, C., Alonso, C., Gulikers, J., Polder, R., Cigna, R., Vennesland, O., Salta, M., Raharinaivo, A., & Elsener, B. (2004). Recommendations of RILEM TC-154-EMC: "Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion" Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures*, *37*(273), 623–643. https://doi.org/10.1617/13952
- ANFAPA. (2016). *Morteros reparación hormigón - Sistemas y productos de reparación estructural - EN 1504-3*. ANFAPA: Asociación de Fabricantes de Morteros y SATE. https://anfapa.com/morteros-de-reparacion-de-hormigon/aplicacion-en-1504-3
- Liu, D., Wang, C., Gonzalez-Libreros, J., Guo, T., Cao, J., Tu, Y., Elfgren, L., & Sas, G. (2023). A review of concrete properties under the combined effect of fatigue and corrosion from a material perspective. *Construction and Building Materials*, *369*(January), 130489. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130489
- Lliso-Ferrando, J. R. (2022). *Monitorizacion de la durabilidad de estructuras existentes de hormigon armado mediante la inserción de una red de sensores*. Universitat Politècnica de València.
- Polder, R. B., Peelen, W. H. A., & Courage, W. M. G. (2012). Non-traditional assessment and maintenance methods for aging concrete structures - Technical and non-technical issues. *Materials and Corrosion*, *63*(12), 1147–1153. https://doi.org/10.1002/maco.201206725
- Poursaee, A. (2016). *Corrosion of steel in concrete structures* (G. Jones (ed.); Vol. 61, Issue Corrosion of steel in concrete structures). Matthew Deams.
- Ramón, J. E., Gandía-Romero, J. M., Bataller, R., Alcañiz, M., Valcuende, M., & Soto, J. (2020). Potential step voltammetry: An approach to corrosion rate measurement of reinforcements in concrete. *Cement and Concrete Composites*, *110*(4). https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103590
- Ribeiro, J. L. S., Panossian, Z., & Selmo, S. M. S. (2013). Proposed criterion to assess the electrochemical behavior of carbon steel reinforcements under corrosion in carbonated concrete structures after patch repairs. *Construction and Building Materials*, *40*, 40–49. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.097
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of Steel in Concrete*. Swedish Cement and Concrete Research instittute.

ESTUDIO DE LA RESISTIVIDAD DEL HORMIGÓN EN CONDICIONES DE LABORATORIO SOBRE PROBETAS CON DISTINTOS TAMAÑOS

CONCRETE RESISTIVTY ANALYSIS UNDER LABORATORY CONDITIONS ON SPECIMENS OF DIFFERENT SIZES

Josep Ramon Lliso-Ferrando
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Isabel Gasch Molina
Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: igasch@mes.upv.es
Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: igasch@mes.upv.es
Ana Martínez-Ibernón
Investigadora en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
José Manuel Gandía-Romero
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: joganro@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: joganro@csa.upv.es
Manuel Valcuende Payá
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es

Abstract

Reinforcement corrosion is one of the main causes of premature damage and failure of reinforced concrete structures. Electrical resistivity analysis has been used as a qualitative method for early detection, because of it reflects the ability of concrete to withstand the charge transfer. Studying this parameter can help to assess corrosion of steel in concrete due to the relation between concrete resistivity and corrosion probability. However, analysing the concrete resistivity in existing structures requires specific tools and qualified operators capable of reading and interpreting the results obtained properly. Due to this fact, most inspections resort to test boring inspections. In this case, concrete resistivity can be analysed on cores under laboratory conditions. Existing standard test methods set out the procedure for test performing, but they do not determine the size of the specimen must be used. In this context, specimens and cores with different geometries can be used. This study presents the results obtained when concrete resistivity was measured on several specimens manufactured with different concretes and having different geometries. The analysis extended for more than one year. Results obtained proved the differences on this parameter depending on test specimen geometry. This variation is more noticeable on ordinary concretes. When using very high-performance concrete or ultra-high-performance fibre-reinforced concrete, the variation is almost non-existent.

Keywords
Concrete Resistivity, Durability, Test Method, Laboratory Test

Introducción

La corrosión de las armaduras es una de las principales causas de deterioro y fallo prematuro de las estructuras de hormigón armado. Se trata de un fenómeno electroquímico que propicia la pérdida de sección efectiva de los refuerzos y una merma de la adherencia entre acero y hormigón, lo que conduce a la progresiva pérdida de capacidad mecánica de los elementos que la sufren (Angst 2018). En la Imagen 1 se resume gráficamente este proceso.

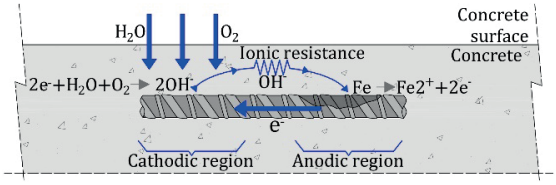


Imagen 1. Esquema del proceso electroquímico de la corrosión en armaduras embebidas en hormigón. Image 1. Electrochemical process of corrosion in reinforcement embedded in concrete. Graphical description.

Tal y como se muestra en la Imagen 1, existe una región anódica sobre la que se produce la oxidación del hierro, cediendo electrones a las regiones catódicas. Estas últimas se convierten en regiones termodinámicamente más estables. La circulación de los electrones se produce a través del metal. Para cerrar el circuito eléctrico debe existir una conducción iónica entre ambas regiones a través de la disolución de poro presente en la estructura interna del hormigón (Bertolini et al. 2013). Este esquema indica la necesidad de cierto grado de humedad en el hormigón para que se produzca el proceso electroquímico de la corrosión y la no existencia de oposición a la movilidad iónica.

Debido a esto, la medida de la resistividad del hormigón ha sido extensamente utilizada como un parámetro cualitativo del riesgo de que las armaduras se encuentren bajo fenómenos de la corrosión. Esto se debe a que se trata de un parámetro que define la capacidad del hormigón de permitir el desplazamiento de carga eléctrica a través de su matriz (Hornbostel, Larsen, and Geiker 2013). Por tanto, se puede afirmar que es un indicador de la resistencia que ofrece el hormigón a que se produzcan procesos de transferencia iónica que puedan desarrollarse en su interior, como puede ser el proceso de la corrosión. Este parámetro depende en gran medida del tamaño y distribución de los poros, y del volumen de estos, pero, sobre todo, del grado de humedad de la pieza o elemento analizado (Garcés Terradillos, Climent Llorca, and Zornoza Gómez 2008).

El método más utilizado para la medida de la resistividad eléctrica del hormigón está basado en el estudio de su resistencia eléctrica (R_e), empleando como unidad el ohmio (Ω). Esta resistencia, mediante la Ley de Ohm, puede expresarse como el cociente entre un potencial aplicado (V) y la intensidad de corriente resultante (i) entre dos extremos de una pieza:

$$R_e = \frac{V}{i} \qquad [1]$$

Si la resistencia eléctrica obtenida se multiplica por la constante geométrica de la pieza analizada (según superficie del conductor dividido entre la longitud del conductor (S_c/l)), se obtiene la resistividad eléctrica de la probeta (en ohmios por metro (Ωm)):

$$\rho = R_e \cdot \frac{S_c}{l} \qquad [2]$$

Para el caso de medidas de la resistividad del hormigón sobre estructuras existentes, el método de Wenner o de las cuatro puntas es la técnica más utilizada (Morris, Moreno, and Sagüés 1996; Gowers and Millard 1999; Wenner 1916). Tal y como se muestra en la Imagen 2, consiste en la colocación de 4 electrodos sobre la superficie, previamente limpiada y humedecida. Posteriormente, el sistema hace circular entre los electrodos una corriente alterna. El propio sistema se encarga de recoger la caída de potencial que se produce en ese instante en los electrodos internos. El cociente entre esta diferencia de potencial y la corriente aplicada ($\Delta V/\Delta i$) permite conocer la resistencia del hormigón (R_e). Mediante el factor de corrección en función de la separación de los electrodos (a) se puede obtener de una manera sencilla el valor de la resistividad eléctrica:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R_e \qquad [3]$$

Introduction

Reinforcement corrosion is one of the main causes of deterioration and premature failure of reinforced concrete structures. It is an electrochemical process which can trigger section loss on reinforcements and decrease in the bond between steel and concrete. These conditions lead to reduce progressively the mechanical capacity of reinforced concrete elements (Angst 2018). Image 1 depicts graphically this process.

As shown in Image 1, there is an anodic region where iron oxidation takes place, giving up electrons to the cathodic areas. The latter become in a more stable thermodynamic region. The displacement of electrons between anodic and cathodic regions occurs because they are electrically connected by the reinforcement. In order to complete the electrical circuit, there is an ionic displacement between cathodic and anodic areas through the existing pore solution present in the cement matrix (Bertolini et al. 2013). This scheme indicates it is necessary oxygen and certain degree of moisture content for completing the electrochemical process. The resistance of concrete to ionic mobility can also determine the intensity of the corrosion process.

Due to this fact, analysing the electrical resistivity of concrete has become a qualitative parameter which can indicates the risk reinforcements are under corrosion processes (Hornbostel, Larsen, and Geiker 2013). This results it is a parameter which can defines the opposition of concrete to the ionic displacement in electrochemical processes. This parameter depends on size, volume, and pore distribution, but above all, the moisture content (Garcés Terradillos, Climent Llorca, and Zornoza Gómez 2008). The most extended method for electrical resistivity analysis is based on analysing the electrical resistance (R_e), using ohms as unity (Ω). Using the Ohm Law, the resistance can be expressed as the ratio between an applied potential (V) and the resulting current intensity (i) between the two ends of the analysed test specimen:

$$R_e = \frac{V}{i} \qquad [1]$$

If the electrical resistance obtained is multiplied by the geometric cell of the analysed probe (ratio between area and length of piece (S_c/l)), it is possible to obtain the electrical resistivity of the test specimen analysed (in ohms per meter (Ωm)):

$$\rho = R_e \cdot \frac{S_c}{l} \qquad [2]$$

The Wenner or four-pin method is the most commonly used technique for electrical resistivity analysis on existing reinforced concrete structures (Morris, Moreno, and Sagüés 1996; Gowers and Millard 1999; Wenner 1916). As it is described in Image 2, it is performed by placing four electrodes at equal distance on concrete surface (previously cleaned and wet). Subsequently, an alternating current between the outer electrodes is applied by the system. The system itself is responsible for collecting the drop in potential that occurs at that moment in the internal electrodes. The ratio between the difference potential and the applied current (($\Delta V/\Delta i$) gives the concrete electrical resistance (R_e). By means of the geometric factor correction according to the electrode spacing (a), the value of the electrical resistivity can be obtained in a simple way:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R_e \qquad [3]$$

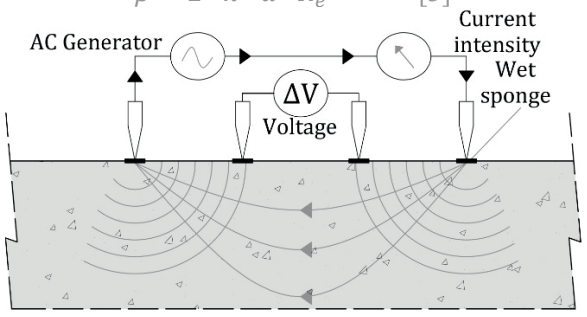


Imagen 2. Esquema de medida mediante la técnica de Wenner o de las 4 puntas. Image 2. Wenner or four-pin method resistivity analysis.

El estudio de la resistividad con esta herramienta debe alejarse de las zonas con presencia de armaduras ya que estas pueden conducir a resultados no del todo correctos, tal y como se muestra en la Imagen 3.

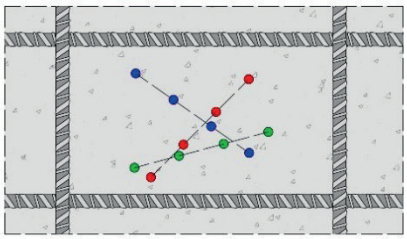


Imagen 3. Medida de la resistividad del hormigón en estructura de hormigón armado existente. Image 3. Resistivity analysis on existing reinforced concrete structure.

La normativa española que recoge este método de medida es la UNE-EN 83988-2:2014 (AENOR 2014). Sin embargo, se trata de un método que requiere de herramientas específicas y operarios con experiencia para la interpretación de los resultados de manera adecuada. Debido a esto, una de las alternativas utilizadas es la extracción de testigos o la utilización de probetas cuyo análisis se puede realizar en condiciones de laboratorio y de manera mucho más sencilla. Este método de estudio hace referencia al denominado "Método directo", cuyo proceso se recoge en la norma española UNE-EN 83988-1 (AENOR 2008). Esta técnica consiste en la aplicación de un campo eléctrico uniforme mediante dos electrodos en contacto con las bases de la muestra a ensayar, tal y como se muestra en la Imagen 4. La probeta debe encontrarse en condiciones de saturación, y, previamente a ser analizada, debe secarse superficialmente. Entre los electrodos y la muestra debe colocarse una esponja o paño húmedo.

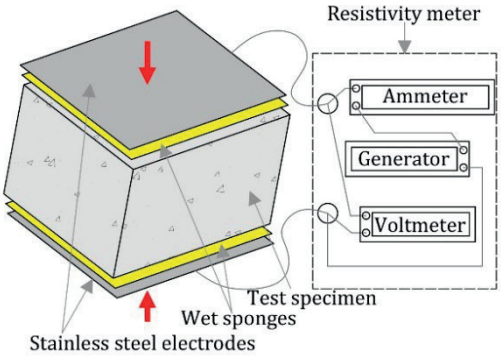


Imagen 4. Medida de la resistividad eléctrica sobre probeta en laboratorio. Image 4. Measurement of electrical resistivity on laboratory test specimen.

En lo que respecta a las probetas, la norma de ensayo (UNE-EN 83988-1) indica que deben ser muestras sin armaduras embebidas, y de sección recta circular o prismas con aristas perpendiculares a las bases. También hace referencia a que las bases deben ser perfectamente planas y paralelas. En cambio, la norma no indica en ningún caso el tamaño de las probetas. Este hecho genera un amplio abanico de posibilidades sobre el tipo de muestras y tamaños que pueden ser utilizados en laboratorio para la medida de la resistividad eléctrica. En este estudio se comparan los resultados de la medida de este parámetro, tal y como indica la norma, pero realizado sobre muestras con diferentes tamaños. Este estudio se realizó sobre muestras fabricadas con diferentes tipos de hormigón. Los resultados recogen la monitorización de este parámetro durante más de un año.

Plan Experimental

Materiales

Con la finalidad de realizar un estudio que abarque diferentes tipos de hormigón, se prepararon 4 dosificaciones distintas para obtener: un hormigón convencional (H30), un hormigón de alta resistencia (H50), un hormigón de muy alta resistencia (H90) y un hormigón de ultra alta resistencia reforzado con fibras metálicas (H150). Las dosificaciones que se emplearon para la fabricación de cada uno se recogen en la Tabla 1:

The resistivity analysis using this tool must be performed away from areas where reinforcements are located because it can lead to wrong results, as it is depicted in Image 3.

The Spanish standard method that includes this measurement procedure is UNE-EN 83988-2:2014 (AENOR 2014). However, it is a method which requires specific tools and experienced operators capable of interpreting the results properly. Due to this fact, one of the alternatives which is used nowadays is the extraction of cores. The probes extracted can be analysed in laboratory conditions in a much simpler way.

This study method refers to the so-called "Direct Method", whose process is depicted in the Spanish Standard UNE-EN 83988-1 (AENOR 2008). This technique consists on the application of a uniform electric field by means of two electrodes in contact with the ends of the tested probes, as shown in Figure 4. The specimen must be in saturated conditions and, prior to being analysed, it must be superficially dried. A wet cloth or sponge should be placed between the electrodes and the probe.

Regarding the test specimen size, the standard method (UNE-EN 83988-1) indicates they must be probes without embedded reinforcements, and of straight circular section or prisms with edges perpendicular to the bases. It also refers to the fact that the bases must be perfectly flat and parallel. On the other hand, the standard does not indicate in any case the size of the specimen. This fact generates a wide range of possibilities on the probe type and size that can be used in the laboratory analysis. This study compares the results obtained after the monitoring process of this parameter following the standard method description but carried out on samples with different sizes. The study was performed on samples manufactured with different types of concretes. The results show the evolution of this parameter for more than one year.

Experimental plan

Materials

In order to carry out a study covering different types of concrete, 4 different dosages were prepared to obtain: an ordinary concrete (H30), a high strength concrete (H50), a very high strength concrete (H90) and an ultra-high performance fibre reinforced concrete (H150): The dosages used are shown in Table 1.

For each concrete described in Table 1, the following specimens were produced:

-6 prismatic specimens (40x40x160 mm);

-6 prismatic specimens (40x160x40 mm);

-6 cubic specimens (40x40x40 mm);

-3 prismatic specimens (100x100x50 mm);

-3 prismatic specimens (100x50x100 mm);

-3 cubic specimens (100x100x100 mm);

-2 cylindrical specimens (Ø100x200 mm) for 28-day compressive strength tests (results are shown in Table 1).

All the manufactured specimens were demoulded at the age of 2 days, and they were stored in a curing chamber until they were 28 days. After the curing period, all probes were subjected to a conditioning process following the standard method UNE 83988-1 (AENOR 2008). This process consisted in subjecting the samples to a vacuum process (3 hours) and saturation (18 hours) with tap water. The aim of this process is to equalize the conditions of all concretes and probes (saturation conditions) in order to be able to compare the results obtained. At the end of this conditioning process, all the samples were monitored for 400 days. During this period, all the probes remained submerged to maintain the saturation degree and were only extracted for 3 minutes to carry out the resistivity analysis (carried out every two weeks).

Tabla 1 Dosificaciones (kg/m^3 de hormigón).
Table 1 Dosages (kg/m^3).

	H30	H50	H90	H150
CEM I 42,5 R/SR / CEM I 42.5 R/SR	292	450	500	800
Agua / Water	190	225	178	160
Superplastificante / Superplasticizer	2,80	1,37	3,50	30
Humo de sílice / Silica fume			55	175
Harina de sílice / Silica flour				225
Arena (0/0,5) / Sand (0/0.5)				302
Arena (0,6/1,2) / Sand (0.6/1.2)				565
Arena (0/4) / Sand (0/4)	1256	880	914	
Grava (4/7) / Gravel (4/7)		880	779	
Grava (4/12) / Gravel (4/12)	707			
Fibras metálicas / Steel fibres				175
Relación agua/material cementante / Water/binder ratio	0.65	0.5	0.32	0.2
Resistencia a compresión (MPa) / Compressive strength (MPa)	31.21	51.20	88.72	135.8

Por cada uno de los hormigones descritos en la Tabla 1 se fabricaron las siguientes probetas:

-6 probetas prismáticas (40x40x160 mm);

-6 probetas prismáticas (40x160x40 mm);

-6 probetas cúbicas (40x40x40 mm);

-3 probetas prismáticas (100x100x50 mm);

-3 probetas prismáticas (100x50x100 mm);

-3 probetas cúbicas (100x100x100 mm);

-2 probetas cilíndricas (Ø100x200 mm) para realizar dos ensayos de rotura a compresión a los 28 días y cuyos resultados también se muestran en la Tabla 1.

Todas las probetas fabricadas fueron desmoldadas a la edad de 2 días y, posteriormente, fueron almacenadas en cámara de curado hasta cumplir la edad de 28 días. Tras el periodo de curado, todas las muestras fueron sometidas a un proceso de acondicionamiento siguiendo las indicaciones de la norma de ensayo UNE 83988-1 (AENOR 2008). Este proceso consiste en someter las muestras a un proceso de vacío (3 horas) y saturación (18 horas) con agua del grifo. Con este proceso se pretende igualar las condiciones de todos lo hormigones consiguiendo que todas las muestras alcancen el grado de saturación, con la finalidad de poder comparar los resultados obtenidos. Al finalizar este proceso de acondicionamiento, se realizó un seguimiento de todas las muestras durante 400 días. Durante este periodo todas las probetas permanecieron sumergidas para mantener el grado de saturación alcanzado y únicamente se extrajeron durante 3 minutos para realizar la medida periódica, realizada cada dos semanas. Siguiendo las indicaciones de la norma de ensayo UNE 83988-1 (AENOR 2008), para las medidas se utilizó un conductímetro, modelo CRISON GLP-32 y se prepararon distintas piezas de acero inoxidable y paños húmedos para adaptarse a las distintas geometrías de las probetas. La medida sobre cada probeta se realizó en condiciones de laboratorio y el resultado obtenido fue aquel resultante a los 3 minutos del inicio de la medición, para asegurar una señal estable. Por último, los resultados obtenidos se normalizaron de acuerdo con la geometría de la muestra y según lo indicado en la introducción de este trabajo y en la norma de ensayo.

Resultados

En la Imagen 5 se recogen los resultados obtenidos para cada uno de los hormigones analizados y geometrías utilizadas.

Following the standard method (UNE 83988-1) (AENOR 2008) a conductivity meter model CRISON GLP-32 was used, and different pieces of stainless steel and wet clothes were prepared to adapt to the different geometries of every probe. The measurement on each probe was carried out under laboratory conditions and the results of each measurement were obtained 3 minutes after they started, in order to reach a stable signal. Finally, the results obtained were normalized according to the specimen geometry, as indicated in the introduction of this study and the standard method.

Results

Figure 5 shows the results obtained for each concrete type and probe size.

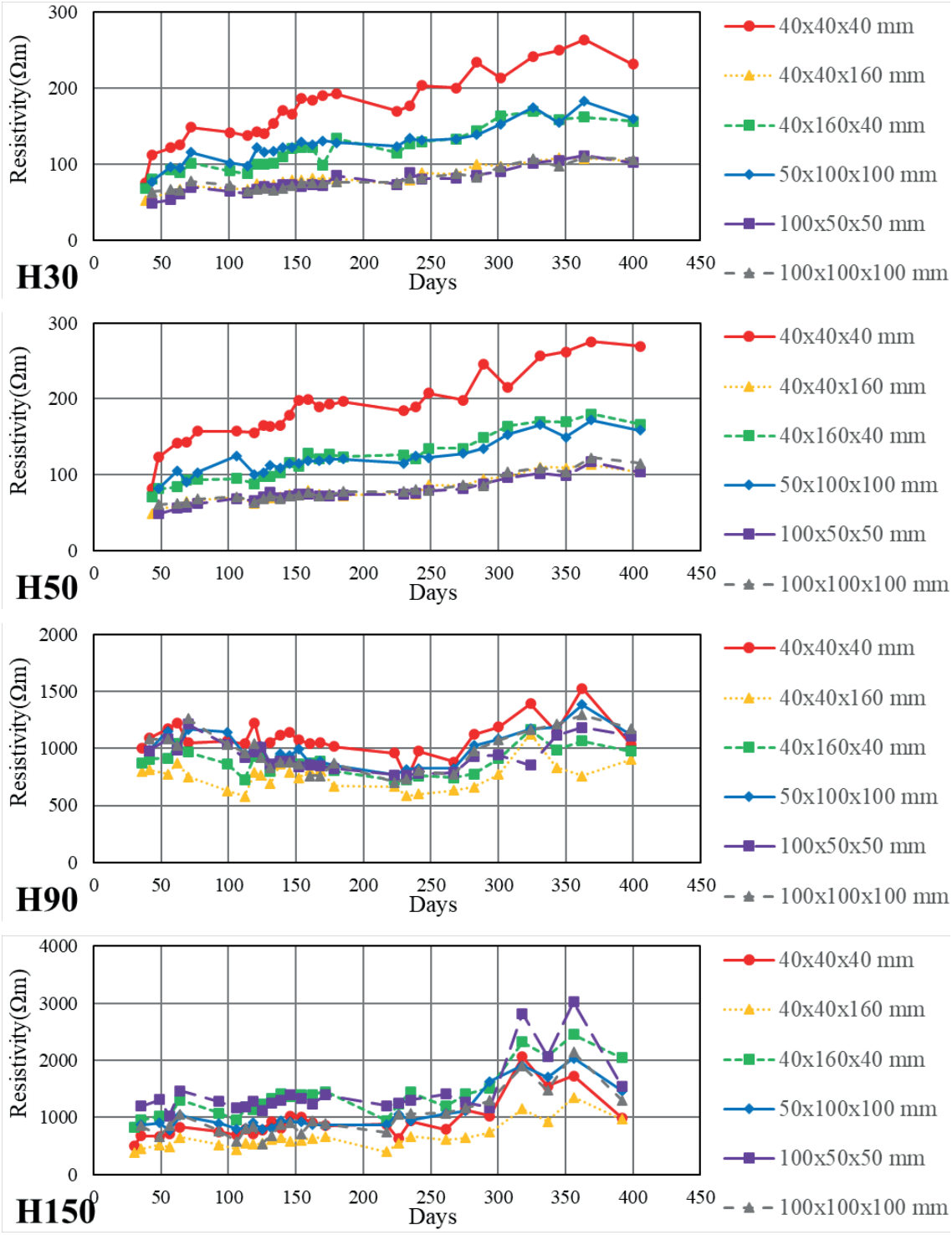


Imagen 5. Results. Image 5. Results.

-**Hormigón H30**: los resultados obtenidos mostraron una variación promedio del 250% dependiendo de la geometría de muestra analizada. Las muestras de menor tamaño tendieron a mostrar resistividades muy superiores a las muestras con un mayor tamaño.

-**Hormigón H50**: la dispersión de los resultados obtenidos con el hormigón H50 también mostró una variación muy alta (>200%). En este caso, las probetas de menor dimensión volvieron a mostrar resistividades muy superiores a la de las probetas con un mayor tamaño. En este caso, las muestras más pequeñas pueden presentar irregularidades o ser extraídas de muestras más grandes y zonas poco porosas, lo que puede distorsionar de manera importante los resultados obtenidos. Por otro lado, las muestras de mayor tamaño pueden representar de una manera más adecuada la heterogeneidad del hormigón y conducir a resultados más adecuados. Normalmente, y en condiciones de laboratorio se tiende a utilizar muestras prismáticas (40x40x160 mm), que tanto para el hormigón H30 como para el H50 fueron los que mostraron los resultados más bajos.

-**Hormigones H90 y H150**: la dispersión de resultados obtenidos en ambos hormigones es muy inferior a la registrada en los hormigones H30 y H50. En este caso, la variación de resultados fue inferior al 50% y 75% respectivamente. En este caso, se trata de hormigones con una matriz porosa poco permeable, lo que reduce considerablemente la conductividad iónica y aumenta la resistencia eléctrica (entre 10 y 15 veces superior a los hormigones presentados anteriormente). Los resultados demuestran que en este tipo de hormigones la geometría de las muestras no influye de manera importante en los resultados obtenidos. Sin embargo, sí que se debe señalar la evolución de las muestras en ambos hormigones. Tanto las muestras de H90 como de H150 mostraron valores en torno a los 500 y 1000 Ωm durante las primeras medidas. La variación a lo largo del tiempo en el H90 fue mínima. Sin embargo, en el H150 esta tendencia cambió, mostrando un aumento de entre el 100 y 150% en todas las muestras. En este caso, este hormigón fue preparado con una gran cantidad de cemento y una relación agua/material cementante muy baja. La posible existencia de un remanente de cemento sin reaccionar que se hidrató con el tiempo pudo favorecer el aumento de la resistividad en este tipo de hormigón. Los resultados obtenidos también reflejan la escasa permeabilidad de ambos hormigones y su idoneidad en la protección de las estructuras frente a la corrosión, especialmente en aquellas localizadas en ambientes extremadamente agresivos, tal y como se ha demostrado en trabajos previos (Valcuende et al. 2021).

Conclusiones

En este estudio se presentan los resultados del seguimiento de la resistividad eléctrica durante más de un año de diferentes probetas fabricadas con distintos tipos de hormigón y con distintas geometrías. Este seguimiento se realizó siguiendo las recomendaciones de ensayo recogidas en la norma UNE 83988. Las principales conclusiones obtenidas pueden resumirse en:

-la geometría de la probeta puede afectar de manera significativa a los resultados obtenidos. En el caso de probetas de reducidas dimensiones y cuando los electrodos se sitúan lo más próximos posible según la geometría de la muestra, conducen a resultados más altos en el parámetro de la resistividad eléctrica. La presencia de defectos en estas muestras o si se trata de zonas con una matriz más densa pueden conducir a sobrevalorar la calidad del hormigón y conducir a interpretaciones no del todo adecuadas;

-la variación en probetas de mayor tamaño es mucho menor gracias a que estas muestras permiten interpretar de un modo más adecuado la heterogeneidad del hormigón;

-la influencia del tipo de probetas utilizadas para el seguimiento de la resistividad eléctrica tiene mayor influencia en muestras fabricadas con hormigón convencional. Para hormigones de altas o muy altas prestaciones, como el H90 o H150 utilizados en este estudio, se pudo apreciar una variación muy inferior a la existente en el H30 (50% vs. 250%).

Los resultados indican la necesidad de establecer unos criterios claros sobre el tipo de probeta a utilizar para los estudios de la resistividad eléctrica en condiciones de laboratorio. Si esto no se tiene en cuenta, los resultados obtenidos deben ser considerados siempre como aproximados y no precisos. Para la comparación de este parámetro en distintos hormigones deben utilizarse siempre el mismo tipo de probeta para poder llevar a cabo estudios de manera adecuada.

-Concrete H30: the results obtained showed an average variation of 250% depending on the test specimen geometry analysed. Smaller pieces tended to show higher resistivity than larger specimens.

-Concrete H50: the variation of the results obtained in H50 test specimens was also very high (>200%). In this case, the smaller specimens showed again higher resistivity than larger specimens. In this case, the smaller specimens may present irregularities, or they can be extracted from larger specimens in poorly porous areas, which can significantly distort the results obtained. On the other hand, larger specimens may better represent the heterogeneity of the concrete and lead to more accurate results. Normally, and in laboratory conditions, prismatic specimens (40x40x160 mm) tend to be used, which for both H30 and H50 concretes showed the lowest results.

-Concretes H90 and H150: the dispersion of the results obtained in both concretes is much lower than that recorded in H30 and H50. In this case, the variation of results between different geometries was less than 50% and 75% respectively. In this case, these are concretes with a porous matrix less permeable than other concrete types, which considerable reduces the ionic conductivity and increases the electrical resistance (between 10 and 15 times higher than concretes presented above). The results showed that in these concretes, the geometry of the samples does not have a significant influence on the results obtained. However, the evolution in each case should be noted. Both, the H90 and H150 test specimens showed values around 500 and 1000 Ωm during the first weeks. The variation over time in H90 was minimal. However, in H150 the trend changed, showing an increase of between 100 and 150% in all samples. In this case, the H150 concrete was prepared with a large amount of cement and a very low water/binder ratio. The possible existence of unreacted cement that hydrated over time may have favoured the increase in resistivity in this concrete type. The results obtained also reflected the low permeability of both concretes and their suitability in the protection of structures against corrosion, especially in those located in extremely aggressive environments, as has been demonstrated in previous works (Valcuende et al. 2021).

Conclusions

This study presents the results obtained after monitoring the electrical resistivity for more than one year on different specimens manufactured with 4 concrete types and different geometries. This monitoring process was carried out following the standard method UNE 83988. The main conclusions obtained can be summarized as follows:

-the specimen geometry can significantly affect the results obtained. In the case of small test specimens and when electrodes are placed very close, they lead to higher results of this parameter. The presence of defects in these specimens or the presence of a denser matrix can lead to an overestimation of the concrete quality and lead to wrong interpretations;

-the variation in larger specimens is much smaller because these test specimens allow a better interpretation of the heterogeneity of the concrete;

-the influence of the type and specimen used for monitoring the electrical resistivity has a greater influence on specimens prepared with ordinary concrete. For very high or ultra-high-performance concretes, such as H90 or H150 concretes used in this study, a much lower variation could be seen than for H30 (50% vs. 250%).

The results indicate the need to stablish a clear criterion for the test specimen type and size when resistivity analyses are performed in laboratory conditions. If this aspect is not considered, the results obtained should always be considered as approximate and cannot be accurate. For the comparison of this parameter in different concretes, the same type of specimen should always be used in order to be able to carry out studies properly.

AGRADECIMIENTOS/ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the Spanish Government for the Grant PID2020-119744RB-C21 funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033.Furthermore, they thank the support of the Universitat Politècnica de València. The predoctoral scholarship granted to Josep Ramon Lliso Ferrando as part of the "Formación de Personal Investigador" programme from the Universitat Politècnica de València (FPI-UPV-2018) and the Grant FPU 16/00723 funded by MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 and by "ESF Investing in your future".

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- AENOR. 2008. "UNE-EN 83988-1. Determinación de La Resistividad Eléctrica. Parte 1: Método Directo," 1–10.
- - AENOR 2014 "UNE-EN 83988-2. Determinación de La Resistividad Eléctrica. Parte 1: Método de Las Cuatro Puntas." 2014.
- Angst, Ueli M. 2018. "Challenges and Opportunities in Corrosion of Steel in Concrete." *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 51 (1): 1–20. https://doi.org/10.1617/s11527-017-1131-6.
- Bertolini, L., B. Elsener, P. Pedeferri, E. Redaelli, and R. Polder. 2013. *Corrosion of Stell in Concrete: Prevention, Diagnosis and Repair*. Edited by Wiley VCH.
- Garcés Terradillos, Pedro, Miguel Ángel Climent Llorca, and Emilio Zornoza Gómez. 2008. *Corrosión de Armaduras En Estructuras de Hormigón Armado*. *Editorial Club Universitario*.
- Gowers, K, and S Millard. 1999. "Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion." *ACI Materials Journal* 96 (5): 536–41.
- Hornbostel, Karla, Claus K. Larsen, and Mette R. Geiker. 2013. "Relationship between Concrete Resistivity and Corrosion Rate - A Literature Review." *Cement and Concrete Composites* 39: 60–72. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019.
- Morris, W., E.I. Moreno, and A. A. Sagüés. 1996. "Practical Evaluation of Resistivity of Concrete in Test Cylinders Using a Wenner Array Probe." *Cement and Concrete Research* 26 (12): 1779–87.
- Valcuende, M., J.R. Lliso-Ferrando, J.E. Ramón-Zamora, and J. Soto. 2021. "Corrosion Resistance of Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete." *Construction and Building Materials* 306. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124914.
- Wenner, F. 1916. "A Method of Measuring Earth Resistivity." *Bulletin of the Bureau of Standards* 12 (4): 469. https://doi.org/10.6028/bulletin.282.

ESTIMACIÓN RÁPIDA DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE CLORUROS EN ESTADO NO ESTACIONARIO EN HORMIGÓN

QUICK ESTIMATION OF CHLORIDE DIFFUSION COEFFICIENT FROM NON-STEADY-STATE EXPERIMENTS IN CONCRETE

Josep Ramon Lliso-Ferrando
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Isabel Gasch Molina
Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: igasch@mes.upv.es
Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: igasch@mes.upv.es
Ana Martínez-Ibernón
Investigadora en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
José Manuel Gandía-Romero
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: joganro@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: joganro@csa.upv.es
Manuel Valcuende Payá
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es
Juan Soto Camino
Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València. E-mail: jsotoca@upv.es
Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: jsotoca@upv.es

Abstract

Chloride-induced corrosion in reinforced concrete structures located in the marine environment is a major problem. To prevent it, the concretes used in these types of constructions must have a high resistance to the chloride diffusion. To assess this intrinsic property of the material, there are different laboratory tests can be performed.

On the one hand, there are several Standards based on the first Fick's Law. These documents assume stationary conditions. This approach is not applicable in real cases. For this, the second Fick's Law (non-stationary conditions) is used, where the modelling considers the chloride content varies with respect to time or the possibility of chemical bonds being generated during the diffusion process. There are different test methods that focus on analysing the chloride diffusion coefficient under non-steady-state conditions. However, some tests are quite time-consuming. This paper presents an equation for a quick estimation of the non-steady-state chloride diffusion coefficient based on the analysis of more than 100 laboratory tests performed during the last year.

Keywords
Reinforced concrete structures, Durability, Chlorides, Corrosion

Introducción

El ambiente marino está considerado uno de los entornos más desfavorables para las estructuras de hormigón armado (António Costa & Appleton, 2002; Trocónis de Rincón et al., 2007). Esto se debe a la presencia del ion cloruro en estos medios. Este ion es capaz de penetrar de diferentes modos en el hormigón: por presión hidráulica o succión capilar. Sin embargo, el método más común de penetración es por difusión (A. Costa & Appleton, 1999). Este fenómeno se corresponde a una transferencia de masa (en este caso, de los cloruros) desde una zona a otra debido a un gradiente de concentración. Además, solo puede producirse si los poros están parcial o complemente llenos de agua.

Bajo condiciones estacionarias, es decir, un flujo unidireccional y constante, la difusión de los cloruros puede modelizarse mediante la primera Ley de Fick, definida según (Ecuación 1):

$$F = -D_{ss} \cdot \frac{dC}{dx} \qquad [1]$$

donde F es el flujo (kg/m^{2}s) y C es la concentración de cloruros (% respecto al contenido de cemento) a una distancia x (m) de la superficie de penetración. El coeficiente de difusión D_{ss} en m^2/s depende de las especies que difunden (en este caso los cloruros), las características del hormigón y las condiciones ambientales (Garcés Terradillos et al., 2008).

Estas condiciones de flujo unidireccional y constante únicamente se pueden simular en laboratorio, tal y como indican algunas normas y estándares como la UNE 83987:2014 (AENOR, 2014). El inconveniente de estos ensayos es que requieren largos periodos de tiempo, sobre todo cuando se analizan hormigones de altas prestaciones. Además, su extrapolación a situaciones reales no es posible, por lo que solo pueden ser útiles los resultados para comparar hormigones.

En una estructura real, el flujo depende el tiempo, pero, además, existe una variación del contenido de cloruros respecto a la profundidad (existe una concentración de cloruros mayor cerca de la superficie que disminuye conforme se penetra en el hormigón) (Yang & Wang, 2004). Este método de difusión se puede modelizar mediante la segunda Ley de Fick (Ecuación 2):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{nss} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \qquad [2]$$

donde C es la concentración de cloruros (% respecto al contenido de cemento) a una distancia x (m) de la superficie de penetración para un tiempo t en años y D_{nss} es el coeficiente de difusión en m^2/s de las especies que difunden (en este caso los cloruros) (A. Costa & Appleton, 1999). Para el caso de difusión unidireccional semifinita, la solución de esta ecuación es (Ecuación 3):

$$C(x,t) = C_s \cdot \left[1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{nss} t}}\right)\right] \qquad [3]$$

donde C_s es el contenido de cloruros en superficie.

Esta modelización incluye la función error (erf), pero destaca por introducir el coeficiente de difusión en estado no estacionario (D_{nss}). Este parámetro se utiliza para tener en cuenta los posibles enlaces químicos que se generen o los procesos de adsorción. Tal y como han señalado diferentes autores, debe ser considerado un coeficiente aparente (A. Costa & Appleton, 1999). Esto se debe a que este parámetro varía con el tiempo, igual que la concentración en superficie. Sin embargo, este parámetro es el más extendido para la estimación de la resistencia a la penetración de cloruros en el hormigón. Además, puede ser utilizado para realizar estimaciones del tiempo necesario para que los cloruros alcancen unas armaduras a una profundidad determinada y en unas condiciones específicas, tal y como se ha demostrado en trabajos previos (Lliso-Ferrando et al., 2022).

A pesar de que la formulación es compleja, existen numerosas normas que se basan en esta segunda Ley de Fick para definir el coeficiente de difusión en estado no estacionario, por ejemplo, la norma española UNE-EN 12390-11:2019 (AENOR, 2019). Estos ensayos requieren largos periodos de exposición (mínimo de 90 días). Además, el análisis de cloruros es laborioso, ya que requiere una extracción de muestras muy cuidadosa y los métodos de análisis de dichas muestras están basados en la valoración colorimétrica (AENOR, 2007; NORDTEST, 1996).

Introduction

The marine environment is considered one of the most unfavourable environments for reinforced concrete structures (António Costa & Appleton, 2002; Trocónis de Rincón et al., 2007). This is due to the presence of chloride ion in these atmospheres. This ion can penetrate into the concrete in different ways: by hydraulic pressure or capillary suction. However, the most common method is diffusion (A. Costa & Appleton, 1999). This phenomenon corresponds to a mass transfer (in this case chlorides) from one area to another due to a gradient concentration. Moreover, it can only occur if the pores are partially or completely filled with water.

Under stationary conditions (i.e. unidirectional and steady flow), chloride diffusion can be modelled by Fick's first Law, defined as (Equation 1).

$$F = -D_{ss} \cdot \frac{dC}{dx} \quad [1]$$

where F is the flux (kg/m^{2}s) and C is the chloride concentration (% with respect to the cement content) at a distance x (m) from the penetration surface. The diffusion coefficient D_{ss} in m^2/s depends on the species that diffuse (in this case chlorides), the characteristics of the concrete and the environmental conditions (Garcés Terradillos et al., 2008).

These situations (unidirectional and constant flow) can only be simulated under laboratory conditions, as indicated by some Standards such as UNE 83987:2014 (AENOR, 2014). The disadvantage of these test methods is that they require long time periods, especially when analysing high-performance concretes. Furthermore, the extrapolation to real situations is not possible, so the results can only be useful for comparing concretes.

In real structures, the flow is time-dependent, but, in addition, there is a chloride content variation with depth (there is a higher chloride concentration near the surface that decreases when cover increases) (Yang & Wang, 2004). This diffusion method can be modelled using the Fick's second Law (Equation 2):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{nss} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad [2]$$

where C is the chloride concentration (% with respect to cement content) at a distance x (m) from the penetration surface for a time t in years. D_{nss} is the chloride diffusion coefficient in m^2/s (A. Costa & Appleton, 1999). For the case of semifinite unidirectional diffusion, the solution of this equation is (Equation 3):

$$C(x,t) = C_s \cdot \left[1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{nss} t}}\right)\right] \quad [3]$$

where C_s is the chloride content in the surface.

This model includes the error function (erf), but is notable for introducing the non-steady-state diffusion coefficient (D_{nss}). This parameter is used to consider possible chemical bonds generated or adsorption processes. As pointed out by different authors, it should be considered as an apparent coefficient (A. Costa & Appleton, 1999). This is because this parameter varies with time, as does the surface concentration. However, this parameter is the most widely used for analysing the chloride diffusion resistance of concretes. Furthermore, it can be used to estimate the time required for chlorides to reach reinforcement at a given depth and under specific conditions, as has been proved in previous work (Lliso-Ferrando et al., 2022).

Although the equations are complex, there are numerous standards that are based on this second Fick's Law to define the diffusion coefficient in non-steady-state, for example, the Spanish Standard UNE EN 12390-11:2019 (AENOR, 2019). This test requires long exposure periods (minimum 90 days). In addition, the chloride analysis is laborious, as it requires very careful sample extraction and the test methods of these samples are based on colorimetric titration (AENOR, 2007; NORDTEST, 1996).

Una alternativa a estos métodos de ensayo es la NT Build 492 (NORDTEST, 1999). Este método de ensayo está basado en el estudio del coeficiente de difusión en estado no estacionario mediante un procedimiento de migración (D_{nssm}). Para llevar a cabo el ensayo se requiere de probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 50 mm de canto. Estas probetas deben exponerse a dos soluciones, una de las caras debe estar en contacto con una disolución 2 molar de cloruros ($2M\ NaCl$) y la otra con una disolución 0.3 molar de hidróxido de sodio ($0.3M\ NaOH$). Para forzar al paso de cloruros a través de la probeta se debe aplicar una diferencia de potencial eléctrico. En la Imagen 1 se muestra esquemáticamente la disposición del ensayo, junto con imágenes de diferentes ensayos realizados en laboratorio.

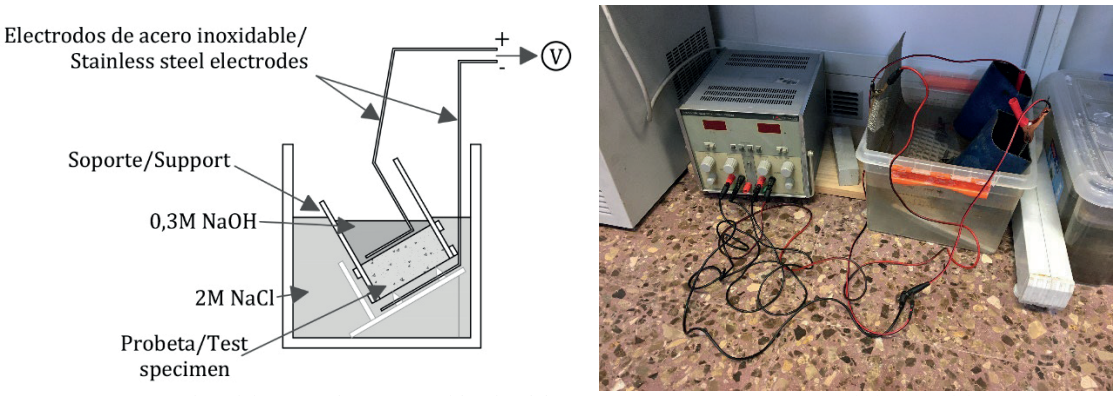


Imagen 1. Disposición para el ensayo y evidencias del ensayo Image 1. Set up test and pictures of the test.

La diferencia de potencial que debe aplicarse y la duración del ensayo vienen determinadas por la norma de ensayo. En este caso, se propone hacer un primer test, aplicando una diferencia de potencial de 30V. Según la intensidad de corriente obtenida, la norma indica los parámetros definitivos del ensayo (Tabla 1).

Como se puede ver, la duración del ensayo es corta, y puede ser entre 6 y 96 horas. A este tiempo debe sumarse el periodo de acondicionamiento, que se extiende entre 24 y 48 horas. Al finalizar el ensayo, las probetas deben ser sometidas a un ensayo de tracción indirecta para abrirlas por su eje transversal, y mediante revelado con nitrato de plata ($0.1M\ AgNO_3$), determinar la profundidad de penetración de los cloruros (x_d, en m). Con este dato y la formulación existente en la norma de ensayo (Ecuación 4) se puede determinar el coeficiente de difusión de los cloruros en estado no estacionario mediante método de migración (D_{nssm} en m^2/s):

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \cdot \left(x_d - 0.0238 \cdot \sqrt{\frac{(273+T)\cdot L \cdot x_d}{U-2}} \right) \quad [4]$$

donde U es el voltaje aplicado (en voltios), t la duración del ensayo en horas, L el canto de la probeta (en mm) y T la temperatura del ensayo (en ºC).

A pesar de que la norma NT Build 492 es una de las normas más extendidas y utilizadas en los procesos de caracterización del material, en este trabajo se plantea una ecuación basada en el primer análisis de corriente para definir un valor aproximado del D_{nssm}. Para ello, se presenta una recopilación de datos de más de 100 muestras analizadas durante el último año en laboratorio. Estas muestras formaban parte de diferentes trabajos y abarcan desde hormigones convencionales hasta hormigones de muy altas prestaciones y hormigones de ultra alta resistencia reforzados con fibras metálicas.

Plan Experimental

Probetas

Los datos recopilados en este estudio fueron obtenidos al realizar ensayos sobre muestras cilíndricas, de diámetro 100 mm y canto 50 mm, tal y como indica la norma de ensayo. Las diferentes probetas analizadas fueron ensayadas a la edad de 28 días tras su fabricación y tras un periodo de curado en cámara húmeda (20±2ºC y H.R.>95%).

An alternative to these test methods is NT Build 492 (NORDTEST, 1999). This test method is based on the study of the non-steady-state diffusion coefficient by means of a migration procedure (D_{nssm}). To carry out the test, cylindrical specimens, 100 mm in diameter and 50 mm height, are required. These specimens must be exposed to two solutions, one side must be in contact with a 2 molar chloride solution ($2M\ NaCl$) and the other side with a 0.3 molar sodium hydroxide solution ($0.3M\ NaOH$). To force the chloride diffusion through the test specimen, an electrical potential difference must be applied. The test setup is shown schematically in Image 1, together with pictures of different laboratory tests.

The potential difference to be applied, and the test duration, are determined by the standard method. In this case, it is proposed to carry out a first test, applying a potential difference of 30V. According to the current intensity obtained, the standard indicates the final parameters of the test (Table 1).

Tabla 1 Dosificaciones (kg/m^3 de hormigón)
Table 1 Mixture proportions of concrete (kg/m^3 of concrete)

Corriente inicial para una diferencia de potencial de 30 V I_{30V} (mA) / Initial current with 30 V I_{30V} (mA)	Voltaje a aplicar U (V) / Applied voltage U (V)	Corriente inicial I_0 (mA) / Possible new initial current I_0 (mA)	Duración del ensayo t (horas) / Test duration t (hours)
$I_0<5$	60	$I_0<10$	96
$5<I_0<10$	60	$10<I_0<20$	48
$10<I_0<15$	60	$20<I_0<30$	24
$15<I_0<20$	50	$30<I_0<35$	24
$20<I_0<30$	40	$35<I_0<40$	24
$30<I_0<40$	35	$40<I_0<50$	24
$40<I_0<60$	30	$50<I_0<60$	24
$60<I_0<90$	25	$60<I_0<75$	24
$90<I_0<120$	20	$75<I_0<80$	24
$120<I_0<180$	15	$80<I_0<90$	24
$180<I_0<360$	10	$90<I_0<120$	24
$I_0>360$	10	$I_0>120$	6

As can be seen, the test duration is short, ranging from 6 to 96 hours. To this time must be added the conditioning period, which is between 24 and 48 hours. At the end of the test, the specimens must be subjected to an indirect tensile test to open them along their transverse axis, and by developing them with silver nitrate ($0.1M\ AgNO_3$), to determine the chlorides' penetration depth. With this data and the equations presented in the Standard (Equation 4), the non-steady-state chloride diffusion coefficient can be determined by the migration method (D_{nssm} in m^2/s):

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \cdot \left(x_d - 0.0238 \cdot \sqrt{\frac{(273+T)\cdot L \cdot x_d}{U-2}} \right) \quad [4]$$

where U is the applied voltage (in Volts), t is the test duration in hours, L is the specimen thickness (in mm) and T is the test temperature (in ºC).

Although NT Build 492 is one of the most widespread and widely used standards in material characterisation processes, in this work an equation based on the first current analysis is proposed to define an approximate value of D_{nssm}. For this purpose, a compilation of data from more than 100 samples analysed during the last year in the laboratory is presented. These samples were part of different works and range from ordinary concretes to very high-performance concretes and ultra-high performance fibre reinforced concretes.

La cara lateral de las muestras fue sellada con pintura epoxi, y se acondicionaron según norma de ensayo. Para ello, las muestras fueron almacenadas en un recipiente, donde se redujo la presión hasta alcanzar un valor de 1 a 5 kPa. Estas condiciones se mantuvieron durante 3 horas. Luego las probetas fueron saturadas con una disolución de hidróxido de calcio saturado ($Ca(OH)_2$). Las probetas se mantuvieron así durante 18 horas más hasta el inicio del ensayo.

Materiales

Las probetas utilizadas para este estudio fueron muestras de trabajo en laboratorio utilizadas en otros estudios. Se recopilan datos de más de 15 hormigones. Existen datos de hormigones convencionales, con resistencias f_c entre 25 y 55 MPa (a 28 días). En este estudio también se incluyeron datos de hormigones de alta resistencia (f_c por encima de 90 MPa a 28 días) y de hormigones de ultra alta resistencia, cuya resistencia a 28 días superaba los 150 MPa. También se integraron datos de hormigones de ultra alta resistencia reforzados con fibras metálicas (f_c mayor de 150 MPa a 28 días).

Análisis

Tras el acondicionado de las muestras, las probetas fueron sometidas a ensayo, según indica la norma (NORDTEST, 1999) y se describe en la introducción de este estudio. Se realizó un primer análisis aplicando un potencial inicial de 30 V y de acuerdo al valor de corriente obtenido (I_{30V}) se definieron los parámetros del ensayo (Tabla 1). Al finalizar el ensayo, las muestras fueron sometidas a un ensayo de tracción indirecta y se realizó el revelado para cuantificar la profundidad de penetración (x_d) y determinar el coeficiente de difusión en estado no estacionario (D_{nssm}). En la Imagen 2 se muestran algunas imágenes a título de ejemplo del revelado de las muestras.

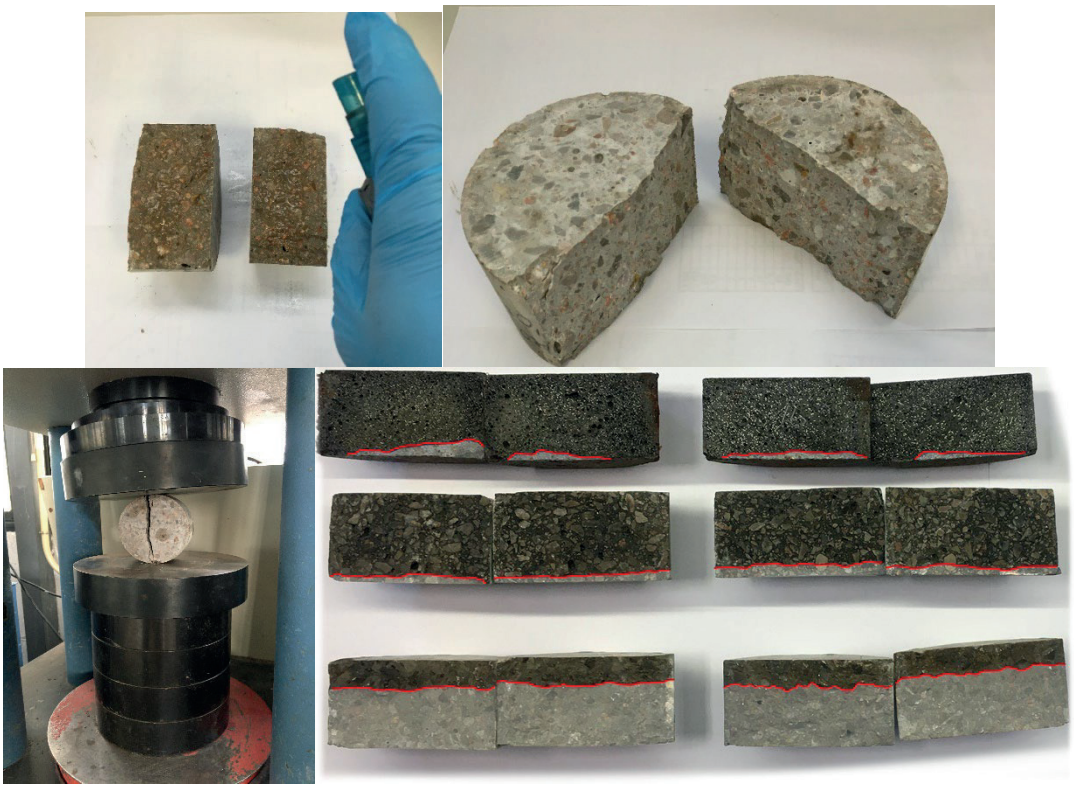


Imagen 2. Análisis de la profundidad de penetración de los cloruros

Image 2. Penetration depth análisis.

Resultados

En este estudio se realiza una comparativa entre los valores de D_{nssm} obtenidos en cada muestra frente a la corriente I_{30V} obtenida durante el primer análisis para determinar las condiciones del ensayo (al aplicar una diferencia de potencial de 30V). En la Imagen 3 se muestra la correlación obtenida entre ambos parámetros.

Experimental plan

Test specimens

The data collected in this study were obtained by testing cylindrical specimens (100 mm diameter and 50 mm thickness), as indicated in the Standard. The different specimens analysed were tested at the age of 28 days after manufacture and after 28 days in curing chamber (20±2ºC y R.H.>95%). The lateral face of the samples was sealed with epoxy painting, and they were conditioned according to the test standard. For this purpose, the samples were stored in a container, where the pressure was reduced to a value of 1 to 5 kPa. These conditions were maintained for 3 hours. The specimens were then saturated with a calcium hydroxide solution ($Ca(OH)_2$). The specimens were kept for a further 18 hours until the start of the test.

Materials

The specimens used for this study were laboratory working samples used in other studies and works. Data are collected for more than 15 concretes. There are results for ordinary concretes, with f_c between 25 and 55 MPa (at the age of 28 days). Data from high-performance concretes (f_c above 90 MPa at 28 days) and ultra-high-performance concretes, whose strength at 28 days exceeded 150 MPa, were also included in this study. Data from ultra-high-performance fibre reinforced concretes (f_c higher than 150 MPa at 28 days) were also integrated.

Analysis

After conditioning period, the specimens were tested according to the Standard (NORDTEST, 1999) and as described above. The first analysis was carried out by applying an initial potential difference of 30 V, and according to the current value obtained (I_{30V}), the test parameters were defined (Table 1). At the end of the test, the samples were subjected to an indirect tensile test and the silver nitrate analysis was performed to quantify the chloride penetration depth (x_d) and to determine the chloride diffusion coefficient in non-steady-state (D_{nssm}). Some pictures of this process are shown in Image 2.

Results

In this study, a comparison is made between the values of D_{nssm} obtained in each sample against the current I_{30V} obtained during the first analysis to determine the test conditions (by applying a potential difference of 30V). Image 3 shows the correlation obtained between both parameters.

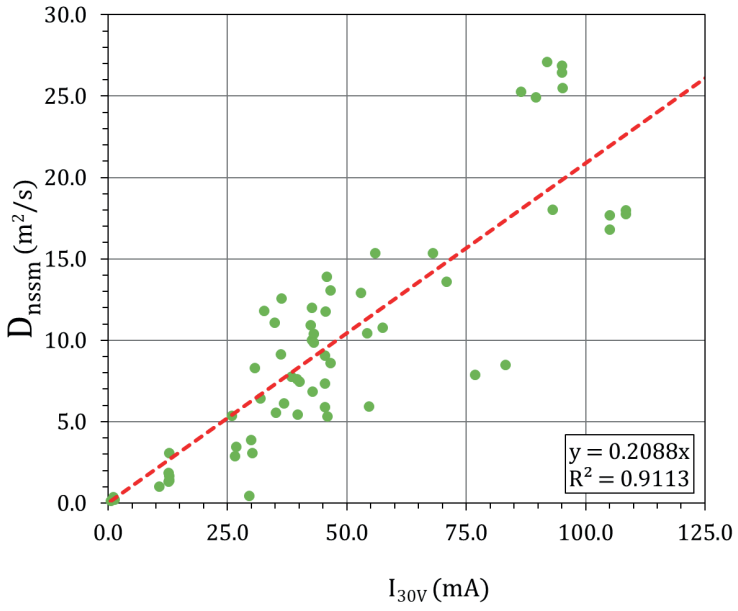


Imagen 3. Resultados obtenidos Image 3. Results obtained.

Como se muestra en la imagen, ambos parámetros guardan una correlación lineal, definida por la ecuación de la recta de regresión (Ecuación 5).

$$D_{nssm} = 0.2088 \cdot I_{30V} \quad [5]$$

A partir de la ecuación anterior, en cualquier estudio se puede definir el valor del coeficiente de difusión en estado no estacionario (D_{nssm}) únicamente con un primer análisis aplicando una diferencia de potencial de 30V y analizando la intensidad de corriente que pasa por el circuito (I_{30V}).

El R^2 de la recta se sitúa en torno a 0.91, lo que indica una buena correlación, pero que no permite asegurar con total seguridad una precisión del 100%, sino que la ecuación se debe interpretar como una aproximación para obtener un valor de D_{nssm} rápido y estimativo.

Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una ecuación para obtener el valor del coeficiente de difusión de los cloruros en estado no estacionario (D_{nssm}) en cualquier tipo de hormigón de manera rápida, únicamente aplicando una diferencia de potencial de 30 V y analizando la intensidad de corriente del circuito (I_{30V}) (Ecuación 6). Los datos utilizados provienen del estudio de más de 100 probetas realizados en el último año en laboratorio con diferentes tipos de hormigón (resistencias f_c entre 30 y 150 MPa a 28 días).

$$D_{nssm} = 0.2088 \cdot I_{30V} \quad [6]$$

Esta ecuación debe considerarse como un método rápido para estimar el D_{nssm}. Sin embargo, los resultados obtenidos no deben ser asumidos como exactos, ya que la desviación con los datos utilizados en este estudio no fue despreciable (R^2=0.91).

As shown in Image 5, both parameters are linearly correlated, as defined by the regression line and its equation (Equation 5).

$$D_{nssm} = 0.2088 \cdot I_{30V} \quad [5]$$

From the above equation, in any study it is possible to define the value of the diffusion coefficient in non-steady state (D_{nssm}) only using the data obtained in the first analysis applying a potential difference of 30V and analysing the current intensity passing through the circuit (I_{30V}).

The R^2 of the data obtained is around 0.91, which indicates a good correlation, but does not allow us to be sure of a 100% accuracy. For this reason, the equation should be interpreted as an approximation to obtain a quick and estimated value of D_{nssm}.

Conclusions

In this work, an equation has been presented to obtain the chloride diffusion coefficient in non-steady-state (D_{nssm}) in any type of concrete in a fast way, only by applying a potential difference of 30 V and analysing the current intensity of the circuit (I_{30V}) (Equation 6). The data used come from the analysis of more than 100 specimens carried out in the laboratory over the last year with different types of concrete (f_c strengths between 30 and 150 MPa at 28 days).

$$D_{nssm} = 0.2088 \cdot I_{30V} \quad [6]$$

This equation should be considered as a quick method to estimate the D_{nssm}. However, the results obtained should not be assumed to be accurate, as the deviation with the data used in this study was not negligible (R^2=0.91).

AGRADECIMIENTOS/ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the Spanish Government for Grant PID2020-119744RB-C21 funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033, and the support of the Universitat Politècnica de València. They are also grateful for the predoctoral scholarship granted to Josep Ramon Lliso Ferrando as part of the "Formación de Personal Investigador" programme from the Universitat Politècnica de València (FPI-UPV-2018).

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- AENOR. (2007). *UNE-14629. Determinación del contenido en cloruros en el hormigón endurecido*.
- UNE 83987:2014. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de los coeficientes de difusión de los iones cloruro en el hormigón endurecido. Método multirrégimen., (2014).
- AENOR, A. E. de N. y C. (2019). *UNE-EN 12390-11. Ensayos en Hormigón Endurecido. Parte 11 : Determinación de la resistencia a los cloruros del hormigón , difusión unidireccional*.
- Costa, A., & Appleton, J. (1999). Chloride penetration into concrete in marine environment - Part I: Main parameters affecting chloride penetration. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *32*(4), 252–259. https://doi.org/10.1007/bf02479594
- Costa, António, & Appleton, J. (2002). Case studies of concrete deterioration in a marine environment in Portugal. *Cement and Concrete Composites*, *24*(1), 169–179. https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00037-3
- Garcés Terradillos, P., Climent Llorca, M. Á., & Zornoza Gómez, E. (2008). Corrosión de armaduras en estructuras de Hormigón Armado. In *Editorial Club Universitario*.
- Lliso-Ferrando, J. R., Gasch, I., Martínez-Ibernón, A., & Valcuende, M. (2022). Corrosion Monitoring in Reinforced Concrete Structures Located in Marine Environments. *Ocean Engineering*, *in Press*.
- NORDTEST; (1996). NT Build 208. Chloride content by Volhard titration. *Nordtest Method*, *3*, 1–4.
- NORDTEST. (1999). NT Build 492. Rapid Chloride Migration Test (RCMT). *Nordtest Method. Nordic Cooperation.*, 1–8.
- Trocónis de Rincón, O., Sánchez, M., Millano, V., Fernández, R., de Partidas, E. A., Andrade, C., Martínez, I., Castellote, M., Barboza, M., Irassar, F., Montenegro, J. C., Vera, R., Carvajal, A. M., de Gutiérrez, R. M., Maldonado, J., Guerrero, C., Saborio-Leiva, E., Villalobos, A. C., Tres-Calvo, G., … Derrégibus, M. (2007). Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in Iberoamerican countries: DURACON project/CYTED. *Corrosion Science*, *49*(7), 2832–2843. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.02.009
- Yang, C. C., & Wang, L. C. (2004). The diffusion characteristic of concrete with mineral admixtures between salt ponding test and accelerated chloride migration test. *Materials Chemistry and Physics*, *85*(2–3), 266–272. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2003.12.025

IMPORTANCIA DE LAS MACROCELDAS EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO SITUADAS EN AMBIENTE MARINO

SIGNIFICANCE OF MACROCELL CURRENTS IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES LOCATED IN THE MARINE ENVIRONMENT

Josep Ramon Lliso-Ferrando
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Isabel Gasch Molina
Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: igasch@mes.upv.es
Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: igasch@mes.upv.es
Ana Martínez-Ibernón
Investigadora en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
José Manuel Gandía-Romero
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: joganro@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: joganro@csa.upv.es
Manuel Valcuende Payá
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es

Abstract

Chloride-induced corrosion is one of the main causes of deterioration in reinforced concrete structures. The chloride diffusion in concrete occurs due to the material's permeability. This agent can reach the reinforcement, and it can cause the local depassivation of the rebar and this triggers localised corrosion. At these sports, pitting corrosion is generated, where anodic and cathodic regions coexist which produce local corrosion or microcells ($i_{CORR,MICRO}$). In addition, the electrical connection between rebars which keep their initial passivity together with the corroding areas produces macrocell currents ($i_{CORR,MACRO}$). The total corrosion ($i_{CORR,TOTAL}$) of the rebars corresponds to the sum of both components: $i_{CORR,TOTAL} = i_{CORR,MICRO} + i_{CORR,MACRO}$. Although macrocell currents have been extensively studied, their significance in reinforced concrete structures and the need to be considered by embedded monitoring systems has not been proved. The aim of this study is to demonstrate the importance of these currents in $i_{CORR,TOTAL}$. For this purpose, reinforced concrete specimens were exposed to a simulated marine environment. They were prepared with four different concrete types. The corrosion of reinforcements was monitored for more than 300 days. At the end of the exposure period, a gravimetric validation was performed. The results obtained showed the macrocell currents can multiply the corrosion damage by a factor of 50.

Keywords
Reinforced concrete structures, Durability, Corrosion, Macrocell currents

Introducción

Las estructuras de hormigón armado presentan una durabilidad adecuada (Alexander & Beushausen, 2019). Sin embargo, cuando están situadas en ambientes marinos es frecuente que se produzcan daños por corrosión que aceleren el deterioro (Van Belleghem et al., 2018). El ion cloruro, presente en ambientes marinos penetra a través de la matriz cementante principalmente por difusión y desencadena la corrosión localizada (Cao, 2014). En estos puntos, denominados picaduras, se generan regiones anódicas y catódicas que promueven la aparición de las corrientes de microcelda ($i_{CORR,MICRO}$). Además, estas regiones interactúan con otras áreas del armado que mantienen su estado inicial de pasividad a través de las corrientes de macrocelda ($i_{CORR,MACRO}$). El desplazamiento de electrones se produce a través de las armaduras, ya que existe continuidad eléctrica, mientras que los aniones se desplazan a través de la disolución de poro presente en el hormigón, cerrando el circuito (Imagen 1). La corrosión total de una región del armado ($i_{CORR,TOTAL}$) corresponde a la suma de ambas componentes, tanto las corrientes de microcelda como de macrocelda (Ecuación 1) (C. Andrade et al., 1992):

$$i_{CORR,TOTAL} = i_{CORR,MICRO} + i_{CORR,MACRO} \qquad [1]$$

A pesar de esto, la mayoría de los sistemas de monitorización de la corrosión embebidos no consideran la componente de la macrocelda ($i_{CORR,MACRO}$) debido a la dificultad de utilizar sensores conectados al armado que participen de estas corrientes. En cambio, se utilizan sensores aislados para obtener un resultado aproximado de la corrosión de las armaduras más próximas. El error que se comete utilizando esta metodología puede ser importante y llevar a interpretaciones erróneas sobre el estado interno de las armaduras. La importancia de las corrientes de macrocelda ha sido estudiada por numerosos autores. Sin embargo, por facilidad, el método de análisis más utilizado ha sido utilizando disoluciones que reproduzcan las condiciones de la disolución de poro del hormigón. Así, por ejemplo, autores como Andrade (C. Andrade et al., 2008), Elsener (Elsener, 2002) o Chen (Chen & Su, 2021) cuantificaron las macroceldas como una componente que puede suponer entre un 22% y un 75 del total de corrosión de las armaduras. El rango de discrepancias es alto porque otros autores, como Qian (Qian et al., 2006) señalaron que solo podían alcanzar entre un 1.7% y un 2.4%. Sin embargo, en trabajos previos (Lliso-Ferrando et al., 2022b) se ha demostrado que relacionar los resultados obtenidos mediante estudios en disolución con el caso de armaduras embebidas no es adecuado. Es más, autores como Duffó y Farina (Duffó & Farina, 2016) demostraron que, aunque los estudios en disolución pueden ser muy útiles para obtener resultados acelerados, su extrapolación a casos reales de armaduras embebidas no es adecuado.

A partir de estos datos, el siguiente estudio se centró en demostrar la importancia de las corrientes de macrocelda, en este caso, a través de un estudio sobre armaduras embebidas. De esta forma, se podría cuantificar de una manera más adecuada la importancia de las macroceldas en la corrosión total en las estructuras de hormigón armado. Para ello, se fabricaron probetas de hormigón armado. Para su fabricación se utilizaron cuatro tipos de hormigón. Además, las armaduras embebidas contaban con diferentes recubrimientos, con el fin de obtener resultados que abarcasen diferentes posibilidades. En las probetas se utilizaron armaduras que participaron de las corrientes de macrocelda y armaduras aisladas del armado de la probeta. Durante más de 300 días se monitorizó la corrosión de todas las armaduras y al final de este periodo, se realizó una validación gravimétrica del estudio.

Plan Experimental

Probetas

Las probetas utilizadas en el estudio se describen en la Imagen 2. Se trata de probetas cúbicas, de 150 mm de lado y con tres armaduras embebidas. Cada armadura se fabricó según detalle (Imagen 2). Se realizó un encapsulado compuesto por tubería de PVC rellena de pintura epoxi que acotó la superficie de contacto con el hormigón a 50 mm lineales (1.571 mm^2). El extremo superior de las armaduras quedó libre, para permitir realizar conexiones eléctricas. El recubrimiento al que las armaduras fueron embebidas fue distinto: 5 mm, 10 mm y 20 mm.

Introduction

Reinforced concrete structures have adequate durability (Alexander & Beushausen, 2019). However, when they are located in the marine environment, corrosion damage often occurs, and it accelerates deterioration (Van Belleghem et al., 2018). Chloride ion, which is present in the marine environment, penetrates through the cementitious matrix mainly by diffusion, and it triggers localised corrosion (Cao, 2014). At these spots, named pits, anodic and cathodic regions are generated, and they promote the occurrence of the microcell currents ($i_{CORR,MICRO}$). In addition, these regions interact with other areas of the rebars that maintain their initial passivity condition through the macrocell currents ($i_{CORR,MACRO}$). Electron displacement occurs through the reinforcement, as there is electrical continuity, while anions move through the pore solution present in the concrete, closing the electrical circuit (Image 1). The total corrosion of one reinforcement area ($i_{CORR,TOTAL}$) corresponds to the sum of both microcell and macrocell currents (Equation 1) (C. Andrade et al., 1992):

$$i_{CORR,TOTAL} = i_{CORR,MICRO} + i_{CORR,MACRO} \qquad [1]$$

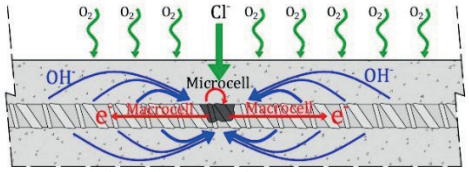


Imagen 1. Corrosión localizada en estructuras de hormigón armado

Image 1. Localised corrosion in reinforced concrete structures

Despite this, most embedded corrosion monitoring systems do not consider the macrocell component ($i_{CORR,MACRO}$) due to the difficulty of using rebars-connected sensors that take part in the macrocell processes. Instead, isolated sensors are used to obtain an approximate result of the nearest reinforcement corrosion rate. The mistake made using this methodology can be significant and lead to misinterpretations of the inner state of the reinforcement. The importance of macrocell currents has been studied by numerous authors. However, the most used analysis methods are based on solution studies that reproduce the conditions of the concrete pore solution. Thus, for example, authors such as Andrade (C. Andrade et al., 2008), Elsener (Elsener, 2002) or Chen (Chen & Su, 2021) quantified macrocells as a component that can account for between 22% and 75% of the total corrosion of reinforcement. The range of discrepancies is high because other authors, such as Qian (Qian et al., 2006) indicated that they could only reach between 1.7% and 2.4%. However, previous work (Lliso-Ferrando et al., 2022b) has shown that relating the results obtained by solution studies to the embedded rebar situation is not accurate. Moreover, authors as Duffó and Farina (Duffó & Farina, 2016) proved that, although solution studies can be very useful to obtain accelerated results, their extrapolation to real cases of embedded reinforcement is not appropriate.

Based on these data, this study is focused on proving the importance of macrocell currents, in this case, through a study on embedded reinforcement. In this way, the significance of macrocells in the total corrosion rate of reinforced concrete structures could be quantified more adequately. For this purpose, reinforced concrete specimens were manufactured. Four types of concrete were used for that purpose. In addition, the embedded reinforcement had different covers to obtain results including more possibilities. Some of the rebars used took part in macrocell processes, whereas others were kept electrically isolated during the study. The corrosion rate of the rebars was monitored for more than 300 days and, at the end of this period, a gravimetric validation of the study was carried out.

Experimental plan

Test specimens

The specimens used in the study are described in Image 2. They are cubic specimens, 150 mm on each side, and three rebars were embedded in each one.

Materiales

Para la fabricación de las probetas se utilizaron cuatro tipos de hormigón. Las diferentes dosificaciones se presentan en la Tabla 1. Se trata de tres hormigones convencionales, uno de baja resistencia (T-30), de media resistencia (T-40) y de alta resistencia (T50) y un hormigón de muy alta resistencia (T-90). Para su fabricación se utilizó un cemento CEM I 42.5 R/SR, excepto para el hormigón T-30, que se utilizó un CEM II 32.5 B-L. El hormigón T-90 incluyó humo de sílice. Los áridos utilizados fueron arena 0/4 y gravas 4/7 y 4/12. Por cada tipo de hormigón y recubrimiento se fabricaron tres probetas. Esto hace un total de 36 probetas y 108 armaduras para la monitorización.

Tabla 1 Dosificaciones (kg/m^3 de hormigón)
Table 1 Mixture proportions of concrete (kg/m^3 of concrete)

	T-30	T-40	T-50	T-90
Cemento / Cement (CEM II 32.5 B-L)	307			
Cemento / Cement(CEM I 42.5 R/SR)		292	450	500
Agua / Water	184	190	225	178
Superplastificante / Superplasticizer	1.85	2.80	1.37	3.50
Humo de sílice / Silica fume				55
Arena (0/4) / Sand (0/4)	1438	1256	880	914
Grava (4/7) / Gravel (4/7)			880	779
Grava (4/12) / Gravel (4/12)	491	707		
Relación agua/cemento / Water/binder ratio	0.60	0.65	0.50	0.32

Tras la fabricación de las probetas, estas se almacenaron en cámara de curado durante 28 días (20±2ºC y Humedad Relativa superior al 95%). Al finalizar el curado, la cara superior de las probetas y diez milímetros de las caras laterales fueron selladas con pintura epoxi, tal y como se mostraba en la Imagen 2.

Junto con estas probetas se fabricaron una serie de probetas auxiliares para la caracterización del material. A los 28 días de edad, y tras el curado en cámara húmeda, se realizaron diferentes ensayos. El tipo de ensayo, norma utilizada y resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2. En esta tabla se han incluido los coeficientes de variación (números entre paréntesis).

Tabla 2 Ensayos realizados a 28 días
Table 2 Characterisation tests performed at 28 days age

	T-30	T-40	T-50	T-90
Resistencia a compresión / Compressive strenght (MPa) [Standard UNE-EN 12390-3:2020]	30.67 (1.12)	39.47 (3.21)	47.75 (0.92)	88.86 (2.42)
Coeficiente de porosidad accessible al agua / Porosity accesible to water (%) [Standard UNE 83980:2014]	15.51 (0.21)	14.79 (0.30)	13.17 (0.07)	9.14 (0.03)
Coeficiente de succión capilar / Capillary suction coefficient (kg/m^{2}min$^{0.5}$) [Standard UNE 83980:2014]	72.75 (4.82)	67.41 (10.2)	53.06 (2.36)	31.27 (1.25)
Permeabilidad al oxígeno / Oxygen permeability (m^2) [Standard UNE 83982:2008]	$3.12\cdot10^{-16}$ ($8.3\cdot10^{-17}$)	$1.02\cdot10^{-16}$ ($2.3\cdot10^{-17}$)	$1.17\cdot10^{-16}$ ($2.9\cdot10^{-17}$)	$7.63\cdot10^{-19}$ ($2.3\cdot10^{-19}$)
Difusión de cloruros (migración) / Chloride migration coefficient (migration) (m^2/s) [Standard NT Build 492]	$53.8\cdot10^{-12}$ ($4.1\cdot10^{-11}$)	$26.8\cdot10^{-12}$ ($1.5\cdot10^{-11}$)	$22.1\cdot10^{-12}$ ($8.5\cdot10^{-12}$)	$1.9\cdot10^{-12}$ ($1.3\cdot10^{-12}$)
Resistividad / Resistivity (Ωm) [Standard UNE 83988-1:2008]	51.64 (7.23)	51.90 (12.10)	49.05 (5.32)	800.80 (26.87)

Each reinforcement was manufactured according to the detail (Image 2). Part of the piece was encapsulated using PVC pipe and epoxy paint, which delimited the surface area in contact with concrete to 50 mm (1571 mm^2). The upper end of the reinforcement was left free to allow electrical connections to be made. The concrete cover used was 5 mm, 10 mm and 20 mm.

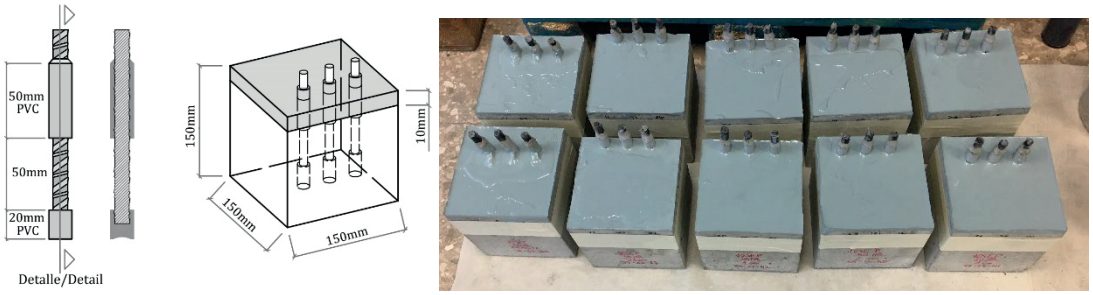


Imagen 2. Descripción de las probetas de estudio Image 2. Description of test specimens

Materials

Four types of concrete were prepared for the specimens' manufacture. The different dosages are presented in Table 1. These are three ordinary concretes, a low strength concrete (T-30), a medium strength concrete (T-40) and a high strength concrete (T-50). In addition, a very high strength concrete (T-90) was also produced. A CEM I 42.5 R/SR cement was used for their manufacture, except for the T-30 concrete, which a CEM II 32.5 B-L was used. The T-90 concrete included silica fume. The aggregates used were 0/4 sand and 4/7 and 4/12 gravels. For each type of concrete and cover, three specimens were produced. This makes a total of 36 specimens and 108 reinforcements that were monitored.

Once test specimens were manufactured, they were stored in a curing chamber for 28 days (20±2ºC and relative humidity above 95%). At the end of the curing process, the top face of the specimens and 10 millimetres of the lateral faces were sealed with epoxy paint, as shown in Image 2.

Together with these specimens, a series of auxiliary specimens were produced for the materials' characterisation. At the age of 28 days, different tests were carried out. The test, standard used, and results obtained are shown in Table 2. The coefficients of variation (numbers in brackets) have been included in this table.

Exposure conditions

After the curing period, the test specimens were partially immersed in seawater prepared according to ASTM D1141-98:2021 (ASTM International, 2021). For each cover configuration and concrete type, one specimen (3 rebars) was kept electrically isolated. In contrast, the rebars of the two other specimens (6 bars) were electrically connected to the rest of the reinforcement and to a carbon fibre mesh partially immersed in the same exposure solution to act cathodically in the macrocell generated. In this way, some rebars took part in the macrocell processes (M configuration), while others remained isolated (NM configuration). Table 3 defines the number of specimens and rebars, the configurations and the naming was used.

Tabla 3 Configuración de las muestras y nomenclatura de las probetas
Table 3 Samples configuration and naming of test specimens

Hormigón / Concrete type	T-30		T-40		T-50		T-90	
Configuración eléctrica / Electric configuration	M	NM	M	NM	M	NM	M	NM
Recubrimiento / Cover (5 mm, +5)	6	3	6	3	6	3	6	3
Recubrimiento / Cover (10 mm, +10)	6	3	6	3	6	3	6	3
Recubrimiento / Cover (20 mm, +20)	6	3	6	3	6	3	6	3
Total / Total rebars	108 (36 probetas) / 108 (36 test specimens)							

Condiciones de exposición

Tras el proceso de curado y acondicionado de las probetas de estudio, estas fueron parcialmente sumergidas en agua de mar, preparada de acuerdo a la norma ASTM D1141-98:2021 (ASTM International, 2021). Por cada configuración de recubrimiento y tipo de hormigón, una probeta (3 armaduras) se mantuvieron aisladas eléctricamente. En cambio, las armaduras de las otras dos probetas (6 barras) fueron conectadas eléctricamente al resto del armado y a una malla de fibra de carbono parcialmente sumergida en la misma disolución de exposición para actuar catódicamente en la macrocelda. De esta forma, unas armaduras participaron de los procesos de macrocelda originados (configuración M), mientras que otras se mantuvieron aisladas (configuración NM). En la Tabla 3 se definen el número de probetas y de armaduras, la configuración eléctrica y la nomenclatura utilizada.

Durante el periodo de exposición se realizó un proceso de monitorización de la corrosión. En primer lugar, se analizaron las corrientes de macrocelda en cada armadura intercalando un amperímetro de resistencia casi nula (ZRA) modelo Keithley 2000 Tektronix entre armadura y resto del armado. El valor considerado fue el obtenido tras 3 minutos desde el inicio de la medida para asegurar la estabilización de la señal, y fue normalizado por la superficie de armadura en contacto con el hormigón (1571 mm^2) para obtener $i_{CORR,MACRO}$. En las armaduras con configuración NM se consideró que las corrientes de macrocelda eran nulas ya que se mantuvieron aisladas eléctricamente del resto del armado. Posteriormente, todas las armaduras fueron aisladas eléctricamente y se analizó la $i_{CORR,MICRO}$ utilizando el análisis de la resistencia a la polarización lineal (LPR), método descrito en la norma UNE 112072:2011 (AENOR, 2011). La corrosión total de cada armadura se calculó de acuerdo a lo indicado en la Ecuación 1. En la Imagen 3 se muestran algunas fotografías del proceso de exposición y monitorización.



Imagen 3. Proceso de monitorización Image 3. Monitoring process

Al finalizar las medidas, las armaduras con configuración M se volvieron a conectar para continuar participando de los procesos de macrocelda hasta la siguiente medida, mientras que las armaduras con configuración NM se mantuvieron eléctricamente aisladas.

Resultados

En la Imagen 4 se muestran los valores promedio la intensidad de corrosión total ($i_{CORR,TOTAL}$) para cada grupo de armaduras analizadas. En las gráficas se ha señalado el umbral de 0.1 µA/cm^2 y de 1 µA/cm^2 indicados en bibliografía (Carmen Andrade et al., 2004) para considerar una corrosión despreciable o alta, respectivamente.

Tal y como muestran los resultados, existe una gran diferencia entre armaduras con configuración M y NM. Por ejemplo, al final del periodo de monitorización, la $i_{CORR,TOTAL}$ en el grupo T-30(M)+5 fue de 87.9 µA/cm^2 (lo que corresponde a una corrosión muy alta), frente a el grupo T-30(NM)+5, que apenas sobrepasó el 1.1 µA/cm^2 (casi dos órdenes de magnitud menos). Estas diferencias se aprecian en la mayoría de los casos. En este estudio se utilizó una gran superficie de malla de fibra de carbono, lo que potenció la macrocelda, tal y como se ha demostrado en trabajos previos (Lliso-Ferrando et al., 2022a). Sin embargo, las diferencias entre grupo M y NM fueron prácticamente despreciables en las muestras embebidas en T-90. Este hormigón, tal y como demostraron los resultados de caracterización, presente una matriz cementante mucho menos porosa y las armaduras alcanzaron a mantener su estado inicial de pasividad durante todo el estudio. Esto demuestra que las corrientes de macrocelda no influyen en la corrosión total mientras las armaduras mantengan su estado de pasividad, situación completamente opuesta a cuando parte del armado se despasiva.

During the exposure period, a corrosion monitoring process was carried out. Firstly, the macrocell currents in each reinforcement were analysed by introducing a Keithley 2000 Tektronix ZRA between the reinforcement analysed and the rest of the rebars. The value considered was obtained after 3 minutes from the start of the measurement to ensure stabilisation of the signal, and it was normalised by the area of the reinforcement in contact with the concrete (1571 mm^2) to obtain $i_{CORR,MACRO}$. In NM rebars, the macrocell currents were considered to be zero as they were kept electrically isolated. Subsequently, all the rebars were electrically isolated and $i_{CORR,MICRO}$ was analysed using the linear polarisation resistance (LPR) test, a method described in the UNE 112072:2011 (AENOR, 2011). The total corrosion rate of each rebar was estimated according to Equation 1. Some pictures of the exposure and monitoring process are shown in Image 3.

At the end of measurements, the M-configuration rebars were reconnected to continue taking part in macrocell processes until next measurement, while NM-configuration rebars were kept electrically isolated.

Results

Image 4 shows the average values obtained ($i_{CORR,TOTAL}$) for each group were analysed. In the graphs, 0.1 µA/cm^2 and 1 µA/cm^2 thresholds indicated in the literature (Carmen Andrade et al., 2004) have been highlighted to consider negligible or high corrosion, respectively.

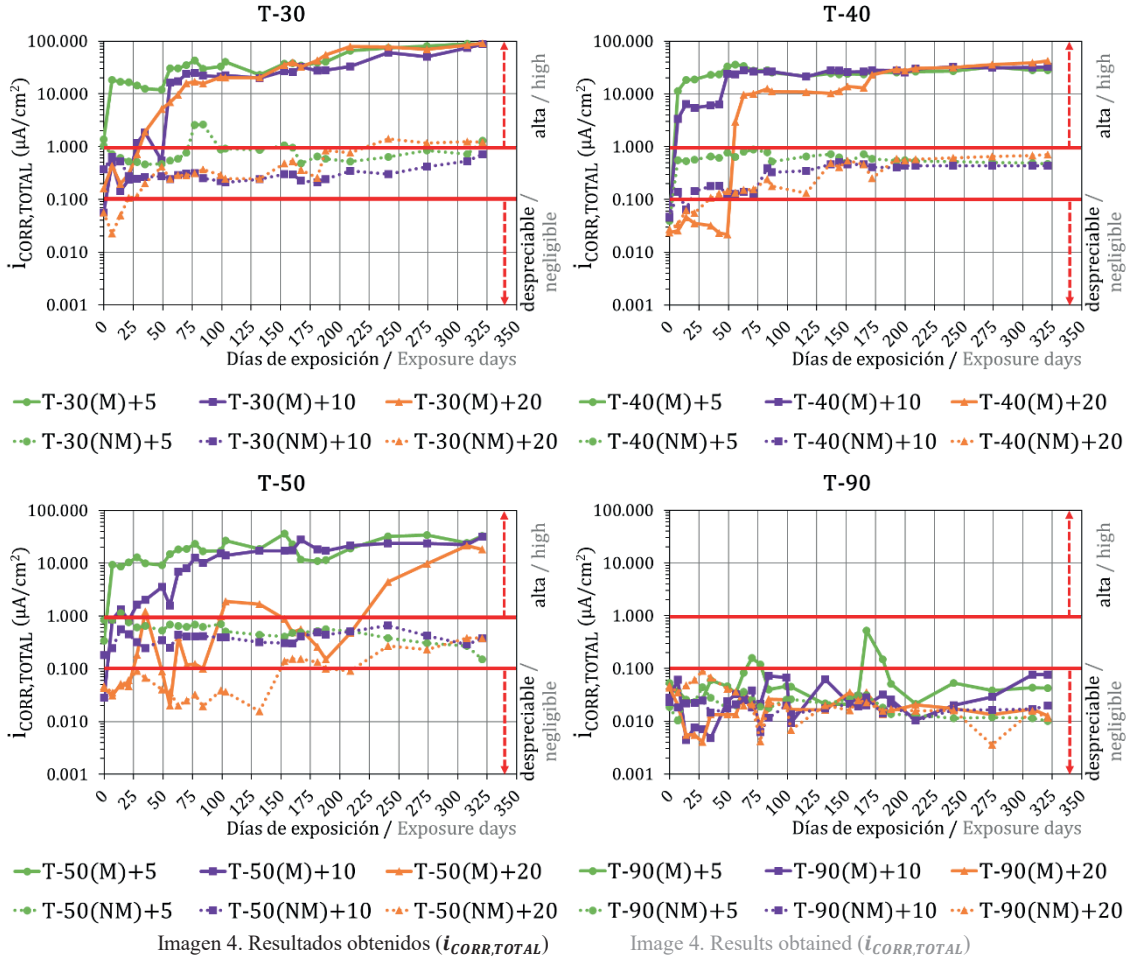


Imagen 4. Resultados obtenidos ($i_{CORR,TOTAL}$)

Image 4. Results obtained ($i_{CORR,TOTAL}$)

As the results show, there is a big difference between reinforcement with M and NM configuration.

A pesar de que los resultados observados permiten conocer un poco mejor la influencia de las corrientes de macrocelda en la corrosión de las estructuras de hormigón armado, para cuantificar realmente su importancia se deben utilizar parámetros de daño acumulado. Para ello, a partir de las curvas $i_{CORR,TOTAL}$-tiempo presentadas anteriormente, se realizó el cálculo de la pérdida de masa acumulada (Δm) de cada armadura según la Ley de Faraday (Ecuación 2) de acuerdo con:

$$\Delta m = \frac{M}{n \cdot F} \cdot \int_{t_0}^{t} i_{CORR} \cdot dt \qquad [2]$$

donde M es la masa atómica del acero (55.845 g/mol), t es el tiempo transcurrido en segundos, n es el número de electrones liberados o adquiridos en le proceso, que en este caso es 2, y F es la constante de Faraday (96854 C/mol). El valor obtenido de pérdida de masa (Δm) fue obtenido en g/cm^2, por lo que fue normalizado por la superficie de armadura en contacto con hormigón (1.571 mm^2).

La pérdida de masa acumulada promedio obtenida para cada grupo de estudio se muestra en la Tabla 4. Entre paréntesis se han incluido los coeficientes de variación para cada caso.

Tabla 4 Pérdida de masa (g) acumulada por cada grupo de estudio
Table 4 Accumulated mass loss (g) according to each studied group

Hormigón / Concrete type	T-30		T-40		T-50		T-90	
Configuración eléctrica / Electric configuration	M	NM	M	NM	M	NM	M	NM
Recubrimiento / Cover (5 mm, +5)	6676 (9)	128 (7)	3442 (11)	52 (14)	1819 (21)	47 (11)	22 (4)	2 (3)
Recubrimiento / Cover (10 mm, +10)	5393 (12)	45 (10)	2269 (9)	80 (8))	1589 (15)	22 (5)	5 (2)	2 (1)
Recubrimiento / Cover (20 mm, +20)	4468 (13)	101 (5)	627 (7)	21 (2)	737 (6)	18 (1)	2 (1)	3 (2)

Los resultados obtenidos demuestran lo ya presentado en las gráficas de la Imagen 4. La pérdida de masa fue significativamente mayor en aquellas armaduras con configuración M frente a las armaduras NM. Por ejemplo, en el caso de T-30(M)+5, la pérdida acumulada fue más de 50 veces superior a las mismas muestras, pero con configuración NM. Esta situación se repite en T-40 y T-50, aunque en menor medida, gracias a las mayores prestaciones de este hormigón (Tabla 2 de caracterización. En otros casos, como en el T-90, las diferencias fueron prácticamente nulas ya que las armaduras mantuvieron su condición inicial de pasivada. Estos datos demuestran la importancia de las corrientes de macrocelda y la necesidad de considerarlas por parte de los sistemas de monitorización embebidos.

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

-las corrientes de macrocelda presentan una escasa influencia cuando las armaduras mantienen su estado de pasividad inicial;

-sin embargo, cuando se produce la despasivación de parte del armado, las corrientes de macrocelda alcanzan valores altos y pueden incrementar la intensidad de corrosión tota. En este caso, se incrementó en casi dos órdenes de magnitud;

-en lo que respecta al daño acumulado total, al finalizar este estudio, la pérdida de masa total fue 50 veces más alta en las armaduras M que en las NM. Esta diferencia corresponde directamente a la componente $i_{CORR,MACRO}$ de la corrosión total, lo que demuestra la importancia de ser consideradas por parte de los sistemas de monitorización embebidos.

Los resultados obtenidos en este estudio fueron validados mediante gravimetría.

For example, at the end of the monitoring period $i_{CORR,TOTAL}$ in T-30(M)+5 group was 87. 9 μA/cm^2 compared to T-30(NM)+5 group, which barely exceeded 1.1 μA/cm^2. These differences are noticeable in most cases. In this study, a large surface area of carbon fibre mesh was used, which enhanced the macrocell, as demonstrated in previous work (Lliso-Ferrando et al., 2022a). However, the differences between group M and NM were practically negligible in the samples embedded in T-90. This concrete, as proved by characterisation results, had a much less porous cementitious matrix and the reinforcements were able to maintain their initial passive state throughout the study. This shows that macrocells do not affect the corrosion rate as long as the reinforcement remains passive, which is the opposite of the situation when part of the reinforcement is depassivated.

Although the observed results provide some insight into the influence of macrocell currents on reinforcement corrosion, in order to truly quantify their importance, cumulative damage parameters must be used. For this purpose, from the $i_{CORR,TOTAL}$-time curves presented above, the mass loss was (Δm) estimated according to Faraday's Law (Equation 2):

$$\Delta m = \frac{M}{n \cdot F} \cdot \int_{t_0}^{t} i_{CORR} \cdot dt \qquad [2]$$

where M is the atomic mass of the steel (55.845 g/mol), t is the elapsed time in seconds, n is the number of electrons released or acquired in the process (2 in this case) and F is the Faraday's constant 96854 C/mol). The mass loss was obtained in g/cm^2, so it was normalised by the reinforcement surface in contact with concrete (1571 cm2).

The average mass loss obtained for each study group is shown in Table 4. The coefficients of variation for each case have been included (numbers in brackets).

Results obtained proved what has already been presented in the graphs in Image 4. The mass loss was significantly higher in the M-configuration rebars than in the NM reinforcements. For example, in T-30(M)+5, the mass loss was more than 50 times higher than the same samples but NM configuration. This situation is repeated in T-40 and T-50, although to a lesser extent, thanks to the higher performance of this concrete (Table 2). In other cases, such as T-90, the differences were practically nil, as the reinforcement kept its initial passivity condition. These data proved the importance of macrocell currents and the need for embedded monitoring systems to consider them.

Conclusions

The following conclusions can be drawn:

-macrocell currents show little influence when the reinforcement maintains its initial passive condition;

-however, when depassivation occurs, the macrocell currents reach high values and can increase the total corrosion rate. In this case, it increased by almost two orders of magnitude;

-in terms of corrosion damage, at the end of this study, the mass loss was 50 times higher in M reinforcement than in NM reinforcement (most unfavourable case).

These data demonstrated the macrocell currents must be considered by corrosion monitoring systems. The results obtained in this study were validated by gravimetry.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- AENOR. (2011). *UNE 112072 Determinación de la velocidad de corrosión de armaduras en laboratorio mediante medida de la resistencia a la polarización*.
- Alexander, M., & Beushausen, H. (2019). Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures – review and critique. *Cement and Concrete Research*, *122*(February), 17–29. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.018.
- Andrade, C., Garcés, P., & Martínez, I. (2008). Galvanic currents and corrosion rates of reinforcements measured in cells simulating different pitting areas caused by chloride attack in sodium hydroxide. *Corrosion Science*, *50*(10), 2959–2964. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.07.013
- Andrade, C., Maribona, I. R., Feliu, S., González, J. A., & Feliu, S. (1992). The effect of macrocells between active and passive areas of steel reinforcements. *Corrosion Science*, *33*(2), 237–249. https://doi.org/10.1016/0010-938X(92)90148-V.
- Andrade, Carmen, Alonso, C., Gulikers, J., Polder, R., Cigna, R., Vennesland, Salta, M., Raharinaivo, A., & Elsener, B. (2004). RILEM TC 154-EMC: "Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion". Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *37*(273), 623–643. https://doi.org/10.1617/13952.
- ASTM International. (2021). D1141-98 (2021) Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water. In *ASTM International*.
- Cao, C. (2014). 3D simulation of localized steel corrosion in chloride contaminated reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, *72*, 434–443. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.030.
- Chen, L., & Su, R. K. L. (2021). Corrosion rate measurement by using polarization resistance method for microcell and macrocell corrosion: Theoretical analysis and experimental work with simulated concrete pore solution. *Construction and Building Materials*, *267*, 121003. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121003.
- Duffó, G. S., & Farina, S. B. (2016). Electrochemical behaviour of steel in mortar and in simulated pore solutions: Analogies and differences. *Cement and Concrete Research*, *88*, 211–216. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.07.007.
- Elsener, B. (2002). Macrocell corrosion of steel in concrete - Implications for corrosion monitoring. *Cement and Concrete Composites*, *24*(1), 65–72. https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00027-0.
- Lliso-Ferrando, J. R., Gasch, I., Martínez-Ibernón, A., & Valcuende, M. (2022a). Effect of macrocell currents on rebar corrosion in reinforced concrete structures exposed to a marine environment. *Ocean Engineering*, *257*(April). https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111680.
- Lliso-Ferrando, J. R., Gasch, I., Martínez-Ibernón, A., & Valcuende, M. (2022b). Macrocell corrosion currents in simulated concrete pore solution and reinforced concrete. *In Press.*
- Qian, S., Zhang, J., & Qu, D. (2006). Theoretical and experimental study of microcell and macrocell corrosion in patch repairs of concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, *28*, 685–695. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.05.010.
- Van Belleghem, B., Kessler, S., Van den Heede, P., Van Tittelboom, K., & De Belie, N. (2018). Chloride induced reinforcement corrosion behavior in self-healing concrete with encapsulated polyurethane. *Cement and Concrete Research*, *113*(August), 130–139. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.07.009

ANÁLISIS DE LA EFECTIVIDAD DE LAS REPARACIONES MEDIANTE PARCHEADO EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO. PARTE 1: MORTERO UTILIZADO

ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF PATCH REPAIRS IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES. PART 1: MORTAR USED

Josep Ramon Lliso-Ferrando
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Isabel Gasch Molina
Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: igasch@mes.upv.es
Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: igasch@mes.upv.es
Ana Martínez-Ibernón
Investigadora en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
José Manuel Gandía-Romero
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: joganro@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: joganro@csa.upv.es
Manuel Valcuende Payá
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es

Abstract

In recent years, many reinforced concrete structures have been affected by corrosion damage of rebars. This phenomenon is a major problem that requires significant expenditure in repairs. The most used method to alleviate corrosion damage is the patching repair. This procedure consists of removing the concrete cover, cleaning the reinforcement, and filling the hole with a new mortar. However, it is a process that is often not carried out properly and results in new damages within a short period of time. This paper presents an analysis of the effectiveness of this type of repair by means of experimental laboratory works. For this purpose, corroded reinforcements were prepared, and they were embedded in a commercial repair mortar prepared with different dosages. The specimens were partially immersed in seawater for more than 200 days, simulating the conditions of the real structures, and corrosion monitoring was carried out. In parallel, an analysis of the accumulated damage was carried out and, at the end of the study, the rebars were subjected to visual inspection. This work proved how the presence of defects due to poor backfill with repair mortar or poor dosage can increase the damage three times.

Keywords
Reinforced concrete structures, Durability, Corrosion, Patch repairs

Introducción

Las armaduras embebidas en hormigón cuentan con dos barreras que las protegen frente a la corrosión. Por un lado, la barrera química, una capa de óxidos (capa pasiva) que se origina debido a la alta alcalinidad de la matriz cementante durante el fraguado del hormigón. Esta capa permite que la corrosión de las armaduras se pueda considerar despreciable. Por otro lado, el recubrimiento actúa como barrera física que impide la llegada de agentes agresivos capaces de alterar la capa pasiva y desencadenar la corrosión activa del metal (Alhozaimy et al., 2016). Estas condiciones permiten asegurar que las armaduras están protegidas frente a la corrosión.

Sin embargo, la despreocupación por la agresividad donde las estructuras de hormigón armado van a estar situadas (ambientes marinos, por ejemplo) o la utilización de recubrimientos insuficientes o irregulares aceleran la aparición de procesos de corrosión de manera prematura, lo que significa una reducción en la durabilidad y vida útil de las estructuras (Song & Saraswathy, 2007). También son frecuentes que aparezcan daños por corrosión debido a la utilización de dosificaciones inadecuadas para las condiciones de exposición o por problemas durante la ejecución de la obra.

Todos estos inconvenientes se traducen en graves daños que requieren de reparaciones para mitigar los efectos de la corrosión. Esto supone un gran coste económico y medioambiental debido al consumo de recursos. Además, se deben sumar costes indirectos derivados de la paralización de uso de estructuras o daños estéticos ocasionados (Goyal et al., 2018). Sin embargo, lo más preocupante de las reparaciones en estructuras de hormigón armado para paliar la corrosión es su efectividad. Son numerosos los casos de reparaciones que en poco tiempo han necesitado de nuevas intervenciones debido a que siguen apareciendo daños por corrosión (Qian et al., 2006; Raupach, 2006; Soleimani et al., 2010; Su et al., 2021).

El método más común para mitigar el daño por corrosión en estructuras de hormigón armado son las reparaciones mediante parcheado. Este método está basado en la detección de las zonas del armado afectadas por el fenómeno de la corrosión y la retirada del recubrimiento. Posteriormente, las armaduras deben ser cepilladas y se debe aplicar una capa de pasivación sobre las barras. Por último, el armado debe ser protegido de nuevo con un mortero especialmente indicado para este tipo de tareas. Se trata de morteros de reparación, cuyas dosificaciones incluyen una granulometría muy fina (tamaño máximo de árido 2 mm), que son fluidos para colmatar toda la zona de relleno y que, además, son ligeramente expansivos o de retracción controlada. En la Imagen 1 se muestran evidencias de este procedimiento de trabajo (ANFAPA, 2016).



Imagen 1. Reparación de estructura de hormigón armado mediante parcheado

Image 1. Patch repairs in reinforced concrete structures

Este procedimiento requiere de una ejecución adecuada. Sin embargo, un error común en este tipo de trabajos es una mala dosificación. A pesar de que las casas suministradoras del material indican la relación agua/material cementante que se debe emplear, en muchos casos se añade un porcentaje de agua superior al especificado para producir más material y abaratar costes. Por otro lado, es frecuente la presencia de defectos en el rellenado que generen vacíos. Estos huecos se colmatan con la humedad existente y ocasionan de nuevo daños por corrosión sobre las armaduras (Angst et al., 2017).

Introduction

Reinforcements embedded in concrete have two barriers that protect them against corrosion. On the one hand, the chemical barrier, a layer of oxides (passive layer) which is created due to the high alkalinity of the cementitious matrix after the concrete setting. This layer allows corrosion of the reinforcement to be considered negligible. On the other hand, the concrete cover acts as a physical barrier. It prevents chlorides or carbonation to reach the rebars and modify the passive layer condition, triggering active corrosion (Alhozaimy et al., 2016). These conditions ensure that the reinforcement is protected against corrosion.

However, the lack of concern for the aggressiveness where the reinforced concrete structures will be located (the marine environments, for example) or the use of insufficient or irregular concrete covers accelerate the appearance of corrosion processes prematurely, which means a reduction in the durability and service life of the structures (Song & Saraswathy, 2007). Corrosion damage is also frequently caused when using inadequate dosages for the exposure conditions or by problems during the casting process.

All these drawbacks result in severe damage requiring repairs to mitigate the effects of corrosion phenomena. This situation entails a high economic and environmental cost due to the consumption of resources. In addition, there are also indirect costs due to the stoppage of structures' use or aesthetic damages (Goyal et al., 2018). However, the most worrying aspect of reinforced concrete repairs to mitigate corrosion damage is their effectiveness. There are numerous cases of repairs that in a short time have required new interventions because corrosion damage continues to appear (Qian et al., 2006; Raupach, 2006; Soleimani et al., 2010; Su et al., 2021).

The most common method to mitigate corrosion damage in reinforced concrete structures is patch repairs. This method is based on the detection of the reinforcement areas affected by the corrosion phenomenon and the removal of the concrete cover. Subsequently, the reinforcement must be brushed, and a passivation coating must be applied to the bars. Finally, the reinforcement must be protected once again with a mortar that is especially suitable for this type of tasks. These are repair mortars, whose dosages include a very fine granulometry (maximum aggregate size 2 mm), which are fluid to fill the entire filling area, and which are also slightly expansive, or shrinkage controlled. Evidence of this working procedure is shown in Image 1 (ANFAPA, 2016).

This procedure requires proper execution. However, a common mistake in this type of work is poor dosages. Even though the materials' suppliers indicate the water/cementitious material ratio to be used, in many cases a higher percentage of water is added to produce more material and reduce costs. On the other hand, it is common to find defects in the backfill that generate voids. These voids become saturated due to moisture content and trigger corrosion phenomena in a short period of time (Angst et al., 2017).

Based on the above information, the aim of this work was to prove the consequences of carrying out corrosion repair works on reinforced concrete structures in an inadequate manner. For this purpose, previously corroded reinforcements were embedded in a commercial repair mortar. Different dosages were used for the mortar manufacture: the one provided by the material supplier and another one with 10% more water than necessary. In addition, some manufactured specimens were prepared with defects and voids near the reinforcement to simulate inadequate backfilling. Once the specimens were manufactured, they were immersed in seawater and subjected to 12-hour wetting and drying cycles for more than 200 days. During this time corrosion monitoring was carried out and at the end of the study the reinforcements were subjected to visual inspection.

Experimental plan

Test specimens

To carry out the study, cylindrical specimens (Ø50 mm, height 100 mm) (Image 2) were manufactured. The reinforcement was partially protected with PVC pipe and epoxy painting, limiting the metal surface in contact with the concrete to 5 linear cm (1571 mm2). These reinforcements were previously corroded using impressed current until a mass loss of 6% was achieved. A total of 12 specimens were produced: 6 specimens were prepared ensuring an adequate coating. The other 6 specimens were prepared with an air void next to the rebar.

A partir de lo comentado anteriormente, el objetivo de este trabajo fue demostrar las consecuencias de llevar a cabo tareas de reparación de la corrosión en estructuras de hormigón armado de manera inadecuada. Para ello, se utilizaron armaduras corroídas previamente que fueron embebidas en un mortero de reparación comercial. Se utilizaron diferentes dosificaciones para la preparación del mortero: la facilitada por el fabricante y otra con un incremento del 10% del agua necesaria. Además, algunas de las muestras fabricadas se prepararon con defectos y oquedades cerca del armado para simular un relleno inadecuado. Una vez fabricadas las probetas, fueron sumergidas en agua de mar y sometidas a ciclos de humectación y secado de 12 horas durante más de 200 días. Durante este tiempo se realizó una monitorización de la corrosión y al finalizar el estudio las armaduras fueron sometidas a inspección visual.

Plan Experimental

Probetas

Para llevar a cabo el estudio se fabricaron probetas cilíndricas (Ø50 mm, altura 100 mm) como las que se describen en la Imagen 2. En el eje central de cada muestra se embebió una armadura. Esta armadura fue protegida parcialmente con tubería de PVC rellena de epoxi limitando la superficie de metal en contacto con el hormigón a 5 cm lineales (1571 mm^2). Estas armaduras fueron corroídas previamente mediante la utilización de corriente impresa hasta alcanzar una pérdida de masa de un 6%. En total se fabricaron 12 probetas. Del total de probetas, 6 muestras fueron preparadas asegurando un recubrimiento adecuado. Sin embargo, 6 probetas fueron preparadas generando un defecto en el recubrimiento. Este defecto se generó incluyendo un elemento junto a la armadura que fue retirado a las pocas horas, tal y como se muestra en las fotografías de la Imagen 3.

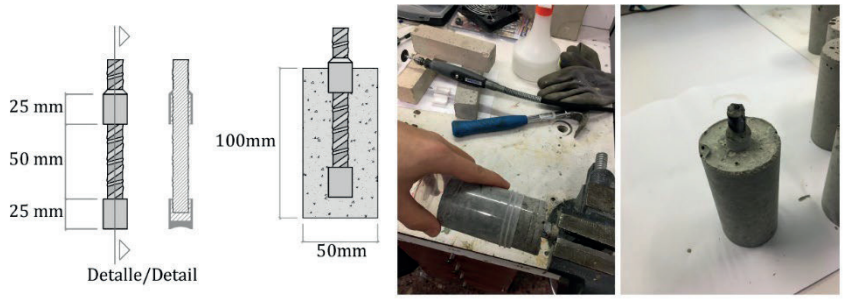


Imagen 2. Descripción de las probetas de estudio Image 2. Description of test specimens

Materiales

Para la fabricación de las probetas se utilizó un mortero de reparación comercial. De las 12 probetas que se fabricaron, 6 muestras fueron preparadas con la dosificación indicada por el fabricante y que se muestra en la Tabla 1 (M). El resto de las probetas (6) fueron fabricadas con el mismo mortero, pero con una dosificación con un incremento de agua del 10% respecto a la necesaria indicada por el fabricante (MW).

Tabla 1 Dosificaciones (por cada 25 kg de mortero de reparación)
Table 1 Mixture proportions of concrete (every 25 kg of mortar)

	M	WM
Mortero de reparación / Repairing mortar (kg)	25	25
Agua / Water (L)	4.50	4.95

Tras la fabricación de las probetas, estas se mantuvieron en los moldes durante 48 horas en condiciones de laboratorio (23±2ºC y Humedad Relativa superior al 60%). Tras este periodo, las muestras fueron desmoldadas y directamente fueron parcialmente sumergidas en agua de mar preparada de acuerdo a la norma ASTM D1141-98:2021 (ASTM International, 2021). Durante más de 200 días las muestras fueron sometidas a ciclos de humectación y secado de 12 horas de duración. En la Imagen 4 se muestran imágenes de este periodo.

This defect was generated by including an element next to the reinforcement which was removed after a few hours, as shown in the pictures of Image 3.



Imagen 3. Detalle de hormigonado Image 3. Casting process detail

Materials

A commercial repair mortar was used for the specimens' manufacture. In all, 12 specimens were prepared: 6 samples were casted using the dosage indicated by the supplier, as shown in Table 1 (M). The other specimens (6) were prepared with the same repair mortar, but with a dosage including 10% more water than the indicated by the mortar supplier (WM).

After specimens were manufactured, they were kept in the moulds for 48 hours under laboratory conditions (23±2ºC and relative humidity above 60%). After this period, the samples were demoulded and directly partially immersed in seawater prepared according to ASTM D1141-98:2021 (ASTM International, 2021). The samples were subjected to 12-hour wetting and drying cycles for more than 200 days. Images of this period are shown in Image 4.

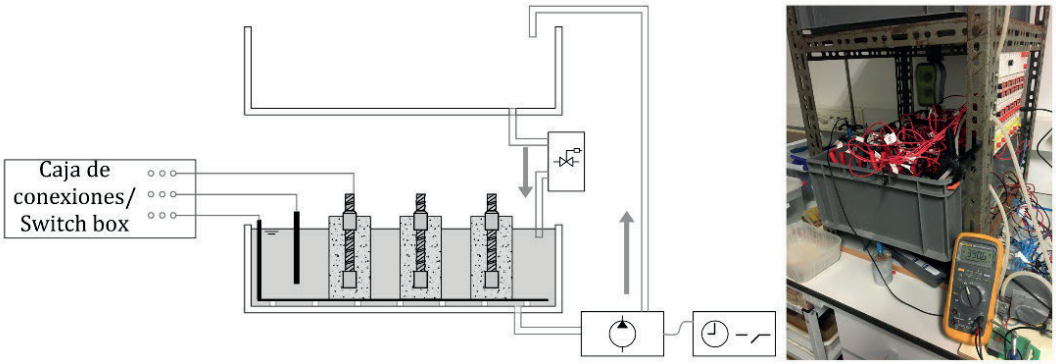


Imagen 4. Condiciones de exposición Image 4. Exposure conditions

During this time, all the specimens were electrically connected to a carbon fibre mesh, which was also partially immersed in the $NaCl$ solution. In this way, a large area of passive reinforcement was simulated. This situation reproduces the reinforcement of real structures: a large passive area and some regions that have been repaired. Corrosion monitoring was carried out throughout the exposure period:

-first, the corrosion potential of each reinforcement was measured by disconnecting the specimen from the system and connecting it to the positive pole of a Fluke 28 II-True-RMS high-impedance resistivity meter. A reference electrode (SCE) partially immersed in the solution was connected to the negative pole. The value considered was the one obtained after 3 minutes from the start of the measurement to ensure the stabilisation of the signal;

Durante este tiempo todas las probetas fueron conectadas a una malla de fibra de carbono también parcialmente sumergida en la disolución. De esta forma se simuló una gran superficie de armadura pasiva, lo que reproduce un caso de estructura reparada en diferentes regiones (en este caso, representado por las probetas). A lo largo del periodo de exposición se realizó la monitorización de la corrosión:

-en primer lugar, se midió el potencial de corrosión de cada armadura desconectando la probeta del sistema y conectándola al polo positivo de un resistivímetro de alta impedancia modelo Fluke 28 II-True-RMS. Al polo negativo se conectó un electrodo de referencia (SCE). El valor considerado fue el obtenido tras 3 minutos desde el inicio de la medida para asegurar la estabilización de la señal;

-en segundo lugar, se analizó la corrosión local utilizando el análisis de la resistencia a la polarización lineal (LPR), método descrito en la norma UNE- UNE 112072:2011 (AENOR, 2011). Al finalizar la medida, la probeta fue conectada de nuevo al sistema.

En la Tabla 2 se muestran el número de probetas y la nomenclatura utilizada en este estudio.

Resultados

En la Imagen 5 se muestran los resultados obtenidos durante el periodo de monitorización, tanto el potencial de corrosión como la intensidad de corrosión. Por un lado, se han señalado en la gráfica los umbrales para establecer el riesgo de corrosión de una barra a partir del potencial de corrosión de acuerdo a la norma UNE 112083:2010 (AENOR, 2011). Por otro lado, se ha señalado también en la segunda gráfica el umbral de 0.1 µA/cm^2 y de 1 µA/cm^2 indicados en bibliografía (Andrade et al., 2004) para considerar una corrosión despreciable o alta, respectivamente.

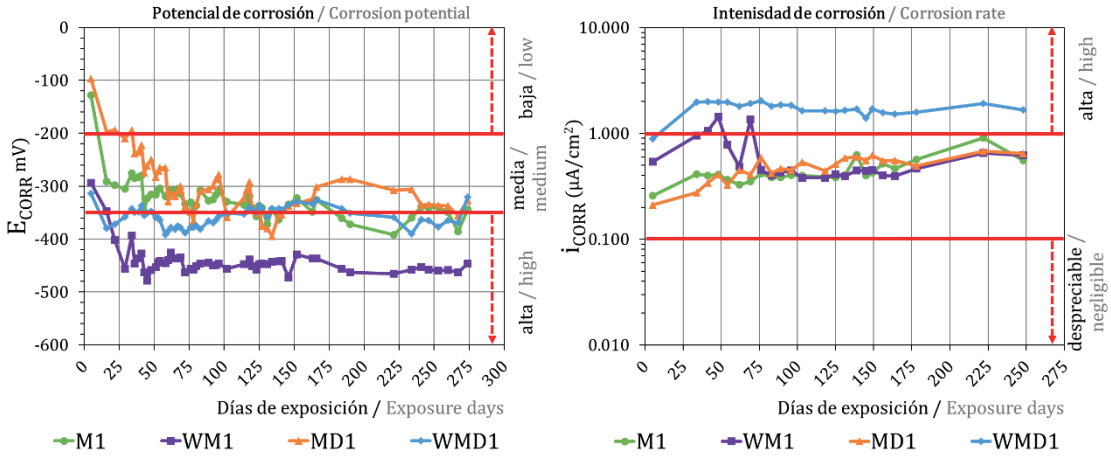


Imagen 5. Resultados obtenidos (E_{CORR} e i_{CORR})

Image 5. Results obtained (E_{CORR} and i_{CORR})

El potencial de corrosión promedio obtenido en cada grupo de probetas demostró que las armaduras estaban en un riesgo medio-alto de estar bajo procesos de corrosión activa. Sin embargo, los datos obtenidos durante la monitorización de la corrosión indicaron que solo el grupo de probetas WMD1 alcanzó niveles de corrosión alto, alcanzando valores próximos a 2 µA/cm^2. Por otro lado, el resto de las muestras mantuvieron niveles de corrosión por debajo de 1 µA/cm^2.

Sin embargo, a pesar de que estos datos ya demuestran la influencia de una dosificación incorrecta y defectos en el hormigonado, el estudio del daño acumulado es la única herramienta capaz de cuantificar realmente en qué medida afecta a las armaduras una reparación mal ejecutada. Para ello, a partir de los datos obtenidos de intensidad de corrosión durante el proceso de monitorización, se realizó una estimación de la pérdida de masa acumulada (Δm) de cada armadura según la Ley de Faraday (Ecuación 1) de acuerdo con:

$$\Delta m = \frac{M}{n \cdot F} \cdot \int_{t_0}^{t} i_{CORR} \cdot dt \qquad [1]$$

-secondly, local corrosion of each rebar was analysed using the linear polarisation resistance (LPR), a method described in Standard UNE-UNE 112072:2011 (AENOR, 2011). At the end of the analysis, the specimen was reconnected to the system.

Table 2 shows the number of specimens and the naming used in this study.

Tabla 2 Probetas utilizadas
Table 2 Test specimens used

Grupo / Group	Probetas / Samples
M1-Dosificación según fabricante / Dosage prepared according mortar supplier	3
WM1-Inclusión 10% más de agua en dosificación / Dosage prepared including 10% more water	3
MD1-Dosificación según fabricante, defecto durante hormigonado / Dosage prepared according mortar supplier, void near rebar	3
WMD1-Inclusión 10% más de agua en dosificación, defecto durante el hormigonado / Dosage prepared including 10% more water, void near rebar	3

Results

Image 5 shows the results obtained during the monitoring period, both the corrosion potential and the corrosion rate. On the one hand, the graph shows the thresholds for establishing the corrosion risk of rebars based on the corrosion potential in accordance with Standard UNE 112083:2010 (AENOR, 2011). On the other hand, the 0.1 μA/cm^2 and 1 μA/cm^2 thresholds indicated in the literature (Andrade et al., 2004) for considering corrosion to be negligible or high, respectively, have also been indicated in the second graph.

The average corrosion potential obtained for each studied group showed that the rebars were at medium-high risk of being under active corrosion processes. However, the data obtained during corrosion monitoring indicated that only the WMD1 group reached high corrosion levels (values close to 2 μA/cm^2). On the other hand, the other groups kept corrosion levels below 1 μA/cm^2.

However, although these data already prove the influence of poor dosages or voids next to the rebars, the study of accumulated damage is the only tool capable of really quantifying the influence in corrosion damage of repair procedure. To this end, based on the corrosion intensity data obtained during the monitoring process, the accumulated mass loss (Δm) of each reinforcement was estimated according to Faraday's Law (Equation 1) in accordance with:

$$\Delta m = \frac{M}{n \cdot F} \cdot \int_{t_0}^{t} i_{CORR} \cdot dt \qquad [1]$$

where M is the atomic mass of the steel (55.845 g/mol), t is the elapsed time in seconds, n is the number of electrons released or acquired in the process, which in this case is 2, and F is the Faraday's constant (96854 C/mol). The mass loss value (Δm) was obtained in mg/cm^2, so it was normalised by the reinforcement surface in contact with concrete (1571 mm^2). The data obtained are shown in Image 6.

The data presented in the Image 6 allow to see the influence of poor dosage or problems when backfilling the patch repairs. The mass loss of the reference group (M1), where the dosage was prepared according to the supplier and no defects were generated close to the reinforcement, was 47.8 mg. This value is like the mass loss of the MD1 group (48.2 mg), which shows that an adequate dosage can avoid problems, even when air voids are existing. The group in which the dosage was not adequate (WM1) because 10% more water than necessary was included, the mass loss was 57.1 mg, 8% more than the reference group. However, the cumulative mass loss in the WMD1 samples was 163.7 mg, more than three times that of the M1 group. In this case, inadequate dosage was compounded by the presence of defects and air voids next to the rebars. These two factors generate a much higher corrosion damage in a very short period of time (250 days).

donde M es la masa atómica del acero (55.845 g/mol), t es el tiempo transcurrido en segundos, n es el número de electrones liberados o adquiridos en le proceso, que en este caso es 2, y F es la constante de Faraday (96854 C/mol). El valor obtenido de pérdida de masa (Δm) fue obtenido en mg/cm^2, por lo que fue normalizado por la superficie de armadura en contacto con hormigón (1571 mm^2). Los datos obtenidos se muestran en la Imagen 6.

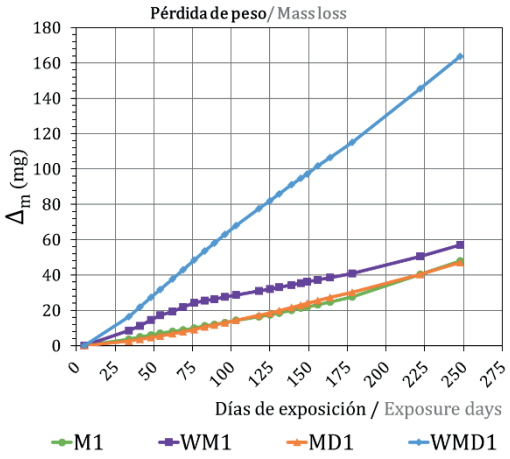


Imagen 6. Resultados obtenidos (Δ_m) Image 6. Results obtained (Δ_m)

Los datos presentados en la gráfica de la Imagen 6 sí que permiten cuantificar con precisión la influencia de los errores en dosificación y hormigonado. La pérdida de masa del grupo de referencia (M1), donde la dosificación fue preparada según fabricante y no se generaron defectos próximos a la armadura fue de 47.8 mg. Este valor es similar a la pérdida de masa del grupo MD1 (48.2 mg), lo que demuestra que una dosificación adecuada puede evitar problemas de hormigonado. El grupo en el que la dosificación no fue adecuada (WM1) porque se incluyó un 10% más de agua de la necesaria, la pérdida de masa fue de 57.1 mg, un 8% más del grupo de referencia. Sin embargo, la pérdida acumulada en las muestras WMD1 fue de 163.7 mg, más del triple que el grupo M1. En este caso, a una dosificación inadecuada se sumó la presencia de defectos en el hormigonado, generándose oquedades próximas a las armaduras. Estos dos factores generan que la corrosión y el daño acumulado por este fenómeno sea mucho mayor en un periodo de tiempo muy corto (250 días).

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

-las reparaciones en estructuras de hormigón armado requieren de un procedimiento adecuado. Cuando se incluye en el amasado más agua de la necesaria, o el hormigonado no se realiza correctamente (se generan vacíos y oquedades), los daños por corrosión aparecen rápidamente;

-en este trabajo, se estimó que ambos factores pueden suponer un daño por corrosión tres veces mayor que si se realiza una reparación adecuada.

En una segunda parte de este estudio, se discute también la influencia de incluir en el método de trabajo el cepillado y limpieza de las armaduras, que en los ejemplos presentados en este trabajo no se realizó.

Conclusions

The following conclusions can be drawn from the results obtained:

-repairs in reinforced concrete structures require a proper procedure. When dosage is prepared including more water than necessary or when backfilling the patch repairs is not appropriate (voids next to the rebar appear), corrosion damage appears quickly;

-in this work, it was estimated that both of these factors can lead to three times more corrosion damage than if a proper repair is carried out.

In a second part of this study, the influence of brushing and cleaning the rebar is studied.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- AENOR. (2011). *UNE 112072 Determinación de la velocidad de corrosión de armaduras en laboratorio mediante medida de la resistencia a la polarización*.
- Alhozaimy, A., Hussain, R. R., & Al-Negheimish, A. (2016). Significance of oxygen concentration on the quality of passive film formation for steel reinforced concrete structures during the initial curing of concrete. *Cement and Concrete Composites*, *65*, 171–176. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.022
- Andrade, C., Alonso, C., Gulikers, J., Polder, R., Cigna, R., Vennesland, Salta, M., Raharinaivo, A., & Elsener, B. (2004). RILEM TC 154-EMC: "Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion". Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *37*(273), 623–643. https://doi.org/10.1617/13952
- ANFAPA. (2016). *Morteros reparación hormigón - Sistemas y productos de reparación estructural - EN 1504-3*. ANFAPA: Asociación de Fabricantes de Morteros y SATE. https://anfapa.com/morteros-de-reparacion-de-hormigon/aplicacion-en-1504-3
- Angst, U. M., Geiker, M. R., Michel, A., Gehlen, C., Wong, H., Isgor, O. B., Elsener, B., Hansson, C. M., François, R., Hornbostel, K., Polder, R., Alonso, M. C., Sanchez, M., Correia, M. J., Criado, M., Sagüés, A., & Buenfeld, N. (2017). The steel–concrete interface. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *50*(2). https://doi.org/10.1617/s11527-017-1010-1
- ASTM International. (2021). D1141-98 (2021) Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water. In *ASTM International*.
- Goyal, A., Pouya, H. S., Ganjian, E., & Claisse, P. (2018). A Review of Corrosion and Protection of Steel in Concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *43*(10), 5035–5055. https://doi.org/10.1007/s13369-018-3303-2
- Qian, S., Zhang, J., & Qu, D. (2006). Theoretical and experimental study of microcell and macrocell corrosion in patch repairs of concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, *28*, 685–695. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.05.010
- Raupach, M. (2006). Patch repairs on reinforced concrete structures – Model investigations on the required size and practical consequences. *Cement and Concrete Composites*, *28*(3), 679–684. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.05.016
- Soleimani, S., Ghods, P., Isgor, O. B., & Zhang, J. (2010). Modeling the kinetics of corrosion in concrete patch repairs and identification of governing parameters. *Cement and Concrete Composites*, *32*(5), 360–368. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.02.001
- Song, H. W., & Saraswathy, V. (2007). Corrosion monitoring of reinforced concrete structures - A review. *International Journal of Electrochemical Science*, *2*(1), 1–28.
- Su, N., Lou, L., Amirkhanian, A., Amirkhanian, S. N., & Xiao, F. (2021). Assessment of effective patching material for concrete bridge deck -A review. *Construction and Building Materials*, *293*, 123520. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123520

ANÁLISIS DE LA EFECTIVIDAD DE LAS REPARACIONES MEDIANTE PARCHEADO EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO. PARTE 2: MORTERO DE PASIVACIÓN

ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF PATCH REPAIRS IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES. PART 2: PASSIVATING MORTAR

Josep Ramon Lliso-Ferrando
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Isabel Gasch Molina
Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: igasch@mes.upv.es
Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: igasch@mes.upv.es
Ana Martínez-Ibernón
Investigadora en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigadora en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: anmarib@arqt.upv.es
José Manuel Gandía-Romero
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València. Investigador en el Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: joganro@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. Researcher in the Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM), Universitat Politècnica de València. E-mail: joganro@csa.upv.es
Manuel Valcuende Payá
Investigador en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València. E-mail: mvalcuen@csa.upv.es

Abstract

In the first part of this study, the results that were presented proved patch repairs require an appropriate dosage and the backfill must be adequate. Air voids must be prevented. These spaces generate air chambers that become saturated. This fact promotes increase of corrosion damage in repaired areas, requiring further repairs. To prevent it, it is advisable to apply protections to the rebars in the repaired areas (passivating mortars). This cement-based mortar enhanced with silica fume is used as passivating and bonding layer. In this work, an analysis is presented in which the effectiveness of applying passivating mortar in a case of repaired reinforced concrete structure is studied. For this purpose, corroded reinforcements were prepared and embedded in a commercial repair mortar manufactured with two dosages, one as described by the supplier and the other one including 10% more water than necessary. For 250 days, the specimens were subjected to wetting-drying cycles (every 12 hours). Throughout this period, corrosion monitoring was carried out and the accumulated damage was analysed by studying the mass loss. Subsequently, the rebars were subjected to visual inspection. All the results obtained were also compared with the variables studied in part 1 of this study. The results showed that the use of the passivating mortar can mitigate corrosion damage by almost 50%, even under the most unfavourable conditions.

Keywords
Reinforced concrete structures, Durability, Corrosion, Patch repairs

Introducción

Las reparaciones en las estructuras de hormigón armado a casusa de daños por corrosión implican tareas que requieren una ejecución adecuada (Su et al., 2021). En caso de no realizarse de manera apropiada, rápidamente aparecen daños de nuevo en la zona reparada, lo que obliga a acometer nuevas reparaciones, con el incremento de costes y utilización de recursos que ello conlleva.(Ribeiro et al., 2013).

En la Parte 1 de este trabajo ya se demostró la influencia de llevar a cabo trabajos en el que hormigonado con el mortero de reparación no se realiza de manera adecuada. Los resultados obtenidos probaron que una reparación inadecuada multiplica por tres el daño por corrosión en muy poco tiempo (menos de 250 días).

En ese caso, los huecos o vacíos que se generan permanecen secos durante una primera etapa. Sin embargo, tal y como han demostrado autores previamente, estas cámaras se colmatan poco a poco con la humedad del entorno, lo que sitúa a las armaduras un caso similar al de estar directamente en disolución (Angst et al., 2017). En este caso, los procesos de corrosión se desarrollan más rápidamente, tal y como se ha demostrado en trabajos previos (Lliso-Ferrando, 2022).

Estos orificios se producen por un mal hormigonado, pero también están condicionados por problemas de accesibilidad o que la armadura no ha sido descubierta totalmente, tal y como se muestra en los diferentes ejemplos de la Imagen 1 e Imagen 2.



Imagen 1. Diferentes ejemplos de reparación mediante parcheado en estructura de hormigón armado

Image 1. Patch repairs in reinforced concrete structures. Examples

Para aliviar el daño por la presencia de oquedades, algunas recomendaciones indican la idoneidad de utilizar morteros de pasivación, como la UNE-EN 1504-7:2007 (AENOR, 2007). En este caso, se trata de un producto a base de cemento, monocomponente, pero mejorado con resina sintética y humo de sílice. Además de actuar como pasivador, funciona como capa de adherencia.

A partir de lo comentado anteriormente, el objetivo de este trabajo fue demostrar la influencia de utilizar un mortero de pasivación comercial en reparaciones de estructuras de hormigón armado afectadas por procesos de corrosión mal ejecutadas. Para ello, armaduras corroídas previamente mediante la utilización de corriente impresa fueron embebidas en un mortero de reparación comercial preparado con diferentes dosificaciones, una según indica el fabricante y otra incluyendo un 10% más de agua de la necesaria. Además, algunas muestras fueron hormigonadas dejando oquedades en el entorno de la armadura, para simular un relleno inadecuado. Una vez fabricadas todas las probetas, estas fueron sumergidas en agua de mar y sometidas a ciclos de humectación y secado cada 12 horas. Durante 250 días se mantuvieron estas condiciones de exposición. A lo largo de este periodo se realizó la monitorización de la corrosión, un estudio del daño acumulado y, al finalizar, las armaduras fueron sometidas a inspección visual.

Introduction

Repairs of reinforced concrete structures affected by corrosion phenomena involve tasks that require proper execution (Su et al., 2021). If not carried out properly, repaired areas can be affected by corrosion processes again quickly, forcing further repairs, with the associated costs and use of resources involved (Ribeiro et al., 2013).

In Part 1 of this work, the influence of poor dosage and inadequate backfill with repair mortar was already proved. The results obtained showed that mistakes when performing patch repairs triple the corrosion damage in a very short time (less than 250 days).

When backfill is not appropriate, first air voids generated remain dry. However, as reported by previous authors, these chambers gradually become saturated due to the existing moisture, which places the rebar in a similar case to that of being directly submerged in solution conditions (Angst et al., 2017). In this case, corrosion processes develop rapidly, as has been shown in previous works (Lliso-Ferrando, 2022).

These holes are caused by poor concreting, but are also caused by accessibility problems or that the reinforcement has not been fully uncovered, as shown in the various examples in Image 1 and Image 2.

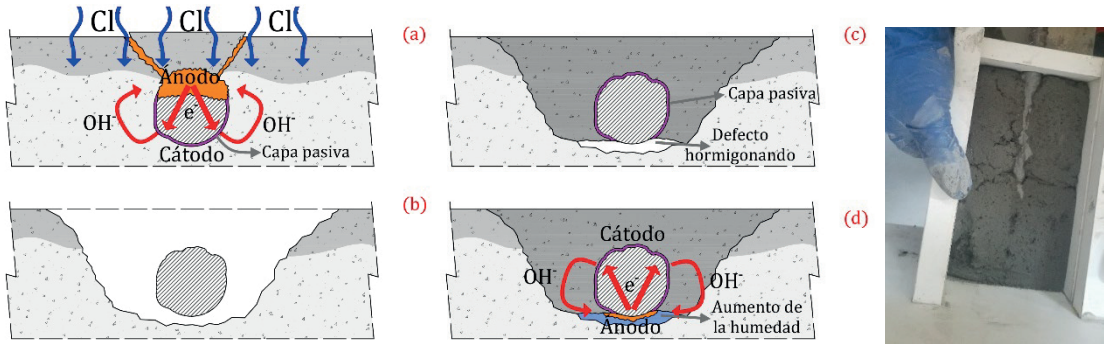


Imagen 2. Defecto en el hormigonado durante reparación Image 2. Patch repairs mistake

To mitigate damage due to the presence of voids and defects in concrete cover, some recommendations indicate the suitability of using passivating mortars, such as UNE-EN 1504-7:2007 (AENOR, 2007). In this case, this is a cement-based, single-component product, but improved with synthetic resin and silica fume. In addition to acting as a passivator, it functions improving the bond between concrete and steel.

Based on the above information, the aim of this work was to prove the influence of using a commercial passivating mortar in reinforced concrete structures affected by corrosion processes which have been poorly repaired. For this purpose, reinforcements previously corroded by using impressed current were embedded in a commercial repair mortar prepared with different dosages, one according to the manufacturer's instructions and the other one including 10% more water than necessary. In addition, some specimens were casted generating voids next to the rebar to simulate inadequate backfilling. Once all the specimens had been manufactured, they were immersed in seawater and subjected to wetting and drying cycles every 12 hours. These exposure conditions were maintained for 250 days. Throughout this period, corrosion monitoring and a study of the accumulated damage was carried out and, at the end of this period, the reinforcements were subjected to visual inspection.

Experimental plan

Test specimens

To carry out this study, cylindrical specimens (Ø50 mm, height 100 mm) were manufactured (depicted in Image 3). This reinforcement was partially protected with PVC pipe and epoxy painting. The surface area in contact with concrete was limited to 5 linear cm (1571 mm2).

Plan Experimental

Probetas

Para llevar a cabo el estudio se fabricaron probetas cilíndricas (Ø50 mm, altura 100 mm) como las que se describen en la Imagen 3. En el eje central de cada muestra se embebió una armadura. Esta armadura fue protegida parcialmente con tubería de PVC rellena de epoxi limitando la superficie de metal en contacto con el hormigón a 5 cm lineales (1571 mm^2). Estas armaduras fueron corroídas previamente mediante la utilización de corriente impresa hasta alcanzar una pérdida de masa de un 6%. Antes de ser embebidas, las armaduras no fueron cepilladas ni sometidas a ningún tratamiento de limpieza, sino que sobre su superficie se aplicó una capa de mortero de pasivación comercial, preparado de acuerdo con las indicaciones del suministrador. Tras dos horas, y con el mortero en estado mordiente, se fabricaron 12 probetas con estas armaduras. Del total de probetas, 6 muestras fueron preparadas asegurando un recubrimiento adecuado de la barra. Sin embargo, 6 probetas fueron preparadas generando un defecto en el recubrimiento. Este defecto se generó incluyendo un elemento junto a la armadura que fue retirado a las pocas horas, tal y como se mostraba en la primera parte de este trabajo.

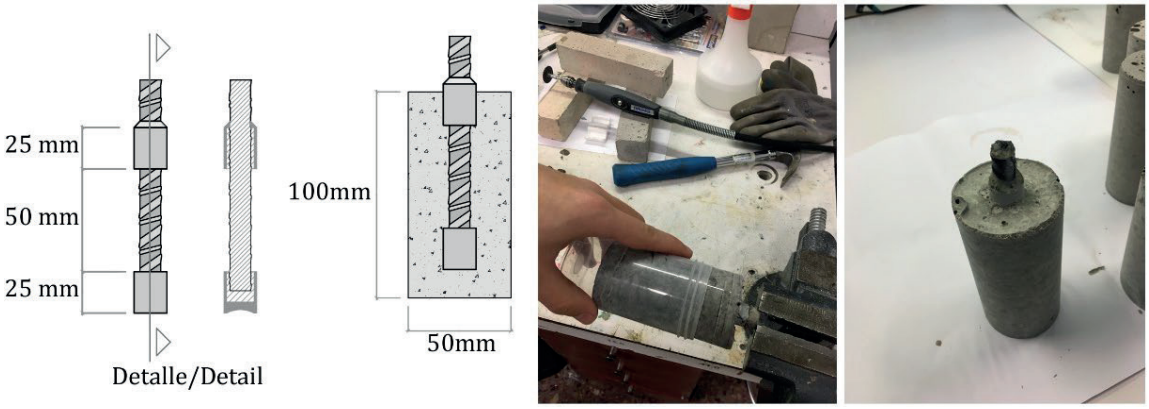


Imagen 3. Descripción de las probetas de estudio Image 3. Description of test specimens

Materiales

Para la fabricación de las probetas se utilizó un mortero de reparación comercial. De las 12 probetas que se fabricaron, 6 muestras fueron preparadas con la dosificación indicada por el fabricante y que se muestra en la Tabla 1 (PM). El resto de las probetas (6) fueron fabricadas con el mismo mortero, pero con una dosificación con un incremento de agua del 10% respecto a la necesaria indicada por el fabricante (PMW).

Tabla 1 Dosificaciones (por cada 25 kg de mortero de reparación)
Table 1 Mixture proportions of concrete (every 25 kg of mortar)

	PM	PWM
Mortero de reparación / Repairing mortar (kg)	25	25
Agua / Water (L)	4.50	4.95

Tras la fabricación de las probetas, estas se mantuvieron en los moldes durante 48 horas en condiciones de laboratorio (23±2ºC y Humedad Relativa superior al 60%). Tras este periodo, las muestras fueron desmoldadas y directamente fueron parcialmente sumergidas en agua de mar preparada de acuerdo a la norma ASTM D1141-98(2021) (ASTM International, 2021). Durante más de 200 días las muestras fueron sometidas a ciclos de humectación y secado de 12 horas de duración. Para ello, se preparó un sistema de bombeo de agua.

These rebars were previously corroded by means of impressed current until a mass loss of 6% was reached. Before embedding, the rebars were neither brushed nor subjected to any cleaning treatment, but a layer of commercially available passivating mortar, prepared according to the supplier's instructions, was applied to their surface. After two hours, and with the mortar in fresh conditions, 12 specimens were manufactured with these reinforcements. Of all these samples, 6 specimens were prepared ensuring an appropriate cover of the bar (preventing air voids). However, 6 specimens were prepared generating this defect next to the rebar. This was generated including an element next to the reinforcement which was removed after a few hours, as shown in the first part of this work.

Materials

A commercial repairing mortar was used for the manufacture of the specimens. Of the 12 specimens manufactured, 6 samples were prepared with the dosage indicated by the mortar supplier and shown in Table 1 (PM). The other specimens (6) were manufactured with the same mortar but including 10% more water with respect to the necessary one indicated by the manufacturer (PMW).

After casting process, test specimens were kept in the moulds for 48 hours under laboratory conditions (23±2ºC and Relative Humidity above 60%). After this period, the samples were demoulded and partially immersed in seawater prepared according to ASTM D1141-98(2021) (ASTM International, 2021). The samples were subjected to 12-hour wetting and drying cycles for more than 200 days. For this purpose, a water pumping system was prepared.

During this time all the specimens were electrically connected to a carbon fibre mesh, which was also partially immersed in the $NaCl$ solution. In this way, a large area of passive reinforcement was simulated. This situation reproduces the reinforcement of real structures: a large passive area and some regions that have been repaired. Corrosion monitoring was carried out throughout the exposure period:

-first, the corrosion potential of each reinforcement was measured by disconnecting the specimen from the system and connecting it to the positive pole of a Fluke 28 II-True-RMS high-impedance resistivity meter. A reference electrode (SCE) partially immersed in the solution was connected to the negative pole. The value considered was the one obtained after 3 minutes from the start of the measurement to ensure the stabilisation of the signal;

-secondly, local corrosion of each rebar was analysed using the linear polarisation resistance (LPR), a method described in Standard UNE-UNE 112072:2011 (AENOR, 2011). At the end of the anaysis, the specimen was reconnected to the system.

Table 2 shows the number of specimens and the naming used in this study.

Tabla 2 Probetas utilizadas
Table 2 Test specimens used

Grupo / Group	Probetas / Samples
PM1-Pasivador sobre armadura y dosificación según fabricante / Passivating layer and dosaje prepared according mortar supplier	3
PWM1-Pasivador sobre armadura y dosificación con inclusión de 10% más de agua / Passivating layer and dosage prepared including 10% more water	3
PMD1- Pasivador sobre armadura y dosificación según fabricante, defecto durante hormigonado / Passivating layer and dosaje prepared according mortar supplier, void near rebar	3
PWMD1- Pasivador sobre armadura y dosificación y dosificación con inclusión 10% más de agua Passivating layer and dosage prepared including 10% more water, void near rebar	3

Durante este tiempo todas las probetas fueron conectadas a una malla de fibra de carbono también parcialmente sumergida en la disolución. De esta forma se simuló una gran superficie de armadura pasiva, lo que reproduce un caso de estructura reparada en diferentes regiones (en este caso, representado por las probetas). A lo largo del periodo de exposición se realizó la monitorización de la corrosión:

-en primer lugar, se midió el potencial de corrosión de cada armadura desconectando la probeta del sistema y conectándola al polo positivo de un resistivímetro de alta impedancia modelo Fluke 28 II-True-RMS. Al polo negativo se conectó un electrodo de referencia (SCE). El valor considerado fue el obtenido tras 3 minutos desde el inicio de la medida para asegurar la estabilización de la señal;

-en segundo lugar, se analizó la corrosión local utilizando el análisis de la resistencia a la polarización lineal (LPR), método descrito en la norma UNE- UNE 112072:2011 (AENOR, 2011). Al finalizar la medida, la probeta fue conectada de nuevo al sistema.

En la Tabla 2 se muestran el número de probetas y la nomenclatura utilizada en este estudio.

Resultados

En la Imagen 4 se muestran los resultados obtenidos durante el periodo de monitorización, tanto el potencial de corrosión como la intensidad de corrosión. Por un lado, se han señalado en la gráfica los umbrales para establecer el riesgo de corrosión de una barra a partir del potencial de corrosión de acuerdo a la norma UNE 112083:2010 (AENOR, 2010). Por otro lado, se ha señalado también en la segunda gráfica el umbral de 0.1 µA/cm^2 y de 1 µA/cm^2 indicados en bibliografía (Andrade et al., 2004) para considerar una corrosión despreciable o alta, respectivamente.

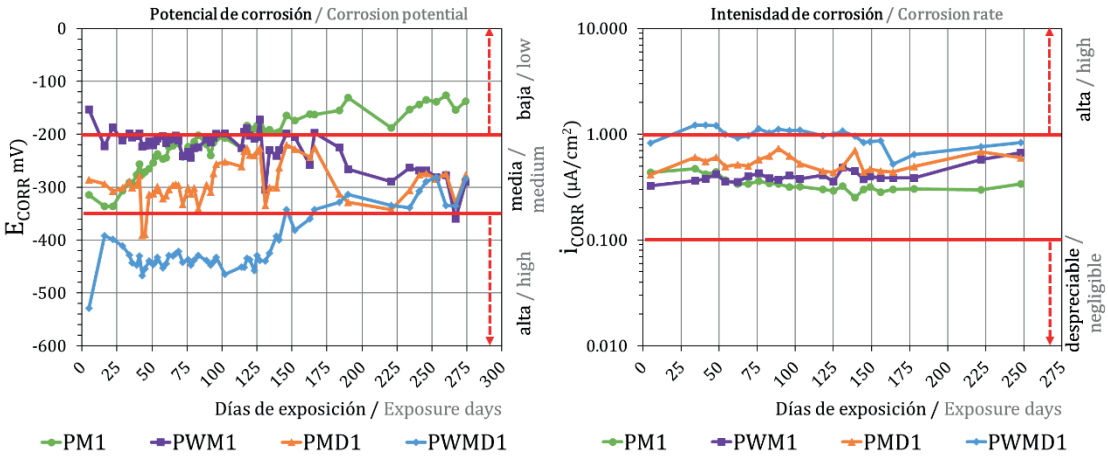


Imagen 4. Resultados obtenidos (E_{CORR} e i_{CORR})

Image 4. Results obtained (E_{CORR} and i_{CORR})

Como se puede apreciar, los potenciales de corrosión indican un riesgo medio-bajo de que existan procesos de corrosión activa. Por otro lado, en todos los casos la corrosión se mantuvo por debajo del umbral para considerar una intensidad alta. Para comparar los resultados, igual que en la primera parte del trabajo, se calculó la pérdida de masa acumulada, y se comparó también con los datos del primer estudio (Imagen 5). Además, en la Tabla 3 se indica la pérdida de masa promedio estimada para cada grupo de probetas.

Tabla 3 Pérdida de masa (mg) acumulada por cada grupo de estudio

Table 3 Accumulated mass loss (mg) according to each studied group

Grupo / Group	M1	WM1	MD1	WMD1	PM1	PMD1	PWM1	PWMD1
Pérdida masa / Mass loss	47.85	57.00	47.08	163.75	32.39	40.92	52.54	86.83

Results

Image 4 shows the results obtained during the monitoring period, both the corrosion potential and the corrosion rate. On the one hand, the graph shows the thresholds for establishing the corrosion risk of rebars based on the corrosion potential in accordance with Standard UNE 112083:2010 standard (AENOR, 2011). On the other hand, the 0.1 µA/cm^2 and 1 µA/cm^2 thresholds indicated in the literature (Andrade et al., 2004) for considering corrosion to be negligible or high, respectively, have also been indicated in the second graph.

As can be seen, the corrosion potentials indicate a medium-low risk of active corrosion processes. On the other hand, in all cases, the corrosion rate obtained remained below the threshold for consider high corrosion intensity. To compare the results, as in the first part of the work, the accumulated mass loss was estimated and compared with the data from the first study (Image 5). In addition, the average mass loss obtained for each group is shown in Table 3.

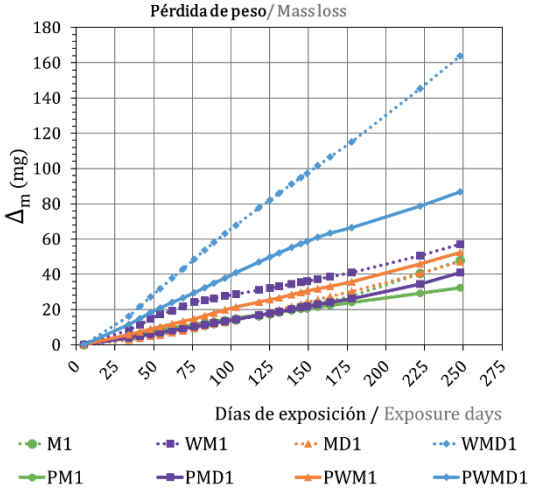


Imagen 5. Resultados obtenidos (Δ_m) Image 5. Results obtained (Δ_m)

The obtained results proved the differences when patch repairs are performed accurately or not. When passivating mortar is used, the results are good, since even with air voids in concrete cover or poor dosages (PWMD1). The accumulated mass loss was practically half that without the passivating mortar (WMD1). In addition, the passivating mortar has been shown to improve protection by 30-40% compared to specimens with identical conditions but without including the passivating layer

These data process the suitability of incorporating a passivating mortar layer prior to backfilling. This layer protects the reinforcement and reduces corrosion damage after repairs.

Images 6 and 7 show some pictures of the rebars' visual inspection at the end of the monitoring period. These images prove the difference in damage in each case.

Conclusions

The following conclusions can be drawn from the results obtained:

-repairs on reinforced concrete structures require a proper procedure. The use of passivating mortars is a very suitable complement, as they mitigate corrosion damage by 30% to 40%.

-in the most unfavourable case of this study, where the prepared dosage was inadequate and there were air voids next to the rebar, the passivating mortar mitigated corrosion damage by almost 50%.

In a third part of this study, the results will be compared with samples where the reinforcement was also brushed prior to the application of the passivating mortar.

Los resultados obtenidos demuestran las diferencias que implica el método de reparación empleado. La utilización de pasivador protegiendo las armaduras ha demostrado ser de gran utilidad, ya que incluso con defectos en el recubrimiento y con una mala dosificación (PWMD1), la pérdida de masa es prácticamente la mitad que sin el pasivador (WMD1). Además, el pasivador ha demostrado mejorar la protección entre un 30% y 40% frente a probetas con idénticas condiciones, pero sin emplear pasivador en la reparación.

Estos datos demuestran la idoneidad de incorporar una capa de mortero de pasivación previamente al rellenado. Esta capa protege las armaduras y reduce el daño por corrosión tras una reparación.

En las Imágenes 6 y 7 se muestran algunas fotografías de la inspección visual de las armaduras al final del periodo de monitorización que demuestran la diferencia de daños en cada caso.

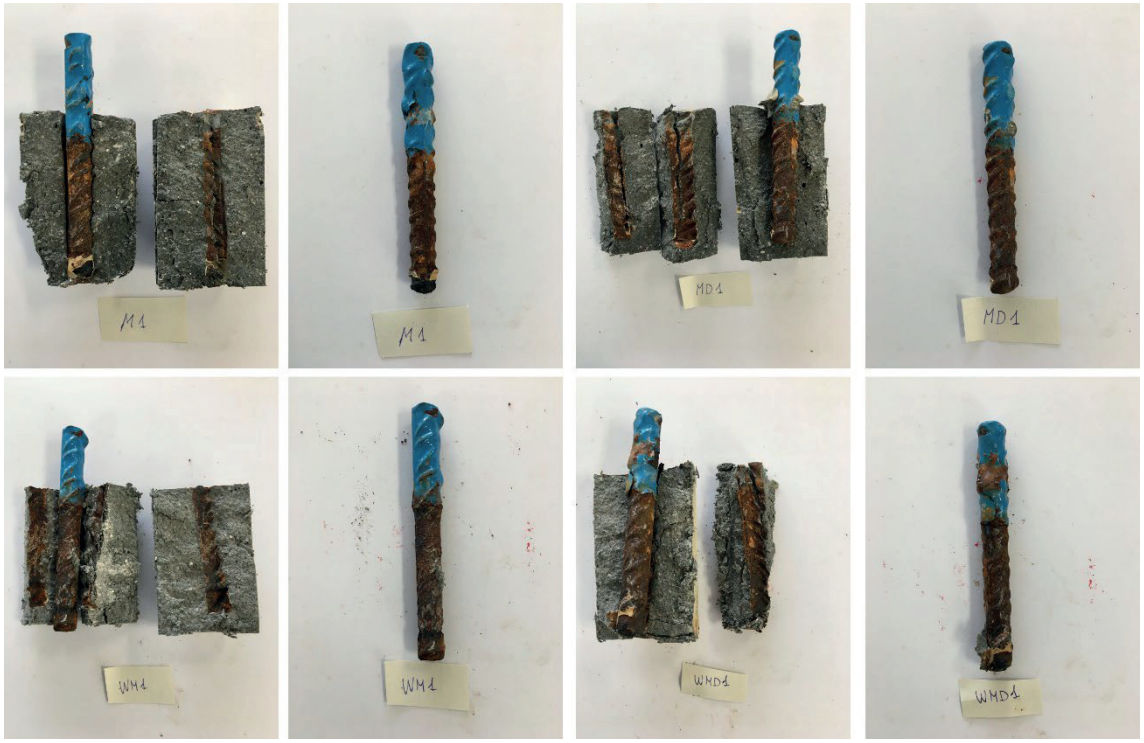


Imagen 6. Inspección visual de las armadudas Image 6. Rebars' visual inspection

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

-las reparaciones en estructuras de hormigón armado requieren de un procedimiento adecuado. La utilización de morteros de pasivación son un complemento muy adecuado, ya que mitigan el daño por corrosión entre un 30% y 40%.

-además, la utilización del pasivador permite aliviar el daño por un hormigonado inadecuado En el caso más desfavorable de este estudio, donde la dosificación preparada era inadecuada y existían vacíos próximos a la barra, el mortero de pasivación mitigó el daño por corrosión en casi un 50%.

En una tercera parte de este estudio se compararán los resultados con muestras donde también se realizó un cepillado de las armaduras, previamente a aplicar el mortero de pasivación.



Imagen 7. Inspección visual de las armadudas Image 7. Rebars' visual inspection

AGRADECIMIENTOS/ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the Spanish Government for Grant PID2020-119744RB-C21 funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033, and the support of the Universitat Politècnica de València. They are also grateful for the predoctoral scholarship granted to Josep Ramon Lliso Ferrando as part of the "Formación de Personal Investigador" programme from the Universitat Politècnica de València (FPI-UPV-2018).

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- AENOR. (2010). *UNE 112083 Medición del potencial de corrosión libre en estructuras de hormigón armado*.
- AENOR. (2011). *UNE 112072 Determinación de la velocidad de corrosión de armaduras en laboratorio mediante medida de la resistencia a la polarización*.
- Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Definiciones, requisitos, control de calidad y evaluación de la conformidad. Parte 7: Protección contra la corrosión de armaduras., (2007).
- Andrade, C., Alonso, C., Gulikers, J., Polder, R., Cigna, R., Vennesland, Salta, M., Raharinaivo, A., & Elsener, B. (2004). RILEM TC 154-EMC: "Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion". Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *37*(273), 623–643. https://doi.org/10.1617/13952
- Angst, U. M., Geiker, M. R., Michel, A., Gehlen, C., Wong, H., Isgor, O. B., Elsener, B., Hansson, C. M., François, R., Hornbostel, K., Polder, R., Alonso, M. C., Sanchez, M., Correia, M. J., Criado, M., Sagüés, A., & Buenfeld, N. (2017). The steel–concrete interface. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *50*(2). https://doi.org/10.1617/s11527-017-1010-1
- ASTM International. (2021). D1141-98 (2021) Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water. In *ASTM International*.
- Lliso-Ferrando, J. R. (2022). *Monitorizacion de la durabilidad de estructuras existentes de hormigon armado mediante la inserción de una red de sensores*. Universitat Politècnica de València.
- Ribeiro, J. L. S., Panossian, Z., & Selmo, S. M. S. (2013). Proposed criterion to assess the electrochemical behavior of carbon steel reinforcements under corrosion in carbonated concrete structures after patch repairs. *Construction and Building Materials*, *40*, 40–49. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.097
- Su, N., Lou, L., Amirkhanian, A., Amirkhanian, S. N., & Xiao, F. (2021). Assessment of effective patching material for concrete bridge deck -A review. *Construction and Building Materials*, *293*, 123520. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123520

VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN TRAS LA APLICACIÓN DE CARGAS CÍCLICAS EN HORMIGÓN ARMADO

VARIATION IN CORROSION RATE AFTER THE APPLICATION OF CYCLIC LOADS IN REINFORCED CONCRETE

Pablo Monzón Bello
Investigador en el Dpto. Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València; Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Profesor de Universidad, Arquitecto técnico, Doctor por la UPV. E-mail: pabmonb1@csa.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València; Building Engineer, Building Engineer, PhD by the UPV. E-mail: UPV. E-mail: pabmonb1@csa.upv.es

Ana Martínez Ibernón
Investigadora en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Profesor Contratado Doctor, Arquitecto técnico, Doctora por la UPV. E-mail: anmarib@edificacion.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València, Assistant Professor,Building Engineer, PhD by the UPV. E-mail: anmarib@edificacion.upv.es

Josep Ramon Lliso Ferrando
Investigador en el Dpto. Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València; Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Profesor Titular de Universidad, Doctor por la UPV. E-mail: jollife2@alumni.upv.es
Researcher in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València, Senior Lecturer, PhD by the UPV. E-mail: jollife2@alumni.upv.es

Roberto Vengut Tro
Investigador en el Instituto de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM); Universitat Politècnica de València; Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. E-mail: roventr@etsid.upv.es
Researcher in the Interuniversity Research Institute for Molecular Recognition and Technological Development (IDM); Universitat Politècnica de València. E-mail: roventr@etsid.upv.es

Abstract

The mechanical stresses that affect a reinforced concrete structure throughout its useful life can influence the corrosion kinetics of the steel reinforcement, as well as the corrosion inhibitory capacity of the monolayers that may have been incorporated into the structure bar-concrete system in its manufacturing. It is interesting to know the evolution over time of the inhibitory capacity of the monolayers after the action of mechanical tests that can modify them superficially, since this will have an influence on the durability of the structural material. The objective of this research is twofold, on the one hand, to obtain data on the corrosion behavior of steel reinforcements that are subjected to pull-out tests (1.000 load-discharge cycles), and to carry out the same study, when bars are incorporated in which a corrosion-inhibiting monolayer has previously been generated using an organic compound (amino acid) and a natural fixation procedure (without any external modification of the chemical adhesion process that causes the attraction of opposite charges).

Keywords
Pull-out test, reinforced concrete, corrosion inhibitors, corrosion rate.

Introducción

El deterioro de las estructuras de hormigón armado motivado por los efectos que produce la corrosión de las armaduras de acero es uno de los más frecuente en este tipo de estructuras, ocasionando, desde fisuras o grietas por la expansión de los productos de corrosión que se producen en la transformación del acero en su óxido más estable, hasta la pérdida de sección efectiva de las armaduras que puede llegar a comprometer la capacidad portante del conjunto. La Asociación Nacional de Ingenieros de la Corrosión (NACE), institución que analiza la corrosión y sus consecuencias a nivel mundial, valoró en 2,5 billones de dólares (3,4% del PIB mundial) los costes derivados de los efectos de la corrosión en el mundo, no incluyendo los daños medioambientales ni los riesgos para la seguridad de las personas. (NACE 2016).

El estado inicial del hormigón tras su fabricación es de pasivación, con un valor de pH cercano a 13 (diagrama de equilibrio electroquímico de Pourbaix del hierro). La carbonatación del material, así como los ambientes ricos en concentraciones de iones sulfatos o cloruros, hacen que la cinética de corrosión comience, e incluso que pueda incrementarse de manera notable. La transformación superficial del acero dará comienzo cuando se produzcan variaciones en el potencial de corrosión (E_{corr}) del metal, formándose dos electrodos (cátodo y ánodo) que serán los componentes de la pila que la desencadene. El empleo de inhibidores es una alternativa eficaz para retrasar el comienzo de los procesos de corrosión, o reducir su velocidad en los ya iniciados (Ciavatta L 2003) (Alonso C 2009).

Hoy en día, donde los principios de protección del medio ambiente son un parámetro muy importante a tener en cuenta en cualquier ámbito, se ha generalizado el uso de inhibidores de corrosión de bajo impacto medioambiental, tanto en su fabricación como formando parte del medio de aplicación. Los compuestos aminoácidos, como el empleado en esta investigación, son considerados ecológicos, no tóxicos, biodegradables y de bajo coste (El Ibrahimi B 2020). Una de las técnicas disponibles es la generación de monocapas protectoras sobre la superficie del metal, y que se puedan adherir sin un proceso modificado externamente, es el método de fijación natural, que permite la generación de la monocapa mediante el autoensamblaje molecular en la superficie del metal a proteger, impidiendo o reduciendo la transformación del hierro en óxido (Rongxuan Zhao 2020).

Los ensayos pull-out, que consisten en la aplicación de cargas monótonas o cíclicas en las probetas de hormigón armado, permiten realizar estudios sobre la tensión de adherencia entre barra-hormigón (BOŠNJAK J 2008) o el análisis de la influencia de la corrosión en el trabajo conjunto de ambos materiales (EL MAADDAWY TA 2003), pero también hacen posible la simulación del comportamiento de una estructura en servicio de hormigón armado aplicando cargas estáticas o dinámicas que, en la presente investigación, permite la realización de un estudio sobre la evolución de las monocapas inhibidoras generadas a lo largo de la vida de la estructura. No se ha encontrado bibliografía específica sobre el empleo de la técnica de pull-out para el análisis de dichas monocapas en probetas de hormigón armado, por lo que se considera una investigación muy interesante en este campo.

El objetivo principal del presente estudio es la generación de monocapas inhibidoras de la cinética de corrosión sobre la superficie de las barras de acero, previamente a la fabricación de las probetas de hormigón armado, mediante un método de fijación natural (sin manipulación externa) de un compuesto orgánico de bajo coste y que respeta el medio ambiente. Dicho compuesto aminocarboxílico, el ácido 4-aminobenzoico (C7H7NO2), ha mostrado una gran capacidad reductora de la velocidad de corrosión en otras investigaciones (Addallah Imjjad 2022). Posteriormente, mediante la técnica de pull-out se aplicarán cargas cíclicas (1.000 ciclos de carga-descarga), lo que permitirá, tras el análisis de la evolución del potencial (E_{corr}) y la velocidad de corrosión (V_{corr}) en un medio agresivo (disolución de cloruro sódico 0,5M), y tras 150 días de estudio, obtener datos cuantificables de cómo evoluciona la capacidad inhibidora de las monocapas en función de las modificaciones superficiales que pueden producir dichas cargas en la interfase (zona de adherencia) entre la barra y el hormigón.

Introduction

The deterioration of reinforced concrete structures motivated by the effects produced by the corrosion of steel reinforcement is one of the most frequent in this type of structures, causing fissures or cracks due to the expansion of the corrosion products that are produced. in the transformation of steel into its most stable oxide, to the loss of effective section of the reinforcement that can compromise the load-bearing capacity of the assembly. The National Association of Corrosion Engineers (NACE), an institution that analyzes corrosion and its consequences worldwide, estimated the costs derived from the effects of corrosion at $2.5 trillion (3.4% of global GDP). in the world, not including environmental damage or risks to human safety. (NACE 2016).

The initial state of the concrete after its manufacture is passivation, with a pH value close to 13 (Pourbaix electrochemical equilibrium diagram of iron). The carbonation of the material, as well as environments rich in concentrations of sulfate or chloride ions, cause the corrosion kinetics to begin, and may even increase significantly. The surface transformation of the steel will begin when variations occur in the corrosion potential (Ecorr) of the metal, forming two electrodes (cathode and anode) that will be the components of the cell that triggers it. The use of inhibitors is an effective alternative to delay the beginning of corrosion processes, or reduce their speed in those already started (Ciavatta L 2003) (Alonso C 2009).

Nowadays, where the principles of environmental protection are a very important parameter to take into account in any field, the use of corrosion inhibitors with low environmental impact has become widespread, both in their manufacture and as part of the application medium. . Amino acid compounds, like the one used in this research, are considered ecological, non-toxic, biodegradable and low cost (El Ibrahimi B 2020). One of the available techniques is the generation of protective monolayers on the surface of the metal, which can be adhered without an externally modified process. It is the natural fixation method, which allows the generation of the monolayer through molecular self-assembly on the surface of the metal. metal to be protected, preventing or reducing the transformation of iron into oxide (Rongxuan Zhao 2020).

Pull-out tests, which consist of the application of monotonous or cyclic loads on reinforced concrete specimens, allow studies on the adhesion tension between bar-concrete (BOŠNJAK J 2008) or the analysis of the influence of corrosion on the joint work of both materials (EL MAADDAWY TA 2003), but they also make it possible to simulate the behavior of a reinforced concrete structure in service by applying static or dynamic loads. which, in the present investigation, allows a study to be carried out on the evolution of the inhibitory monolayers generated throughout the life of the structure. No specific literature has been found on the use of the pull-out technique for the analysis of said monolayers in reinforced concrete specimens, which is why it is considered a very interesting investigation in this field.

The main objective of the present study is the generation of monolayers that inhibit corrosion kinetics on the surface of the steel bars, prior to the manufacture of the reinforced concrete specimens, using a natural fixation method (without external manipulation) of a low-cost organic compound that respects the environment. Said aminocarboxylic compound, 4-aminobenzoic acid (C7H7NO2), has shown a great capacity to reduce the corrosion rate in other research (Addallah Imjjad 2022). Subsequently, using the pull-out technique, cyclic loads will be applied (1,000 charge-discharge cycles), which will allow, after the analysis of the evolution of the potential (Ecorr) and the corrosion rate (Vcorr) in an aggressive medium (0.5M sodium chloride solution), and after 150 days of study, obtain quantifiable data on how the inhibitory capacity of the monolayers evolves depending on the surface modifications that these loads can produce in the interface (adhesion zone) between the bar and the concrete.

Plan Experimental

Materiales

Las probetas se realizaron a partir de moldes cúbicos metálicos de 200x200 mm con una barra de acero corrugado B500SD de diámetro 16 mm situada en el centro. La longitud de la barra en contacto con el hormigón se estableció en 5 veces el diámetro de la barra (80 mm). La Tabla 1 la composición química del acero.

Tabla 1. Composición del acero (%)
Table 1. Steel composition (%)

C = 0,13	Mn = 0,78	Cu = 0,01	Si = 0,39
P = 0,02	Cr = 0,02	Ni = 0,018	Mo = 0,00

Antes de aplicar el tratamiento de generación de las monocapas inhibidoras, se sometió a las barras a un decapado químico, con el objetivo de eliminar la materia orgánica o productos de corrosión existentes (disolución de ácido fosfórico 1M durante 10'). Posteriormente, y una vez limpias las barras mediante mediante la proyección de agua destilada, se introdujeron en una disolución con el inhibidor (ácido 4-aminobenzoico) durante 120', generándose la monocapa por adhesión a la superficie de manera natural, sin alteraciones externas (imagen 1). En previsión de los posteriores estudios electroquímicos, y con el objetivo de provocar una difusión uniforme de los iones cloruro alrededor de la superficie de acero, uno de los extremos de la barra se dejó embebido en la probeta de hormigón (imagen 2).

El hormigón se elaboró con cemento tipo CEM II/B-M (V-L) 42,5R y áridos de machaqueo calizos (grava 4/12 y arena 0/4), añadiendo el aditivo Viscocrete 3425 de Sika. Las dosificaciones de cada uno de los componentes del hormigón realizado quedan recogidas en la Tabla 2. Las probetas se desmoldaron a las 24 horas de su hormigonado y se mantuvieron en una cámara de curado a 20ºC y HR ≥ 95% hasta alcanzar la edad de ensayo.

Tabla 2. Composición del hormigón
Table 2. Concrete composition

a/c	Agua (kg/m^3)	Cemento (kg/m^3)	Árido (kg/m^3)	Grava (kg/m^3)	Aditivo (kg/m^3)
0,55	187,0	340,0	1.108,3	738,8	2,7

Ensayos realizados

A partir de los 28 días, se realizaron los ensayos de pull-out. Con un rango de carga entre el 25 y el 50%, y teniendo en cuenta que la carga de agotamiento obtenida en ensayos previos de pull-out se situó en torno a los 80 kN, para el mismo diámetro de barra, se establecieron los límites inferior y superior de carga en 20 y 40 kN, respectivamente. Se aplicaron un total de 1.000 ciclos de carga-descarga, con una frecuencia programada de 0,01 Hz, equivalente a una velocidad de 200 N/s, y un tiempo por ciclo de ensayo de 100 segundos (imagen 3). Una vez realizada la fase de aplicación de cargas dinámicas, las probetas se dispusieron en un recipiente con la disolución de NaCl 0,5M.

Por último, periódicamente durante 150 días (imagen 4), se procedió al estudio de la variación del potencial (E_{corr}) y velocidad de corrosión (V_{corr}). Los ensayos se realizaron dentro de una jaula de Faraday, con conexión a tierra, evitando interferencias y ruido electromagnético. Los componentes del estudio electroquímico fueron un potenciostato Autolab PGSTAT 100 (EcoChemie, NL), cada una de las probetas, un electrodo de referencia de calomelanos (SCE) y una malla de acero inoxidable

como contraelectrodo. Una vez alcanzado un valor estable de E_{corr} (variación del potencial menor a 0,1µV/s), se aplicó la técnica LPR, con un rango de potencial total de 20 mV (10 mV arriba y debajo de E_{corr}, y una velocidad de barrido de 0,16 mV/s).

Materials

The specimens were made from 200x200 mm metal cubic molds with a B500SD corrugated steel bar with a diameter of 16 mm in the center. The length of the reinforcement in contact with the concrete was established at 5 times the diameter of the bar (80 mm). Table 1 shows the chemical composition of the reinforcing steel.

Before applying the treatment to generate the inhibitory monolayers, the bars were subjected to chemical pickling, eliminating the existing organic matter or oxide (1M phosphoric acid solution for 10'. Subsequently, the bars were introduced into a solution with the inhibitor (4-aminobenzoic acid) for 120' to generate the monolayer by adhering to the surface naturally, without external alterations (image 1). subsequent electrochemical studies, and with the aim of causing a uniform diffusion of chloride ions around the steel surface, one of the ends of the bar was left embedded in the concrete specimen (image 2).



Imagen 1. Formación de las monocapas.
Image 1. Monolayer formation

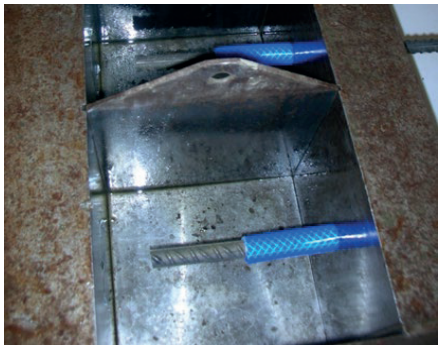


Imagen 2. Disposición de barras en moldes.
Image 2. Bars in molds.

The concrete was made with cement type CEM II/B-M (V-L) 42.5R and limestone crushing aggregates (gravel 4/12 and sand 0/4), adding the additive Viscocrete 3425 from Sika. The dosages of each of the components of the concrete made are shown in Table 2. The specimens were removed from the mold 24 hours after concreting and kept in a curing chamber at 20ºC and RH ≥ 95% until the test age was reached.

Tests carried out

After 28 days, pull-out trials were performed. With a load range between 25 and 50%, and taking into account that the exhaustion load obtained in previous pull-out tests was around 80 kN, for the same bar diameter, the limits were established lower and upper load at 20 and 40 kN, respectively, applying a total of 1,000 load-unload cycles, with a programmed frequency of 0.01 Hz, equivalent to a speed of 200 N/s, and a time per test cycle of 100 seconds (image 3). Once the dynamic load application phase was completed, the specimens were placed in a container with the 0.5M NaCl solution.

Finally, periodically for 150 days (image 4), the variation of the potential (Ecorr) and corrosion rate (Vcorr) was studied. The tests were carried out inside a Faraday cage, with ground connection, to avoid interference and electromagnetic noise. The components of the electrochemical study were an Autolab PGSTAT 100 potentiostat (EcoChemie, NL), each of the specimens, a calomel reference

electrode (SCE) and a stainless steel mesh as a counter electrode. Once a stable value of Ecorr was reached (potential variation less than 0.1µV/s), the LPR technique was applied, with a total potential range of 20 mV (10 mV above and below Ecorr, and a scanning speed of 0.16 mV/s).

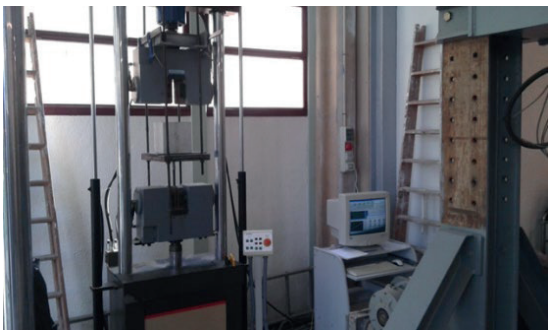


Imagen 3. Ensayo de pull-out.
Image 3. Pull-out test.

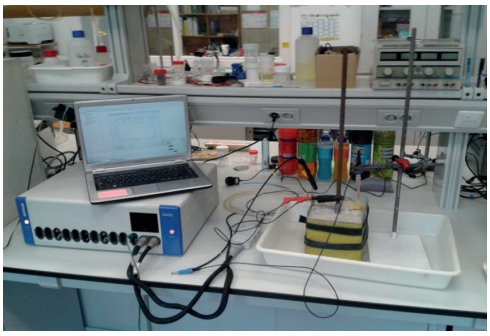


Imagen 4. Ensayo electroquímico.
Image 4. Electrochemical test.

Resultados

En la imagen 5 se muestra la evolución del potencial de corrosión (E_{corr}), en función del tiempo, durante los 150 días de estudio, incluyendo las barras sin tratamiento (ST) o con monocapas inhibidoras (N), y las que han sufrido ciclos de carga (1000C) o las que no (SC).

Partiendo de potenciales electronegativos, se observa un incremento progresivo hasta valores cercanos a cero o positivos. A partir de los 120 días de estudio, el E_{corr} de todos los grupos en estudios comienzan a descender a tasas más negativas, menos las barras que no tienen tratamiento inhibidor y no han sufrido ciclos de carga (ST_SC) que siguen en valores positivos pero con tendencia a reductora. Se muestran valores finales de potencial entre 0,006 y -0,125 V (zona de riesgo de corrosión). Este comportamiento está asociado a la variación de potencial que produce la difusión de los iones cloruro cuando alcanzan las armaduras de acero.

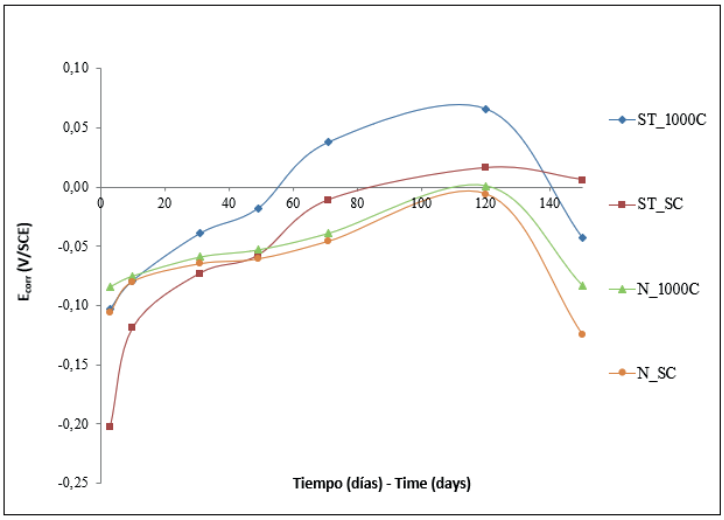


Imagen 5. Evolución del potencial de corrosión en 150 días.
Image 5. Evolution of E_{corr} in 150 days.

La imagen 6 muestra la variación de la velocidad de corrosión (V_{corr}) a lo largo de los 150 días de estudio. Lo primero que se puede observar es que sigue la misma tendencia que el E_{corr}, con una V_{corr} muy moderada hasta los 120 días, y un incremento más notable hasta los 150 días, como consecuencia de la disminución del E_{corr} a valores electronegativos.

Si se comparan los grupos sin ciclos de pull-out (ST_SC y N_SC), con su equivalente que sí se ha visto afectado por dichas solicitaciones (ST_1000C y N_1000C), se observa una mayor velocidad de corrosión en estos últimos, con incrementos cercanos al 60%, indicando que las pequeñas modificaciones en la superficie de las barras por el rozamiento barra-hormigón aumentan la cinética de corrosión. Teniendo en cuenta que se han aplicado cargas de hasta 40 kN, muy superiores a las que realmente se expone una estructura convencional en servicio (variación de carga entre 15-20%), en la realidad, las variaciones de la cinética de corrosión deberían ser menores.

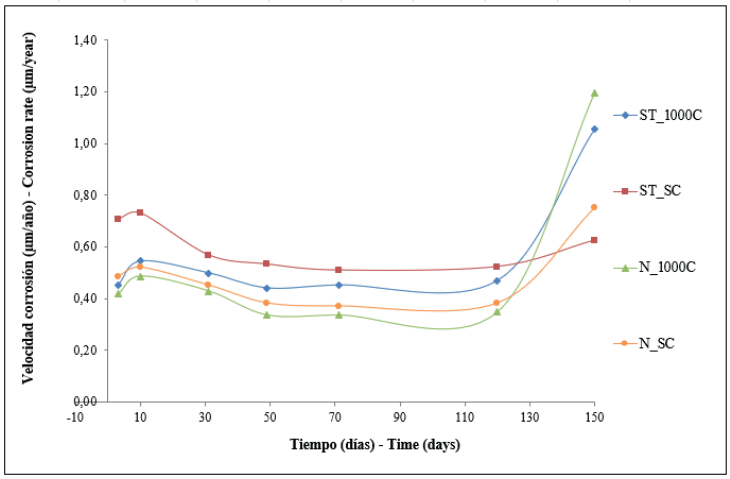


Imagen 6. Evolución de la velocidad de corrosión en 150 días.
Image 6. Evolution of corrosion rate in 150 days.

Por otro lado, al comparar los grupos sin tratamiento y los que incorporan las monocapas, se observa una mínima reducción de la cinética de corrosión en las barras de acero sin protección, lo que puede indicar que las monocapas resultan más dañadas que el acero al aplicarse las cargas cíclicas, ocasionando la aparición de micro pilas galvánicas que podrían justificar este comportamiento. No obstante, los valores de V_{corr} están muy próximos, y las cargas aplicadas, como se han comentado, son elevadas.

Results

Image 5 shows the evolution of the corrosion potential (Ecorr) as a function of time during the 150 days of study, including the bars without treatment (ST) or with inhibitory monolayers (N), and those that have undergone loading cycles. (1000C) or those that do not (SC).

Starting from electronegative values, an increase in the potential value is observed to values close to zero or positive. After 120 days of study, the values begin to decrease to more negative potential rates, except for the bars that do not have inhibitor treatment and have not undergone loading cycles (ST_SC) which continue at positive values but with a tendency to decrease. Final potential values between 0.006 and -0.125 V (corrosion risk zone) are shown. This behavior is associated with the variation in potential produced by the diffusion of chloride ions when they reach the steel reinforcement.

Image 6 shows the variation of the corrosion rate (Vcorr) throughout the 150 days of the study. The first thing that can be observed is that it follows the same trend as the Ecorr, with a very moderate Vcorr up to 120 days, and a more notable increase up to 150 days, as a consequence of the decrease in the Ecorr to electronegative values.

If the groups without pull-out cycles (ST_SC and N_SC) are compared with their equivalent that has been affected by these stresses (ST_1000C and N_1000C), a higher corrosion rate is observed in the latter, with increases close to the 60%, indicating that small modifications on the surface of the bars due to bar-concrete friction increase the corrosion kinetics. Taking into account that loads of up

to 40 kN have been applied, much higher than what a conventional structure is actually exposed to in service (load variation between 15-20%), the variations in corrosion kinetics should really be minor.

On the other hand, when comparing the groups without treatment and those that incorporate the monolayers, a minimal reduction in corrosion kinetics is observed in the unprotected steel bars, which may indicate that the monolayers are more damaged than the steel when applied. cyclic loads, causing the appearance of galvanic micro-cells that could justify this behavior. However, the Vcorr values are very close, and the applied loads, as mentioned, are high.

Conclusions

- The application of charge-discharge cycles affects the surface of both the untreated steel bars and those incorporating the inhibitory monolayers, increasing the corrosion potential, to more electronegative values, and the corrosion rate, with increases close to the 60%.

- It has also been found that the cycles affect surfaces that incorporate monolayers more, producing a moderate increase in the corrosion rate compared to untreated steel bars. This behavior can be linked to the generation of galvanic microcells that would accelerate the electronic transfer between cathodic and anodic zones.

Conclusiones

- La aplicación de ciclos de carga-descarga afecta a la superficie tanto de las barras de acero sin tratar como las que incorporan las monocapas inhibidoras, aumentando el potencial de corosión, a valores más electronegativos, y la velocidad de corrosión, con incrementos cercanos al 60%.

- También se ha podido comprobar que los ciclos afectan más a las superficies que incorporan monocapas, produciendo un incremento moderado de la velocidad de corrosión respecto a las barras de acero sin tratamiento. Este comportamiento se puede vincular a la generación de micro pilas galvánicas que acelerarían la transferencia electrónica entre zonas catódicas y anódicas.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- NACE, 2016. http://impact.nace.org/executive-summary.aspx
- Ciavatta L, De Tommaso G, Iuliano M, Stability constants of iron (II) sulfate complexes, Ann. Chim. 95 (2002) 513.
- Alonso C, Sánchez M, Análisis de la concentración crítica de cloruros en la vida útil de las estructuras, An. Mec. Frac. 26 (2009) 519-524.
- Amino acids and their derivatives as corrosion inhibitors for metals and alloys. B. El Ibrahimi, A. Jmiai, L. Bazzi, S. El Issami. Arabian Journal of Chemistry. Volume 13, Issue 1, January 2020, Pages 740-771.
- Synergistic effect of SAMs of S-containing amino acids and surfactant on corrosion inhibition of 316L stainless steel in 0.5 M NaCl solution. Rongxuan Zhao, Wendong Xu, Qian Yu, Lin Niu. Journal of Molecular Liquids. Volume 318, 15 November 2020, 114322.
- BOŠNJAK, J., SHARMA, A., ÖTTL, C.: Modified beam-end test setup to study the bond behavior of reinforcement in concrete after fire. Mater Struct. 2018.
- EL MAADDAWY, T.A., SOUDKI, K.A.: Effectiveness of Impressed Current Technique to Simulate Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete. J Mater Civ Eng. 2003.
- Corrosion inhibition of mild steel by aminobenzoic acid isomers in hydrochloric acid solution: efficiency and adsorption mechanisms. Addallah Imjjad, Khalid Abbiche, Moulay Driss Mellaoui, Aaziz Jmiai, Noureddine El Baraka, Abdelaziz Ait Taleb, Illyass Bazzi, Souad El Issami, Mustapha Hilali, Ridha Ben Said, Majdi Hochlaf. Applied surface Science. 576. 2022.

MODELADO Y ESTUDIO TÉRMICO EN TRNSYS DE UNA PARED VERDE EN UN EDIFICIO GUBERNAMENTAL DEL MUNICIPIO DE VERACRUZ

MODELING AND THERMAL STUDY IN TRNSYS OF A GREEN WALL IN A GOVERNMENTAL BUILDING IN THE MUNICIPALITY OF VERACRUZ

Vanessa Ortiz-Garcia
Estudiante de la Maestría en Eficiencia Energética y Energías Renovables; Tecnológico Nacional de México I.T.Veracruz, Av. Miguel ángel de Quevedo 2779, Formando Hogar, 91897 Veracruz, Ver, E-mail: m24023020@veracruz.tecnm.mx

Cinthya-Alejandra Sosa-Villalobos
Investigador en la Maestría en Eficiencia Energética y Energías Renovables; Tecnológico Nacional de México I.T.Veracruz, Av. Miguel ángel de Quevedo 2779, Formando Hogar, 91897 Veracruz, Ver, E-mail:cinthya.sv@veracruz.tecnm.mx

Genoveva Domínguez-Sánchez
Investigador en la Maestría en Eficiencia Energética y Energías Renovables; Tecnológico Nacional de México I.T.Veracruz, Av. Miguel ángel de Quevedo 2779, Formando Hogar, 91897 Veracruz, Ver, E-mail:cinthya.sv@veracruz.tecnm.mx

Araceli Rodriguez-Andrade
*Investigador en la Maestría en Eficiencia Energética y Energías Renovables; Tecnológico Nacional de México I.T.Veracruz, Av. Miguel ángel de Quevedo 2779, Formando Hogar, 91897 Veracruz, Ver, E-mail:*araceli.ra@veracruz.tecm.mx

Elisa Peñalvo-López
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universitat Politècnica de València, 46022 Valencia, Spain; E-mail: elpealpe@upvnet.upv.es

Iván Valencia Salazar
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universitat Politècnica de València, 46022 Valencia, Spain; E-mail: ivalencias@die.upv.es

Abstract

The objective of this paper is to conduct a thermal study on the impact of a green wall installed in a government building, as part of the DivAirCity Project, promoted by the European Union. The analysis focuses on evaluating the reduction of heat transfer through the wall, the mitigation of heat inside the building and the decrease of energy consumption of air conditioning systems, thus contributing to the reduction of CO_2 emissions. The results obtained through simulation in TRNSYS software show that the heat transfer before the installation of the green wall was 352 kWh. After integration of the green wall, this figure decreased significantly to 139 kWh, representing a thermal savings of 213 kWh. This saving is equivalent to 71 kWh electrical, which translates into a reduction of 31 kg of CO_2 emitted into the atmosphere. These findings highlight the benefits of green walls not only in terms of energy efficiency, but also in their contribution to environmental sustainability and climate change mitigation. Green walls improve psychological well-being by creating pleasant spaces that reduce stress and improve mood. They contribute to physical and mental health by improving air quality and reducing extreme heat. They also encourage environmental education, promoting ecological awareness, and strengthen social cohesion by involving the community in their care, promoting interaction and a sense of belonging.

Keywords
Green Wall, Sustainability, TRNSYS, SketchUp, Simulation, DivAirCity Project.

Introducción

El aumento de la temperatura genera un ciclo en el que, al elevarse las temperaturas, también aumenta la demanda de energía para el uso de aires acondicionados, lo que incrementa el consumo de combustibles fósiles. Además, el calor extremo provoca "estrés térmico" en el cuerpo humano, causando problemas como fatiga, deshidratación y golpes de calor (Zophruvelu et al., 2022).

Las soluciones basadas en la naturaleza, como las paredes verdes, son efectivas para enfrentar desafíos climáticos como el estrés térmico, las islas de calor y la contaminación. Estas estrategias están alineadas con los objetivos del proyecto DivAirCity de la Unión Europea, que busca reducir las emisiones de CO_2 y contribuir a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Grow Green, 2020). No solo reducen la transferencia de calor, sino que actúan como barreras acústicas, mejoran la calidad del aire al absorber CO_2 y liberar oxígeno, y contrarrestan el efecto de isla de calor urbano. Además, aportan valor estético y bienestar psicológico, transformando los espacios urbanos en entornos agradables.

La simulación térmica, utilizando el software TRNSYS, es clave para evaluar el rendimiento de las paredes verdes y su impacto en el confort térmico y la eficiencia energética, comparando las condiciones térmicas antes y después de su instalación (Nocera et al., 2024).

Metodología

Edificio Gubernamental

Se seleccionó un Sitio Gubernamental (SG) con el objetivo de promover la participación social en la implementación y mantenimiento de una Pared Verde. Como SG, se eligió un salón de clases con una población de siete personas. Se elaboró el Plano Arquitectónico utilizando AutoCAD, además de utilizar el software SketchUp para desarrollar el diseño de la Pared Verde y posteriormente evaluar el rendimiento de la pared verde, mediante una simulación en el software TRNSYS.

Estructura de la Pared Verde

Se seleccionó la estructura de bambú como material base debido a sus propiedad sostenibles y estructurales, pero dado que existen diferentes especies de bambú utilizados en construcciones, tales como: Bambú MADAKE (*Phyllostachys Bambusoides*), Bambú OLDHAMII (*Bambusa Oldhamii*) y Bambú GUADUA (*Guadua Angustifolia Kunt*). Se aplicó un diseño experimental en donde se identificaron cuatro variables independientes con tres magnitudes cada una, las cuales influyeron en la selección adecuada del material en base a la calidad-precio. Así como también se obtuvieron variables dependientes :la preservación, aplicandose un tratamiento por inmersión en solución de ácido bórico más bórax y la madurez de cuatro años. Se consideraron, el espesor y la húmedad como variables de ruido. En base a los datos analizados, se seleccionó el Bambú Guadua como la mejor opción para la estructura de la pared verde, es conocido por soportar cargas elevadas, lo que lo convierte en un material ideal para aplicaciones que requieren estabilidad y durabilidad.

Cálculo de Cargas en Flexión para la Estructura de Bambú Guadua

El Bambú Guadua como una viga empotrada con un diámetro(d) de 100mm, con una longitud(L) de 1000mm, su esfuerzo de flexión(σ) es de 50 N/mm2 y se ve afectada por una carga uniformemente distribuida (ω). Para calcular la carga puntual que puede soportar el bambú, se utilizan ecuaciones de momento de inercia circular, momento flector y carga total (Beer y col., 2009). Se estableció un factor de seguridad (FS) de 3.0 para garantizar un almacenamiento seguro de la capacidad de carga (Madhushan y col., 2023)

Selección de Plantas de la Pared Verde

Las plantas ornamentales son empleadas en muros verdes, principalmente por su diversidad de colores, texturas y formas. Se realizan composiciones dinámicas y visualmente impactantes, capaces de adaptarse a diferentes estilos de diseño. Sin embargo, su elección no debe basarse únicamente en la apariencia; es fundamental considerar otros criterios que aseguren su viabilidad y desarrollo a largo plazo. (Nod, 2024). Para ello, se consideraron cuatro criterios de selección: Orientación (puntos cardinales, posición vertical y posición horizontal), estructura (maceta, soporte y múltiple), tamaño o crecimiento (crecimiento vigoroso y controlado) y ubicación (geográfica, exterior e interior).

Introduction

The increase in temperature generates a cycle in which, as temperatures rise, the demand for energy for air conditioning also increases, which increases the consumption of fossil fuels. In addition, extreme heat causes "heat stress" in the human body, causing problems such as fatigue, dehydration and heat stroke (Zophruvelu et al., 2022).

Nature-based solutions, such as green walls, are effective in addressing climate challenges such as heat stress, heat islands, and pollution. These strategies are aligned with the objectives of the European Union's DivAirCity project, which aims to reduce CO_2 emissions and contribute to the Sustainable Development Goals (Grow Green, 2020). Green walls not only reduce heat transfer, but also act as acoustic barriers, improve air quality by absorbing CO_2 and releasing oxygen, and counteract the urban heat island effect. In addition, they add aesthetic value and psychological well-being, transforming urban spaces into pleasant environments.

Thermal simulation, using TRNSYS software, is key to evaluate the performance of green walls and their impact on thermal comfort and energy efficiency, comparing thermal conditions before and after their installation (Nocera et al., 2024).

Methodology

Government Building

A Government Site (GS) was selected with the objective of promoting social participation in the implementation and maintenance of a Green Wall. A classroom with a population of seven people was chosen as the SG. The Architectural Plan was developed using AutoCAD, in addition to using SketchUp software to develop the design of the Green Wall and subsequently evaluate the performance of the green wall, through a simulation in TRNSYS software.

Green Wall Structure

The bamboo structure was selected as the base material due to its sustainable and structural properties, but given that there are different bamboo species used in constructions, such as: Bamboo MADAKE (Phyllostachys Bambusoides), Bamboo OLDHAMII (Bambusa Oldhamii) and Bamboo GUADUA (Guadua Angustifolia Kunt). An experimental design was applied in which four independent variables were identified with three magnitudes each, which influenced the appropriate selection of material based on quality-price. Dependent variables were also obtained: preservation, applying a treatment by immersion in boric acid plus borax solution and maturity of four years. Thickness and humidity were considered as noise variables. Based on the data analyzed, Guadua bamboo was selected as the best option for the green wall structure, as it is known to support high loads, which makes it an ideal material for applications requiring stability and durability.

Calculation of Bending Loads for Guadua Bamboo Structure

Guadua bamboo as an embedded beam with a diameter(d) of 100mm, with a length(L) of 1000mm, its bending stress(σ) is 50 N/mm2 and is affected by a uniformly distributed load (ω). To calculate the point load that the bamboo can withstand, circular moment of inertia, bending moment and total load equations are used (Beer et al., 2009). A factor of safety (FS) of 3.0 was established to ensure safe storage of the load carrying capacity (Madhushan et al., 2023).

Green Wall Plant Selection

Ornamental plants are used in green walls, mainly for their diversity of colors, textures and shapes. They make dynamic and visually striking compositions, capable of adapting to different design styles. However, their choice should not be based solely on appearance; it is essential to consider other criteria that ensure their long-term viability and development (Nod, 2024). For this purpose, four selection criteria were considered: Orientation (cardinal points, vertical position and horizontal position), structure (pot, support and multiple), size or growth (vigorous and controlled growth) and location (geographic, exterior and interior).

Selección de Sustrato para la Pared Verde

Seleccionar un sustrato adecuado es crucial para el crecimiento de las plantas, ya que debe ser ligero y tener buen drenaje para evitar enfermedades. (Moya, 2024). El SG dispone de una cocina que generará desechos orgánicos biodegradables, los cuales serán reciclados mediante compostaje, un proceso de descomposición controlada de materiales como frutas, verduras, pasto y hojas. Para optimizar este proceso, es necesario mantener una adecuada relación de agua y aire, ya que es aeróbico (F. Ciencias Forestales C.N, 2020). Además, los residuos de café se usarán como abono para reducir el uso de fertilizantes convencionales. De este modo, se obtendrá un sustrato enriquecido que promoverá un entorno saludable para el crecimiento de las plantas. (RETEMA, 2023)

Mantenimiento de la Pared Verde

El SG forma parte de una comunidad de niñas de 12 a 18 años, a quienes se les diseñará un plan de mantenimiento para fomentar su participación en el cuidado y sostenibilidad del sistema. Las actividades incluirán el riego en tiempos calurosos, monitoreo de la salud de las plantas y la identificación de plagas o problemas. También, bajo supervisión, realizarán podas ligeras para mantener el orden y la estética. Este enfoque promueve la conservación ambiental y proporciona una experiencia educativa en prácticas sostenibles.

Proceso de Modelado Digital del Edificio y Pared verded en el Software SketchUp

El programa SketchUp se utilizó para modelar un edificio a escala, se añadieron texturas y materiales, y detalles interiores como muebles y un aire acondicionado desde 3D Warehouse. Para modelar la pared verde, se dibujó el bambú con Círculo y Push/Pull, luego se duplicó y posicionó en columnas con Mover y Regla. Las columnas se organizaron en forma de viga con Rotar, se crearon espacios para las plantas y finalmente se aplicó la textura del bambú e integración de las plantas (imagen 1)

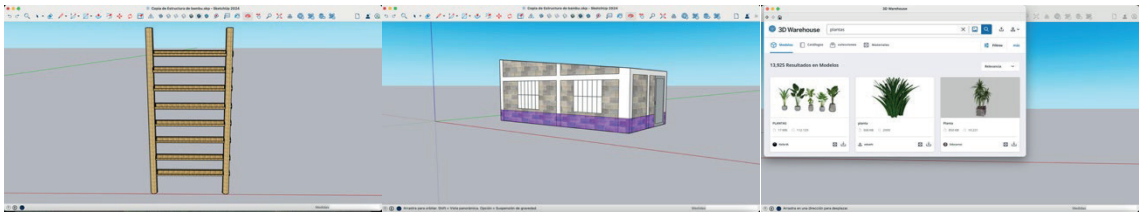


Imagen 1. Modelado Digital del Edificio y la Pared Verde. Image 3. Digital Modeling of the Building and Green Wall.

Instalación de Sensores de Temperatura

Los sensores de temperatura y humedad Jaalee se instalaron para evaluar las temperaturas antes de colocar la pared verde y además servirán para evaluar el rendimiento de la pared, ya que permiten almacenar y analizar datos sobre estos parámetros, proporcionando información precisa en tiempo real.

Resultados

Edificio Gubernamental

Para realizar la simulación en TRNSY, es fundamental disponer de las dimensiones del SG (ver imagen 2), así como de la descripción térmica de los materiales utilizados en su construcción. (ver tabla 1)

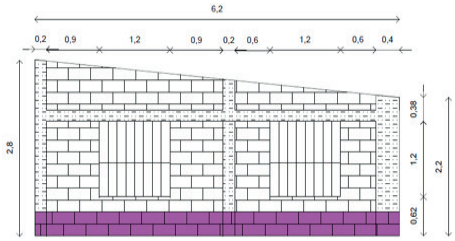


Imagen 2. Dibujo Arquitectónico. Image 5. Architectural Drawing.

Tabla 1. Propiedades Térmica de los Materiales. Tabla 2 Termal Properties of Materials

Materia	Espesor(cm)	Conducción Térmica (W/mK)	Calor Especifico (J/kgK)	Densidad (kg/m³)
Pared Exterior e Interior				
Bloque de Hormigón	15	0.420	1000	1200
Pintura Elastomérica (Pared)	0.2	0.29	x	1170
Hierro (Protección)	0.5	62	473	7870
Aluminio (Marco y Puerta)	0.3	160	896	2800
Vidrio	0.6	1160	830	2490
Techo				
Lamina de Asbesto	0.6	0.156	900	1900

Green Wall Substrate Selection

Selecting a suitable substrate is crucial for plant growth, as it must be light and have good drainage to avoid disease (Moya, 2024). The SG has a kitchen that will generate biodegradable organic waste, which will be recycled through composting, a process of controlled decomposition of materials such as fruits, vegetables, grass and leaves. To optimize this process, it is necessary to maintain an adequate ratio of water and air, as it is aerobic (F. Ciencias Forestales C.N, 2020). In addition, coffee residues will be used as compost to reduce the use of conventional fertilizers. In this way, an enriched substrate will be obtained that will promote a healthy environment for plant growth (RETEMA, 2023).

Green Wall Maintenance

The SG is part of a community of girls aged 12 to 18, for whom a maintenance plan will be designed to encourage their participation in the care and sustainability of the system. Activities will include watering in hot weather, monitoring plant health, and identifying pests or problems. They will also, under supervision, perform light pruning to maintain order and aesthetics. This approach promotes environmental conservation and provides an educational experience in sustainable practices.

Digital Modeling Process of the Building and Verded Wall in SketchUp Software

SketchUp was used to model a building to scale, textures and materials were added, and interior details such as furniture and an air conditioner were added from 3D Warehouse. To model the green wall, the bamboo was drawn with Circle and Push/Pull, then duplicated and positioned into columns with Move and Ruler. The columns were arranged in a beam shape with Rotate, spaces were created for the plants and finally the bamboo texture and plant integration were applied (image 1)

Imagen 1. Modelado Digital del Edificio y la Pared Verde. Image 3. Digital Modeling of the Building and Green Wall.

Installation of Temperature Sensors

Jaalee temperature and humidity sensors are installed to evaluate the performance of the green wall, as they allow storing and analyzing data on these parameters, providing accurate information in real time.

Results

Government Building

In order to perform the simulation in TRNSY, it is essential to have the dimensions of the SG (see image 3), as well as the thermal description of the materials used in its construction (see table 2).

Tabla 1 Propiedades Térmica de los Materiales. Tabla 2 Termal Properties of Materials

Imagen 2. Dibujo Arquitectónico. Image 5. Architectural Drawing.

Estructura de la Pared Verde

Los resultados del cálculo de carga en flexión para el bambú Guadua indican una carga total de 333.46 kg, contemplando los factores de seguridad previamente establecidos.

Selección de Plantas de la Pared Verde

De acuerdo a los criterios mencionados en la metodología, las plantas que cumplen con los criterios son; El Tradescantia Spathacea (Maguey Morado), Solenostemon scutellarioides (Coleus) y Bacopa monnieri (Bacopa).

Modelado Digital del Edificio y la Pared Verde

A partir de la metodología desarrollada, se obtiene un diseño tridimensional detallado tanto del edificio como de la pared verde, integrando los elementos previamente analizados. Este diseño incorpora decisiones sobre la selección de materiales y especies vegetales para garantizar el equilibrio entre funcionalidad y estética. (ver imagen 3)

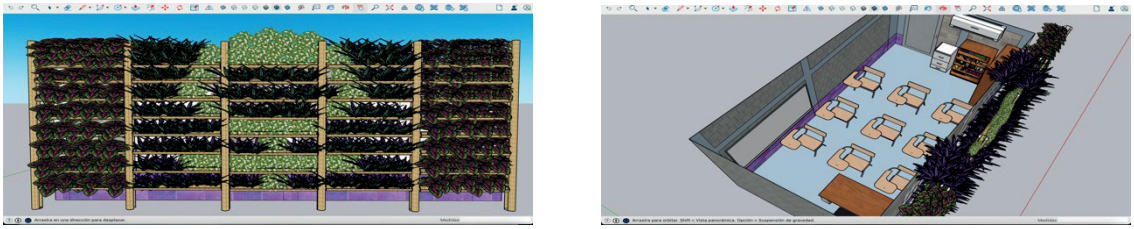
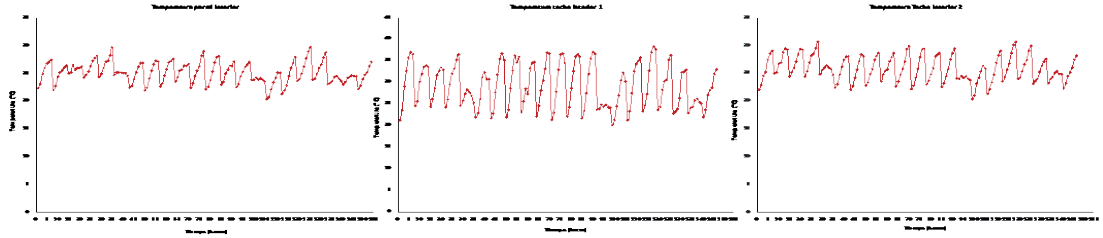


Imagen 3. Diseño Tridimensional del Edificio y la Pared Verde . Image 3. Tree-dimensional Design of the Building and Green Wall

Sensores de Temperatura

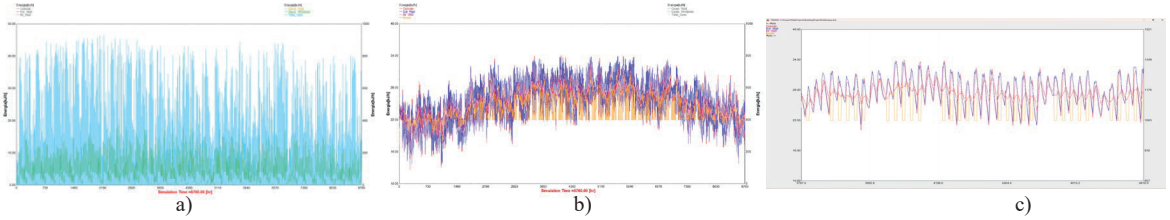
El período de estudio de las temperaturas al interior del edificio fue de 18 días, se registraron las temperaturas en la pared interior del SG, así como también en dos zonas diferentes del techo interior (ver gráfico 1). Se registro una temperatura maxima en la pared interior de 29°C, mientras que en el area del techo las temperaturas alcanzan los 38°C. Estos valores permiten observar el comportamiento que hay al interior del edificio anter y una vez instalada la pared verde.



Grafica 1.Temperatura al Interior del Edificio. Graph 1. Temperature Inside the Building.

Simulación en TRNSYS

Se llevó a cabo la simulación en el software TRNSYS utilizando los valores determinados en la metodología previamente definida. Este análisis permitió modelar las condiciones térmicas del edificio antes de la pared verde (ver gráfica 2), logrando observar la ganancia de calor en el exterior (Total_Gain), y las que son transmitidas por las ventanas (Gains Windows), teniendo como temperatura maxima de la pared a 33°C (Ext Wall).



a) b) c)

Grafica 2.Antes de la Pared Verde: a) Ganancia térmica anual de la pared y ventana. b) Temperatura anual del ambiente, interior y exterior de la pared y del aula. c) Evolución de temperaturas en verano. Graph 2.Before the Green Wall: a) Annual thermal gain of the wall and window. b) Annual temperature of the environment, inside and outside the wall and the classroom. c) Temperature evolution in summer

Green Wall Structure

The results of the bending load calculation for Guadua bamboo indicate a total load of 333.46 kg, considering the safety factors previously established.

Green Wall Plant Selection

According to the criteria mentioned in the methodology, the plants that meet the criteria are: Tradescantia Spathacea (Maguey Morado), Solenostemon scutellarioides (Coleus) and Bacopa monnieri (Bacopa)

Digital Modeling of the Building and the Green Wall

From the developed methodology, a detailed three-dimensional design of both the building and the green wall is obtained, integrating the previously analyzed elements. This design incorporates decisions on the selection of materials and plant species to ensure a balance between functionality and aesthetics. (see imagen 3)

Temperature Sensors

The period of study of the temperatures inside the building was 18 days, the temperatures were recorded in the interior wall of the SG, as well as in two different areas of the interior roof (see graph 1). As a result, the maximum temperature recorded inside the wall is 29°C, while in the roof area the temperatures reach 38°C. These values help us to better observe the behavior inside the building, once the green wall is installed.

Grafica 1.Temperatura al Interior del Edificio. Graph 1. Temperature Inside the Building.

Simulation in TRNSYS

The simulation was carried out in TRNSYS software using the values obtained from the previously defined methodology. This analysis allowed modeling the thermal conditions of the building before the green wall (see graph 2), observing the heat gain on the outside (Total_Gain), and those transmitted through the windows (Gains Windows), with the maximum temperature of the wall at 33°C (Ext Wall).

Grafica 2.Antes de la Pared Verde: a) Ganancia térmica anual de la pared y ventana. b) Temperatura anual del ambiente, interior y exterior de la pared y del aula. c) Evolución de temperaturas en verano. Graph 2.Before the Green Wall: a) Annual thermal gain of the wall and window. b) Annual temperature of the environment, inside and outside the wall and the classroom. c) Temperature evolution in summer.

Tras la instalación de la pared verde en el software SketchUp, se realizó nuevamente la simulación en TRNSYS, observándose una notable disminución del calor en la pared tradicional. Los

resultados muestran que la temperatura exterior (Outside) es significativamente mayor que la temperatura de la pared tradicional, alcanzando un máximo de 30°C. Estos datos confirman que la incorporación de una pared verde reduce significativamente la temperatura de una pared convencional, contribuyendo a la disminución de la temperatura en el interior del edificio y mejorando las condiciones térmica generales.

After the installation of the green wall in the SketchUp software, the simulation was performed again in TRNSYS, showing a significant decrease of heat in the traditional wall (see graph 3). The results show that the outside temperature is significantly higher than the temperature of the traditional wall, reaching a maximum of 30°C. These data confirm that the incorporation of a green wall significantly reduces the temperature of a conventional wall, contributing to the decrease of the temperature inside the building and improving the overall thermal conditions.

Conclusion

Los resultados de la simulación en TRNSYS muestran que la transferencia de calor antes de la instalación de la pared verde es de 352 kWh. Tras integrar la pared verde, esta se reduce a poco más de la mitad, alcanzando 139 kWh. Esto representa un ahorro térmico de 213 kWh, equivalente a 71 kWh eléctricos y a una reducción de 31 kg de CO_2 emitidos a la atmósfera. Estos datos evidencian no solo el impacto térmico positivo de la pared verde, sino también la disminución en el consumo de energía destinada a sistemas de aire acondicionado. Este ahorro energético, a su vez, se traduce en una menor quema de combustibles fósiles, contribuyendo así a la mitigación de emisiones de CO_2 asociadas a fuentes de energía convencionales. Las paredes verdes ofrecen diversos beneficios sociales al mejorar el bienestar psicológico de las personas, ya que crean espacios visualmente agradables que reducen el estrés y mejoran el estado de ánimo. Además, contribuyen a la salud física y mental al mejorar la calidad del aire, reducir la contaminación y disminuir los efectos del calor extremo. Estas estructuras también fomentan la educación ambiental, promoviendo la conciencia ecológica y el aprendizaje sobre sostenibilidad y biodiversidad. Al involucrar a la comunidad en su cuidado, las paredes verdes fortalecen la cohesión social, promoviendo la interacción y el sentido de pertenencia

Conclusion

The simulation results in TRNSYS show that the heat transfer before the installation of the green wall is 352 kWh. After integrating the green wall, this is reduced to just over half, reaching 139 kWh. This represents a thermal saving of 213 kWh, equivalent to 71 kWh electrical and a reduction of 31 kg of CO_2 emitted into the atmosphere. This data evidences not only the positive thermal impact of the green wall, but also the reduction in energy consumption for air conditioning systems. This energy saving, in turn, translates into less fossil fuel burning, thus contributing to the mitigation of CO_2 emissions associated with conventional energy sources. MeasurementsGreen walls offer various social benefits by improving people's psychological well-being, as they create visually pleasing spaces that reduce stress and improve mood. In addition, they contribute to physical and mental health by improving air quality, reducing pollution, and lessening the effects of extreme heat. These structures also foster environmental education, promoting ecological awareness and learning about sustainability and biodiversity. By involving the community in their care, green walls strengthen social cohesion, promoting interaction and a sense of belonging.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado dentro del marco del proyecto de investigación "The power of diversity and social inclusión as a mean for reducing air pollution and achieving green urban nexus in climate neutral cities' — 'DivAirCity" (Referencia: 101003799) del Programa Marco H2020 de la Unión Europea.

Acknowledgment

This work has been carried out within the framework of the research project "The power of diversity and social inclusion as a mean for reducing air pollution and achieving green urban nexus in climate neutral cities' — 'DivAirCity" (Contract Ref: 101003799) of the European Union's H2020 Framework Program.

Bibliografía/Bibliography

- Zophruvelu,V.,Thaneshwari,T., Sabina,R. and Peeyoosh,K.(2022) Green Wall for Healthy and Sustainable Urban Society:A Review,The Journal of the Greens and Gardens, Volume 05, No. 15 & 16: 1-9.
- Talhinhas,P.,Soares,A.L.,Ferreira,V. and Espírito,M.D. (2023) In the Search for Sustainable Vertical Green Systems: An Innovative Low-Cost Indirect Green Façade Structure Using Porguese Native Ivies and Cork, Sustainability, 15.
- Grow Green (2020) Compendium of Nature-basad and "grey" solutions to address climate- and water-related problems in European cities.
- Nocera,F.,Costanzo,V.,Detommaso,M.,Evola,G. (2024) Assessing the Impact of Vertical Greenery Systems on the Thermal Performance of Walls in Mediterranean Climates, Energies 17(20), 5090.
- Beer,F.,Russell,E.,Dewolf,J.,Mazurek,D.(2009) Mechanic of Materials, fifth edition.
- Madhushan,S.,Buddika,S.,Sahan,B.,Navaratnam,S.,Abeysuriya,N.(2023) Uses of Bamboo for Sustainable Construction-A Structural and Durability Perspective- A Review. Sustainability,15,11137
- De Nod, J. (2024). Los materiales esenciales para un jardín vertical: todo lo que necesitas saber. Jardín de Nod.
- Moya, F. (2024). Jardines Verticales: Un Oasis Verde en Espacios Urbanos. Arbolizados.
- *RETEMA (2023) Compostaje, una necesidad a la hora de tratar los residuos orgánicos*.
- Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza (2020) Compostaje: una práctica sustentable para reducir basura

ANÁLISIS DE PATOLOGÍAS EN EDIFICACIONES Y ASCENSIÓN DEL NIVEL FREÁTICO EN BÉTERA (VALENCIA). PROPUESTA DE PROTOCOLO PIEZOMÉTRICO DE AVISO CIUDADANO

ANALYSIS OF PATHOLOGIES IN BUILDINGS AND RISING WATER TABLE IN BÉTERA (VALENCIA). PROPOSAL FOR A PIEZOMETRIC PROTOCOL FOR PUBLIC WARNING

Javier Rodrigo Ilarri
Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n, 46022 (Valencia)
E-mail: jrodrigo@upv.es
Aurora Martínez-Corral
Instituto Universitario de Tecnología de los materiales. Dpto. de Construcciones Arquitectónicas. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n, 46022 (Valencia)
E-mail: aumarcor@csa.upv.es
Claudia-Patricia Romero-Hernández
Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n, 46022 (Valencia).
E-mail: rhclaudiapatri@hotmail.com
Lucía Belenguer-Espinosa
Ayuntamiento de Bétera (Valencia). E-mail: ingenieros@betera.es
María-Elena Rodrigo-Clavero
Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n, 46022 (Valencia).
E-mail: marodcla@upv.es

Abstract

This paper describes the pathologies caused in numerous buildings in Bétera due to the rise in water tables in the spring of 2022. As a result, and to generate an action protocol to anticipate natural disasters such as the recent DANA, a study was carried out on the hydrogeological characterisation of the area and the construction characteristics of the affected buildings. The results obtained have made it possible, on the one hand, to complement the technical documentation for the licence application and, on the other, to make a proposal for action aimed at complementing the information provided by the existing municipal piezometric control network. The implementation of the proposed actions seeks to develop a Citizen Warning Protocol in the event of possible emergencies due to rising water tables.

Keywords
Building project, materials, construction details, groundwater, pathologies, Bétera.

Introducción

Las inundaciones derivadas del ascenso de aguas subterráneas son un fenómeno cada vez más reconocido que plantea riesgos significativos tanto para los asentamientos humanos como para los ecosistemas naturales. Las principales causas de niveles elevados de aguas subterráneas incluyen precipitaciones prolongadas, cambios en el uso del suelo y actividades antropogénicas. Kubicz enfatiza que los niveles de aguas subterráneas responden a las sequías meteorológicas, con el tiempo de reacción influido por la duración de los déficits de precipitación. Esto resalta la importancia de comprender las dinámicas temporales de los niveles de aguas subterráneas en relación con los patrones de lluvia. Adams et al. señalan además que los sistemas de alerta temprana para inundaciones por aguas subterráneas son raros, en gran parte debido a la limitada comprensión de los eventos de inundación por aguas subterráneas en comparación con las inundaciones fluviales. Esta brecha en el conocimiento subraya la necesidad de mejorar el monitoreo y los modelos predictivos para mitigar los riesgos de inundación.

La urbanización agrava las inundaciones por aguas subterráneas al aumentar las superficies impermeables, lo que conduce a una rápida escorrentía y a una menor infiltración. Shepley y Soley discuten cómo la extracción de aguas subterráneas puede influir en los flujos de agua superficial, particularmente en entornos urbanos donde la relación entre los niveles de aguas subterráneas y el agua superficial es crítica. Esta interacción se complica aún más por la presencia de acuíferos colgados, como lo destacan Becker et al., quienes describen cómo los niveles altos de aguas subterráneas pueden llevar a inundaciones, particularmente en áreas urbanas donde los sistemas de drenaje pueden verse desbordados.

La gestión de las inundaciones por aguas subterráneas requiere un enfoque integrado que considere tanto las interacciones entre aguas superficiales y subterráneas. Morris et al. argumentan que los mapas de riesgo de inundaciones existentes a menudo descuidan las inundaciones por aguas subterráneas, lo que puede llevar a una preparación inadecuada en áreas propensas a inundaciones. Técnicas de modelación innovadoras, como las propuestas por Ascott et al., pueden mejorar nuestra comprensión de las dinámicas de las inundaciones por aguas subterráneas y mejorar las capacidades predictivas.

Estudios recientes también han explorado los efectos del cambio climático en los niveles de aguas subterráneas y las inundaciones. Por ejemplo, Ho et al. discuten cómo las demandas de agua agrícola y la variabilidad climática pueden influir en la recarga de aguas subterráneas, mientras que Zhang et al. destacan la relación entre los niveles superficiales de aguas subterráneas y la lixiviación de nitrógeno en regiones agrícolas. Estos hallazgos indican que el cambio climático probablemente exacerbará los riesgos de inundaciones por aguas subterráneas, lo que requiere estrategias de gestión adaptativa.

En el presente trabajo se realiza un análisis de la situación ocasionada por el ascenso de los niveles freáticos sobre las edificaciones del casco urbano de la ciudad de Bétera (Valencia) en la primavera de 2022. En este episodio de ascenso de niveles, diversos garajes subterráneos fueron anegados.

El municipio de Bétera (Valencia)

El municipio de Bétera pertenece a la comarca del Camp del Túria (Valencia), junto con los municipios de Benisanó, Casinos, L'Eliana, Llíria (cabecera comarcal), Náquera, Olocau, La Pobla de Vallbona, Ribarroja de Túria, Serra, Vila Marxant y Marines. El término municipal tiene una superficie aproximada de 75,67 km2. Presenta una forma irregular, algo alargada en la dirección SE-NO y está situado en el extremo SE de la comarca, a una altitud de 120 metros y distando 18 kilómetros de Valencia y 23 kilómetros del mar.

Introduction

Flooding from rising groundwater is an increasingly recognised phenomenon that poses significant risks to both human settlements and natural ecosystems. The main causes of elevated groundwater levels include prolonged rainfall, land-use changes, and anthropogenic activities. Kubicz emphasizes that groundwater levels respond to meteorological droughts, with reaction time influenced by the duration of precipitation deficits. This highlights the importance of understanding the temporal dynamics of groundwater levels about rainfall patterns. Adams et al. further note that early warning systems for groundwater flooding are rare, largely due to a limited understanding of groundwater flooding events compared to river flooding. This gap in knowledge underscores the need for improved monitoring and predictive models to mitigate flood risks.

Urbanization exacerbates groundwater flooding by increasing impervious surfaces, leading to rapid runoff and less infiltration. Shepley and Soley discuss how groundwater extraction can influence surface water flows, particularly in urban settings where the relationship between groundwater levels and surface water is critical. This interaction is further complicated by the presence of hanging aquifers, as highlighted by Becker et al., who describe how high groundwater levels can lead to flooding, particularly in urban areas where drainage systems can be overwhelmed.

Groundwater flood management requires an integrated approach that considers both surface and groundwater interactions. Morris et al. argue that existing flood risk maps often neglect groundwater flooding, which can lead to inadequate preparation in flood-prone areas. Innovative modelling techniques, such as those proposed by Ascott et al., can improve our understanding of groundwater flood dynamics and improve predictive capabilities.

Recent studies have also explored the effects of climate change on groundwater levels and flooding. For example, Ho et al. discuss how agricultural water demands and climate variability can influence groundwater recharge, while Zhang et al. highlight the relationship between surface groundwater levels and nitrogen leaching in agricultural regions. These findings indicate that climate change will likely exacerbate the risks of groundwater flooding, requiring adaptive management strategies.

This paper analyzes the situation caused by the rise in water tables on buildings in the urban area of the city of Bétera (Valencia) in the spring of 2022. In this episode of level up, several underground garages were flooded.

The municipality of Bétera (Valencia)

The municipality of Bétera belongs to the region of Camp del Túria (Valencia), along with the municipalities of Benisanó, Casinos, L'Eliana, Llíria (regional capital), Náquera, Olocau, La Pobla de Vallbona, Ribarroja de Túria, Serra, Vila Marxant and Marines. The municipality has an approximate area of 75.67 km2. It has an irregular shape, somewhat elongated in the SE-NW direction and is located at the SE end of the region, at an altitude of 120 metres and 18 kilometres from Valencia and 23 kilometres from the sea.

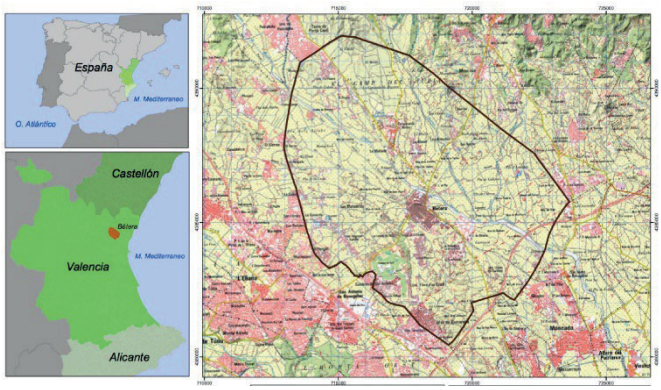


Figura 1. Localización y configuración geográfica del T.M. de Bétera.
Figure 1. Location and geographical configuration of the Municipality of Bétera

El casco urbano de Bétera, situado sensiblemente en el centro del término municipal se presenta como la aglomeración urbana de mayor importancia, concentrando en sí la mayor parte de la actividad urbana e industrial del término. La Figura 2 muestra una imagen de detalle del caso urbano en el que destaca claramente la Alameda, como vial preferente de drenaje de las aguas de escorrentía, que se sitúa en el antiguamente denominado Barranco de Bétera.

El barranco de Bétera actúa como vía de conexión hidráulica y de desagüe de los caudales de agua superficial conduciéndolos hasta el barranco de Carraixet. Actualmente el barranco está conformado por la citada Alameda y por un vial de doble sentido de circulación (denominado c/ Polígono) siguiendo un trazado sensiblemente rectilíneo.



Figura 2. Emplazamiento del casco urbano junto al Barranco de Bétera (actual Alameda).
Figure 2. Location of the town centre next to the Barranco de Bétera (now Alameda).

Tanto la Alameda como la c/ Polígono se encuentran incluidas en su totalidad en la zona de envolvente por peligrosidad de inundación determinada por el Plan de Acción Territorial de carácter sectorial sobre prevención del Riesgo de Inundación en la Comunitat Valenciana (PATRICOVA). El PATRICOVA es un instrumento de planificación territorial cuyo objetivo principal es reducir el riesgo de inundaciones en esta región de España. Este plan establece directrices y normas que guían tanto el desarrollo urbanístico como las intervenciones en infraestructuras, con el fin de minimizar el impacto de las inundaciones sobre las personas, los bienes y el medio ambiente.

Características de las construcciones afectadas

Las edificaciones afectadas son diez edificios plurifamiliares de reciente construcción y dos edificaciones de uso dotacional y terciario (sede municipal y supermercado), ejecutadas entre los años 1998-2007. Todas las edificaciones cuentan con plantas de sótano (hasta dos), alcanzando una cota mínima y máxima bajo rasante de -3,10 m y de -10,16 m, respectivamente. La profundidad de los fosos de ascensor alcanza una media de 1,50 m por debajo de la cota indicada. En todos los casos analizados, se producen reclamaciones patrimoniales ante la administración local por entrada de agua, bien en los sótanos destinados a uso garaje, bien en los fosos de ascensores, detectando en estos entrada de agua también por las paredes laterales de fábrica.

Se realiza el análisis de los proyectos y expedientes de licencia de las doce edificaciones. La totalidad de los edificios analizados se ubican en la zona circundante a la Alameda de Bétera. Dicha zona, en el Plan General de Ordenación Urbana vigente (PGOU), aprobado el 29 de marzo de 2000, se califica como zona verde, sin existir planeamiento detallado con respecto a los riesgos de inundación, aunque dicha zona se encuentra dentro de la envolvente de peligrosidad por inundación según el PATRICOVA. Debe aclararse que el citado Plan de Acción Territorial desarrollado al efecto es de aprobación posterior al Plan General del municipio (Acuerdo del Consell de 28 de enero de 2003), estando prevista su incorporación, como figura de rango superior, al nuevo plan general previsto para el municipio. La Figura 3 indica la localización de las edificaciones analizadas superpuestas al plano de calificación y clasificación del suelo vigente.

The urban area of Bétera, located in the centre of the municipality, is the most important urban agglomeration, concentrating most of the urban and industrial activity in the municipality. Figure 2 shows a detailed image of the urban case in which the Alameda clearly stands out, as the preferred drainage road for runoff water, which is in the formerly called Barranco de Bétera.

The Bétera ravine acts as a hydraulic connection and drainage route for the surface water flows, leading them to the Carraixet ravine. Currently, the ravine is made up of the Alameda and a two-way road (called Polygon Street) following a significantly rectilinear route.

Both Alameda and Polygon Street are included in their entirety in the envelope area due to flood hazard determined by the sectoral Territorial Action Plan on the Prevention of Flood Risk in the Valencian Community (PATRICOVA). PATRICOVA is a territorial planning instrument whose main objective is to reduce the risk of flooding in this region of Spain. This plan establishes guidelines and standards that guide both urban development and infrastructure interventions, to minimise the impact of floods on people, property and the environment.

Characteristics of the affected buildings

The affected buildings are ten recently built multi-family buildings and two buildings for endowment and tertiary use (municipal headquarters and supermarket), executed between 1998-2007. All buildings have basement floors (up to two), reaching a minimum and maximum level below ground of -3.10 m and -10.16 m, respectively. The depth of the elevator shafts reaches an average of 1.50 m below the indicated level. In all the cases analysed, there are patrimonial claims before the local administration for water entry, either in the basements intended for garage use or in the elevator pits, detecting in these also water entry through the side walls of the factory.

The analysis of the projects and license files of the twelve buildings is carried out. All the buildings analysed are in the area surrounding the Alameda de Bétera. This area, in the current General Urban Planning Plan (PGOU), approved on March 29, 2000, is classified as a green zone, without detailed planning concerning flood risks, although this area is within the flood hazard envelope according to PATRICOVA. It should be clarified that the Territorial Action Plan developed for this purpose is approved after the General Plan of the municipality (Agreement of the Council of 28 January 2003), and its incorporation is foreseen, as a figure of higher rank, into the new general plan planned for the municipality. Figure 3 indicates the location of the buildings analysed superimposed on the current land qualification and classification plan.



Figura 3. Superposición de las edificaciones analizadas en el plano de calificación y clasificación de suelo del PGOU vigente.
Figure 3. Superposition of the buildings analysed in the land qualification and classification of the current PGOU.

La totalidad de las edificaciones analizadas corresponde a tipologías de bloque plurifamiliar en altura, de entre 3 y 5 plantas y con una o dos plantas de sótano en algunos casos. Las características constructivas de los mismos son coincidentes, con estructuras a base de pórticos de hormigón armado, forjados unidireccionales, cimentaciones a base de zapatas aisladas bajo pilares y corridas bajo muros de sótano y soleras.

Resulta significativo en todos los casos la ausencia, por un lado, de detalles constructivos específicos para resolver la impermeabilización de juntas y puntos singulares, y, por otro, la ausencia de forjados sanitarios o disposición de cotas de planta baja a 80 cm de altura sobre la rasante del terreno, estando establecida esta cota como aquella donde, según recoge el PATRICOVA, la curva de daños por inundación cambia significativamente. Por ello, el propio plan toma esta altura como referencia para definir los niveles de riesgo y para situar las edificaciones por encima de esta altura. En ninguno de los proyectos analizados se hace referencia a las disposiciones de diseño establecidas por el plan. Debe tenerse en cuenta que se trata de edificaciones cuyos proyectos son anteriores a la exigencia de aplicación del Código Técnico aprobado en 2006, que impone la exigencia en el diseño de cumplir con las condiciones reguladas en la sección HS-1 (Protección frente a la humedad del Documento Básico Salubridad). También la Guía Verde (A-11) propone algunas medidas preventivas para enfrentar inundaciones o recuperarse mejor de sus efectos. Considera la aplicación de estrategias y medidas en elementos constructivos, en equipamientos y servicios, así como propone un método para la evaluación de la resiliencia de los edificios frente a inundaciones. También desde el Instituto Valenciano de la Edificación (IVE) o desde el Ministerio se han realizado guías descargables gratuitas para la implementación de medidas que incrementen la resiliencia de los edificios frente a inundaciones.

La localización de las edificaciones, la falta de aplicación de disposiciones específicas y la ausencia de diseño y/o correcta ejecución de soluciones constructivas adecuadas, así como la posible falta de mantenimiento, serían las causas más probables de los daños acontecidos. La solución provisional ha venido de la mano de la disposición de sistemas de bombeo (supermercado) o de la instalación de bombas individuales, siendo inviable la actuación en soleras y muros de sótano por el alto coste de las intervenciones. Resulta esencial el análisis de la evolución urbana, así como el análisis de la exposición y el nivel de riesgo frente a inundaciones para prevenir o evitar daños. También es aconsejable el uso de información disponible, como la cartografía específica existente o la información catastral, con el objetivo de aumentar la resiliencia urbana.

Análisis de la red de control piezométrico municipal

En mayo de 2021, el ayuntamiento de Bétera ejecutó la construcción de tres piezómetros de control en el entorno del centro del casco urbano, con el objetivo de controlar los niveles piezométricos locales. Dichos sondeos (S1, S2 y S3) conforman la actual red de piezometría del municipio, y su posición se muestra en la Figura 4. En la Figura 5 se muestra la evolución de la piezometría en estos tres piezómetros. Los registros de niveles piezométricos obtenidos a partir de los piezómetros que conforman la red municipal muestran un claro aumento de niveles en el periodo mayo 2021 – agosto 2022 para los tres piezómetros disponibles. La mayor variación se registró en el piezómetro S2, habiéndose registrado un aumento del nivel de 1,80 metros en el periodo analizado.

All the buildings analysed correspond to multi-family block typologies in height, between 3 and 5 floors and with one or two basement floors in some cases. The construction characteristics of these are coincidence, with structures based on reinforced concrete frames, unidirectional slabs, and foundations based on isolated footings under pillars and runs under basement walls and slabs.

It is significant in all cases the absence, on the one hand of specific construction details to resolve the waterproofing of joints and singular points, and, on the other, the absence of sanitary slabs or arrangement of ground floor heights at 80 cm above ground level, this level being established as the one where, according to PATRICOVA, the flood damage curve changes significantly. For this reason, the plan takes this height as a reference to define the risk levels and places the buildings above this height. None of the projects analysed refers to the design provisions established by the plan. It should be borne in mind that these are buildings whose projects predate the requirement for the application of the Technical Code approved in 2006, which requires the design to comply with the conditions regulated in section HS-1 (Protection against the humidity of the Basic Health Document). The Green Guide (A-11) also proposes some preventive measures to face floods or recover better from their effects. It considers the application of strategies and measures in construction elements, equipment and services, as well as proposes a method for assessing the resilience of buildings to floods. The Valencian Building Institute (IVE) and the Ministry have also produced free downloadable guides for the implementation of measures to increase the resilience of buildings to floods.

The location of the buildings, the lack of application of specific provisions and the absence of design and/or correct execution of adequate construction solutions, as well as the possible lack of maintenance, would be the most likely causes of the damage that occurred. The provisional solution has come from the provision of pumping systems (supermarket) or the installation of individual pumps, making it unfeasible to act on basement slabs and walls due to the high cost of the interventions. The analysis of urban evolution, as well as the analysis of the exposure and level of risk to floods, is essential to prevent or avoid damage. It is also advisable to use available information, such as existing specific cartography or cadastral information, to increase urban resilience.

Analysis of the municipal piezometric control network

In May 2021, the Bétera City Council carried out the construction of three control piezometers in the surroundings of the centre of the urban area, to control local piezometric levels. These boreholes (S1, S2 and S3) make up the current piezometry network of the municipality, and their position is shown in Figure 4. Figure 5 shows the evolution of piezometry in these three piezometers. The records of piezometric levels obtained from the piezometers that make up the municipal network show a clear increase in levels in the period May 2021 – August 2022 for the three piezometers available. The greatest variation was recorded in the piezometer S2, with an increase in the level of 1.80 meters in the period analysed.

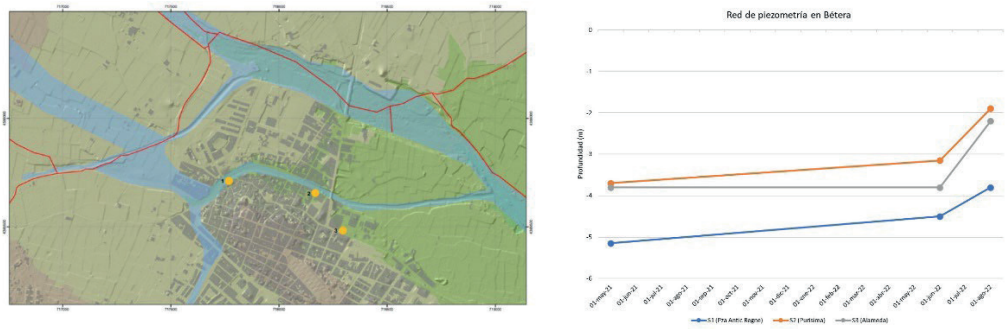


Figura 4. Niveles piezométricos registrados en los piezómetros de la red de control municipal de Bétera.
Figure 4. Piezometric levels were recorded in the piezometers of the municipal control network of Bétera.
Figura 5. Posición de los piezómetros existentes. Red de control piezométrico municipal.
Figure 5. Position of existing piezometers. Municipal piezometric control network.

Propuesta de actuaciones

A la vista de los resultados anteriores, se ha propuesto realizar dos actuaciones orientadas actuar de forma óptima ante episodios de ascensos del nivel freático como los observados.

La primera actuación consiste en ejecutar la ampliación de la red de control piezométrico municipal con tres nuevos piezómetros. El control periódico de la evolución de los niveles freáticos en el entorno de la Alameda de Bétera se plantea como la actuación de mayor relevancia a la hora de poder predecir con suficiente antelación la evolución de los niveles freáticos, proporcionando de este modo la información relevante con la que tomar decisiones y poder activar los protocolos de aviso ciudadano que se definan en el futuro. La posición de estos tres nuevos piezómetros ha sido determinada considerando los siguientes criterios:

• Ubicación en terrenos de propiedad municipal
• Minimización de afecciones al uso del espacio público
• Facilidad de implantación
• Facilidad de acceso para realizar la lectura periódica
• Facilidad de mantenimiento

Aplicación detallada en la actualización del PGOU de las determinaciones del PATRICOVA y elaboración de planimetría específica de detalle de nivel de riesgo con superposición de la cartografía catastral de modo que se proporcione información clara al ciudadano sobre el nivel de riesgo de inundabilidad en la zona de ubicación del solar o inmueble. En función del nivel de riesgo, se podrá limitar la construcción de sótanos, condicionar usos y actuaciones, así como exigir determinadas soluciones constructivas.

Además, considerando la posibilidad de que los episodios de ascenso de los niveles freáticos puedan ocurrir eventualmente de forma periódica se considera conveniente actualizar la legislación urbanística municipal (PGOU + licencias) mediante el requerimiento al interesado de documentación técnica complementaria a la actualmente requerida para la solicitud de licencia de obra mayor (OMA) o de licencia de obra menor (OME).

Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que la totalidad de edificaciones afectadas por los ascensos de los niveles freáticos observados en el casco urbano del municipio de Bétera en 2022 se sitúan en la zona de la Alameda (zona de cotas bajas). Dichos ascensos de nivel freático parecen no ser permanentes sino eventuales y, de acuerdo con la escasa información disponible, podrían explicarse como consecuencia de aportes laterales subterráneos extraordinarios o de infiltraciones altas procedentes de periodos de lluvia intensos, juntamente con una situación de bajas demandas de bombeo.

Todas las edificaciones afectadas disponen de sótanos y/o cajas de ascensor que se han visto afectadas por las filtraciones originadas por los ascensos del nivel freático. Se ha comprobado también que el diseño de las cimentaciones y muros de sótano no son idóneos para soportar situaciones en las que el nivel freático se sitúe por encima de las losas de garaje o cajas de ascensor, dado que dicho diseño no contempla el riesgo geomorfológico identificado en el PATRICOVA ni sus repercusiones a la hora de redactar los proyectos de las edificaciones afectadas.

La implementación de las actuaciones propuestas y la obtención de suficientes datos procedentes de la red de control piezométrica municipal se orienta a plantear el desarrollo de un Protocolo de Aviso Ciudadano ante posibles emergencias por ascensos de niveles freáticos.

Proposed actions

Given the above results, it has been proposed to carry out two actions aimed at acting optimally in the face of episodes of rising water table such as those observed. The first action consists of executing the expansion of the municipal piezometric control network with three new piezometers. The periodic control of the evolution of the water tables in the surroundings of the Alameda de Bétera is proposed as the most relevant action when it comes to being able to predict the evolution of the water tables well in advance, thus providing the relevant information with which to make decisions and to be able to activate the citizen warning protocols that are defined in the future. The position of these three new piezometers has been determined considering the following criteria:

- Location on municipally owned land
- Minimization of effects on the use of public space
- Ease of implementation
- Ease of access for periodic reading
- Ease of maintenance

Detailed application in the updating of the PGOU of the PATRICOVA determinations and preparation of specific detailed planimetry of the risk level with superimposition of the cadastral cartography so that clear information is provided to the citizen on the level of flood risk in the area where the plot or property is located. Depending on the level of risk, the construction of basements may be limited, uses and actions may be conditioned, as well as certain construction solutions may be required.

In addition, considering the possibility that episodes of rising water tables may eventually occur periodically, it is considered advisable to update the municipal urban planning legislation (PGOU + licenses) by requiring the interested party to provide technical documentation complementary to that currently required for the application for a major works license (OMA) or minor works license (OME).

Conclusions

The results obtained show that all the buildings affected by the rises in the water tables observed in the urban area of the municipality of Bétera in 2022 are in the Alameda area (low elevation area). These rises in the water table do not seem to be permanent but temporary and, according to the scarce information available, could be explained because of extraordinary underground lateral inputs or high infiltrations from periods of intense rainfall, together with a situation of low pumping demands. All the affected buildings have basements and/or elevator shafts that have been affected by the leaks caused by the rise in the water table. It has also been found that the design of the foundations and basement walls are not suitable to withstand situations in which the water table is above the garage slabs or elevator shafts since this design does not consider the geomorphological risk identified in the PATRICOVA or its repercussions when drafting the projects of the affected buildings. Implementing the proposed actions and obtaining sufficient data from the municipal piezometric control network is aimed at proposing the development of a Citizen Warning Protocol in the event of possible emergencies due to rising water tables.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- Instituto Valenciano de la Edificación, Guía para reforzar la resiliencia de los edificios frente a inundaciones. Valencia, Spain: IVE, 2020.
- D. Macdonald, A. Dixon, A. Newell and A. Hallaways, "Groundwater flooding within an urbanised flood plain", Journal of Flood Risk Management, vol. 5, no. 1, pp. 68-80, Oct. 2011, doi: 10.1111/j.1753318x.2011.01127.x
- Instituto Valenciano de la Edificación, Guía para reforzar la resiliencia de los edificios frente a inundaciones. Valencia, Spain: IVE, 2020.
- "Guías de adaptación al riesgo de inundación y criterios constructivos de nuevas edificaciones en zonas inundables". Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Gobierno de España. Accessed: Dec. 3, 2024. Available: https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de- los-riesgos-de-inundacion/usos-del-suelo-en-zonas-inundables/guias- adaptacion-riesgo-inundacion-criterios-constructivos.html
- A. Pérez-Morales, S. Gil-Guirado and J. Olcina, "La información catastral como herramienta para el análisis de la exposición al peligro de inundaciones en el litoral mediterráneo español", Revista EURE-Revista Latinoamericana de Estudios Urbano Regionales, vol. 42, no. 127, pp. 231-256, Sept. 2016, doi: 10.4067/S0250-71612016000300010
- Ayuntamiento de Bétera. Plan General de Ordenación Urbana de Bétera. Available: https://sig.betera.es/descargas_pgou/PGOU_Documentacion/
- CHJ, Informe de evolución de niveles piezométricos en la demarcación Hidrográfica del Júcar. Año hidrológico 2019/20. Confederación Hidrográfica del Júcar (2021). [Online]. Available: https://www.chj.es/es-es/medioambiente/redescontrol/Documents/Piezometr%C3%ADa/InformePiezometria_2021_22.pdf.

Agradecimientos/Acknowledgments

Los autores del estudio quieren agradecer la colaboración de los Servicios Técnicos municipales del Ayuntamiento de Bétera, quienes facilitaron su acceso al archivo municipal para consulta de expedientes de licencia y consulta de proyectos.

The authors of the study would like to thank the collaboration of the Municipal Technical Services of the City of Bétera, who facilitated their access to the municipal archive for consultation of license files and consultation of projects.

BIOCONSTRUCCIÓN Y BIOMATERIALES. MICELIO DE HONGOS, EL BIOMATERIAL SOSTENIBLE DEL FUTURO EN BIOARQUITECTURA

BIOCONSTRUCTION AND BIOMATERIALS: MYCELIUM FUNGUS: THE BIOARCHITURE SUSTAINABLE BIOMATERIAL OF THE FUTURE

Kamilia-Essamhi-Saidi
Arquitecta titulada por la Universidad Politécnica de Cartagena; Máster en prevención de riesgos laborales; y Máster en tecnología de edificación. E-mail: kamilia.essamhi@edu.upct.es
Architect graduated from the Polytechnic University of Cartagena; Master in labor risk Prevention; and Master in building technology. E-mail: kamilia.essamhi@edu.upct.es

Parra, Carlos J.
Dr. Arquitecto, Profesor Titular del área de Construcciones Arquitectónicas. Investigador Principal Grupo de I+D+I Ciencia y Tecnología Avanzada de Construcción (CTAC). Departamento de Arquitectura y Tecnología de Edificación. E-mail: carlos.parra@upct.es
PhD in Architecture, Associate Professor in the field of Architectural Construction. Principal Investigator of the R&D&I Group for Advanced Construction Science and Technology (CTAC). Department of Architecture and Building Technology. E-mail: carlos.parra@upct.es

Miñano, Isabel
Docente: ETSAE, Universidad Politécnica de Cartagena, España. Investigadora Doctora. Departamento de Arquitectura y Tecnología de la Edificación. Grupo de Ciencia y Tecnología Avanzada de Construcción. E-mail: isabel.minano@upct.es
Faculty Member: ETSAE, Polytechnic University of Cartagena, Spain. Doctoral Researcher. Department of Architecture and Building Technology. Advanced Construction Science and Technology Group. E-mail: isabel.minano@upct.es

Mateo, José María
Docente: ETSAE, Universidad Politécnica de Cartagena, España, josem.mateo@upct.es

Benito, Francisco J.
Director del Departamento de Innovación. URDECON (España), fjbenito@urdecon.es

Abstract

Due to the alarming growth rate of the human population, technological improvement is necessary to protect the environment from pollution. Current material production is not creating a circular economy, an economic model that seeks to produce goods and services sustainably, limiting consumption and waste of resources (raw materials, water, and energy). Mushroom-based compounds are a recently implemented technology that meets the economy circular concept. These compounds are made with a complex of fungal mycelium and organic substrates, using fungal mycelium as natural adhesive materials.

The quality of the compound depends on both the type of fungus and the substrate. To ensure the physicochemical properties of the manufactured composite, the mycelium morphology, bimolecular content, density, compressive strength, thermal stability, and hydrophobicity are determined. This compound has proven useful in various applications, such as packaging, architectural design, walls, and insulation. Furthermore, it has unique characteristics in terms of low cost, low emissions, and recyclability.

Keywords
Mycelium, Fungi, Biomaterials, Bioconstruction, Sustainable architecture, Biodegradable, Sustainability, Mycelium blocks, Mycelium incubation, Mycelium colonization, Mycelium hardness, Durability.

Introducción

El crecimiento poblacional y la rápida urbanización están impulsando una mayor demanda de materiales de construcción, lo que a su vez incrementa la generación de residuos y contaminación. Este escenario destaca la necesidad urgente de desarrollar tecnologías que puedan satisfacer estas demandas sin comprometer el medio ambiente ni agotar los recursos naturales. Una solución sostenible en este contexto es el uso de ladrillos biodegradables a base de micelio de hongo.

El micelio es una estructura vegetativa de los hongos, está compuesto por una red de filamentos denominados hifas, los cuales crecen y se entrelazan, actuando como un aglutinante natural. Esta red de filamentos tiene la capacidad de unir residuos y formar estructuras sólidas. Se alimenta de desechos como residuos agrícolas y subproductos orgánicos. El micelio de hongos no solo se convierte en biomaterial prometedor en la construcción sostenible, sino que también contribuye a la gestión de residuos, alineándose con los principios de la economía circular. El micelio utilizado en esta investigación se denomina Micelio de Ganoderma de segunda generación (G2) (Imagen 1).

- Ganoderma es una especie de hongo.
- La segunda generación (G2) indica que el micelio ha sido cultivado previamente con una mezcla de desechos, compuesta por madera de roble, castaño y pellet de cereal.

El objetivo principal de esta investigación es analizar y evaluar el micelio de hongos, un material avanzado y biodegradable, para su aplicación en el ámbito de la arquitectura. Para ello, se plantean varios objetivos específicos: en primer lugar, identificar las propiedades del micelio para comprender sus características físicas y químicas. A continuación, se trabajará en la manipulación y moldeo del micelio en laboratorio, desarrollando técnicas adecuadas para su control y producción. Además, se evaluarán sus propiedades mecánicas y su durabilidad, determinando así su resistencia y aplicabilidad en el campo arquitectónico. Finalmente, se explorará su uso y durabilidad en un proyecto experimental de arquitectura sostenible, un prototipo que se ubicará en el Centro de Interpretación de la Muralla Púnica (CIM) en Cartagena

Introduction

Population growth and rapid urbanization are driving an increased demand for construction materials, which in turn raises the generation of waste and pollution. This scenario highlights the urgent need to develop technologies that can meet these demands without compromising the environment or depleting natural resources. A sustainable solution in this context is the use of biodegradable bricks made from fungal mycelium.

Mycelium is a vegetative structure of fungi, composed of a network of filaments called hyphae, which grow and intertwine, acting as a natural binder. This network of filaments has the ability to bind waste and form solid structures. It feeds on waste such as agricultural residues and organic byproducts. Fungal mycelium not only becomes a promising biomaterial in sustainable construction, but also contributes to waste management, aligning with the principles of the circular economy. The mycelium used in this research is referred to as Second-Generation Ganoderma Mycelium (G2) (Image 1).

• Ganoderma is a species of fungus.
• Second generation (G2) indicates that the mycelium has been previously cultivated with a waste mixture, consisting of oak wood, chestnut, and cereal pellets.

The main objective of this research is to analyze and evaluate fungal mycelium, an advanced and biodegradable material, for its application in the field of architecture. To achieve this, several specific objectives are proposed: first, to identify the properties of mycelium in order to understand its physical and chemical characteristics. Next, work will be done on manipulating and molding mycelium in the laboratory, developing appropriate techniques for its control and production. Additionally, its mechanical properties and durability will be evaluated, determining its strength and applicability in the architectural field. Finally, its use and durability will be explored in an experimental sustainable architecture project, a prototype to be located at the Interpretation Center of the Punic Wall (CIM) in Cartagena.



Imagen 1. Micelio de ganoderma G2/ Image 1. Ganoderma mycelium G2

Metodología/ Methodology

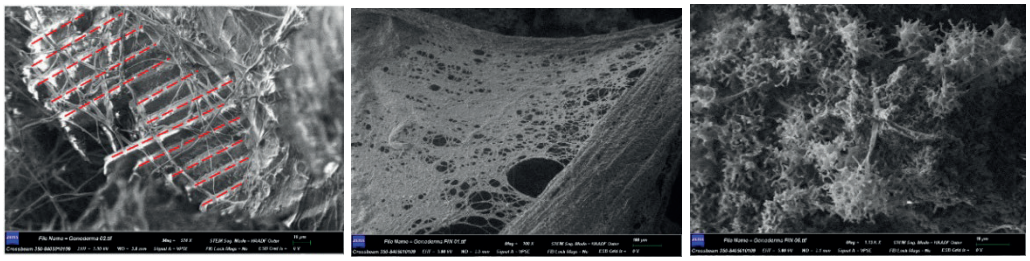
La metodología de estudio se ha centrado inicialmente en caracterizar la microestructura del micelio mediante microscopio electrónico de barrido (SEM). Posteriormente, se ha procedido a manipular, moldear y transformar el micelio en ladrillos biodegradables en el laboratorio de arquitectura UPCT.

The study methodology initially focused on characterizing the mycelium's microstructure using a scanning electron microscope (SEM). Subsequently, the mycelium was manipulated, molded, and transformed into biodegradable bricks in the UPCT architecture laboratory.

Caracterización microscópica de la estructura del micelio mediante (SEM)/ Microscopic characterization of the mycelium structure using SEM (Scanning Electron Microscopy).

El microscopio electrónico de barrido (SEM) permite obtener imágenes de alta resolución y realizar análisis composicionales que revelan detalles a microescala para observar la estructura detallada del micelio. Visualizar las hifas (filamentos que forman el micelio) y su organización tridimensional. Se analizaron placas Petri con micelio de Ganoderma entre el tercer y quinto día de incubación. Las imágenes SEM se obtuvieron utilizando diferentes escalas en micras (µm) para capturar detalles finos de la estructura (Imagen 2).

The scanning electron microscope (SEM) allows for high-resolution imaging and compositional analysis that reveal micro-scale details to observe the mycelium's detailed structure. It enables visualization of the hyphae (filaments that form the mycelium) and their three-dimensional organization. Petri dishes with Ganoderma mycelium were analyzed between the third and fifth day of incubation. SEM images were obtained using different scales in micrometers (µm) to capture fine details of the structure (Image 2).



formación de matriz/matrix formation formación de red/network formation Crecimiento de hifas/Hyphal growth

Imagen 2. Imagen microscópica SEM. Image 2. SEM microscopic image

Moldear y transformar el micelio en el laboratorio/ Molding and transforming the mycelium in the laboratory.

El micelio se divide en dos muestras para realizar experimentos bajo distintas condiciones de incubación, con el objetivo de optimizar su crecimiento y propiedades (Imagen 3):

- **Muestra A:** es utilizada para el contacto inicial y la manipulación preliminar del micelio. A su vez la muestra (A) de divide en tres subgrupos durante la fase de secado para experimentar distintas condiciones de incubación y secado.

Muestra B: se emplea para la optimización del proceso de producción de ladrillos de micelio.

The mycelium is divided into two samples to conduct experiments under different incubation conditions, with the goal of optimizing its growth and properties (Image 3):

• Sample A: is used for the initial contact and preliminary manipulation of the mycelium. Sample A is further divided into three subgroups during the drying phase to experiment with different incubation and drying conditions.

• Sample B: is used for optimizing the mycelium brick production process.

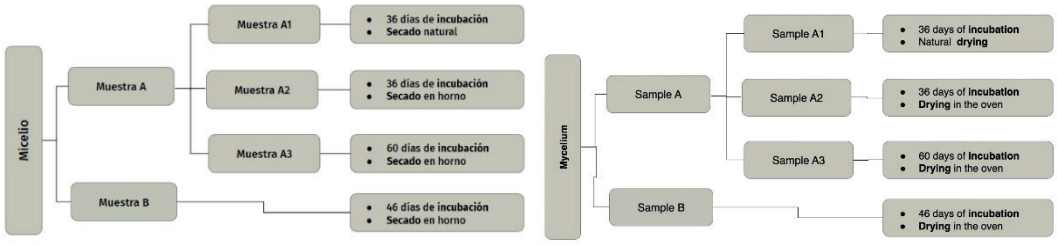


Imagen 3. Diagrama del proceso de manipulación del micelio. Image 3. Diagram of the mycelium manipulation process

El proceso de manejo del micelio en el laboratorio se desarrolla en cinco etapas principales / The mycelium handling process in the laboratory is carried out in five main stages:

1. **Moldeo de micelio/ Mycelium molding**

Para moldear las muestras, se emplean moldes de plástico rígido con dimensiones de 40x40x160 mm. Como se observa en la imagen 4, el sustrato se fragmenta en partículas lo más pequeñas posible para optimizar la colonización y distribución del micelio dentro de los bloques, facilitando así su compactación y mejorando la adherencia durante el proceso de colonización de micelio.

To mold the samples, rigid plastic molds with dimensions of 40x40x160 mm are used. As shown in Image 4, the substrate is fragmented into the smallest possible particles to optimize the colonization and distribution of the mycelium within the blocks, thus facilitating its compaction and improving adhesion during the mycelium colonization process.



Espacio de trabajo / Workspace Fragmentación/ Fragmentation Moldeo/ Molding

Imagen 4. Moldeo de bloques de micelio, muestra A y B. Image 4. Molding of mycelium blocks, sample A and B

2. **Incubación de micelio/ Mycelium incubation**

La incubación es un proceso clave en el desarrollo del micelio, ya que su crecimiento está influenciado directamente por las condiciones ambientales en las que se encuentra (Imagen 5). Para obtener resultados óptimos, es fundamental controlar cuatro factores críticos:

- **Humedad**: 90% para mantener el micelio hidratado y activo.
- **Temperatura:** El Ganoderma crece mejor a 26°C.
- **Intercambio gaseoso**: para la respiración del micelio.
- **Luminosidad:** El micelio debe desarrollarse en completa oscuridad.

Incubation is a key process in mycelium development, as its growth is directly influenced by the environmental conditions it is exposed to (Image 5). To achieve optimal results, it is essential to control four critical factors:

- Humidity: 90% to keep the mycelium hydrated and active.
- Temperature: Ganoderma grows best at 26°C.
- Gas exchange: for mycelium respiration.
- Light: Mycelium should develop in complete darkness.



Imagen 5. Incubación de micelio: muestra A y B. Image 5. Mycelium incubation: sample A and B.

3. Desmolde de los bloques/ Demold the blocks.

Los bloques se dejan incubar como mínimos, dos semanas (14 días) dentro del molde. Los bloques desmoldados presentan una capa de micelio blanco en la superficie expuesta, mientras que las áreas en contacto con el molde permanecen marrones, lo que indica la necesidad de continuar la colonización (Imagen 6).

Al desmoldarse la muestra A, se identificaron tres tipos de bloques: rígidos, frágiles y muy frágiles, según la presión aplicada durante el proceso de moldeo. Los bloques más compactos y resistentes fueron aquellos que recibieron mayor presión, mientras que los menos compactos resultaron frágiles. Por otro lado, de la muestra B se obtuvieron bloques de micelio compactos, homogéneos y uniformes en tamaño, aspecto y forma.

The blocks are left to incubate for a minimum of two weeks (14 days) inside the mold. The demolded blocks show a layer of white mycelium on the exposed surface, while the areas in contact with the mold remain brown, indicating the need to continue the colonization process (Image 6).

When demolding sample A, three types of blocks were identified: rigid, fragile, and very fragile, depending on the pressure applied during the molding process. The most compact and resistant blocks were those that received higher pressure, while the less compact ones turned out to be fragile. On the other hand, sample B produced compact, homogeneous mycelium blocks, uniform in size, appearance, and shape.

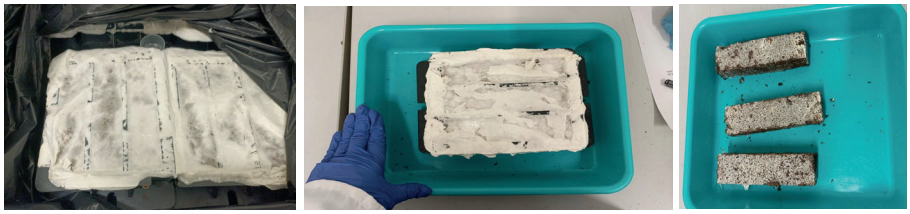


Imagen 6. Desmolde de los bloques, muestra A y B. Image 6. Unmolding of the blocks, sample A and B

4. Etapa"Out-in"/ "Out-in" stage

El proceso de "out-in" consiste en la extracción de la pieza del molde y su posterior reintroducción en una cámara húmeda para permitir que el micelio continúe su colonización. Según el tiempo de incubación, se pueden obtener diversos acabados, que varían desde superficies lisas hasta algodonosas o manchadas. Este periodo de incubación puede extenderse en función de las necesidades del proyecto, alcanzando incluso hasta seis meses (Imagen 7).

The "out-in" process involves removing the piece from the mold and subsequently reintroducing it into a humid chamber to allow the mycelium to continue its colonization. Depending on the incubation time, various finishes can be obtained, ranging from smooth surfaces to cotton-like or spotted textures. This incubation period can be extended according to the needs of the project, lasting up to six months (Image 7).



Muestra A / Sample A Muestra B / Sample B

Imagen 7. Resultado de la etapa"out-in", muestra A y B. Image 4. Result of the "out-in" stage, sample A and B.

5. Proceso de secado/ Drying process

El proceso de secado del micelio comienza cuando todas las caras de los bloques están cubiertas por la capa blanca, indicando que el micelio ha colonizado completamente la pieza. En este punto, es necesario detener el crecimiento del micelio y estabilizar el material. Para ello, es necesario secar el micelio, permitiendo que la pieza pierda aproximadamente el 75% de su peso inicial en estado fresco. Existen dos métodos principales para realizar el secado y concluir el proceso (Imagen 8):

Secado natural: Consiste en dejar la pieza en un lugar protegido de la lluvia, pero expuesto al sol y al flujo de aire, lo que permitirá un secado lento y gradual.

Secado con calor: Este método implica acelerar el proceso utilizando calor de un horno eléctrico. El tiempo de secado depende del peso, tamaño y cantidad de piezas introducidas en el horno.

En esta fase final de la investigación, la muestra A se divide en tres subgrupos (A1, A2 y A3) para experimentar con distintos métodos de secado mientras que la muestra B se somete a un proceso de secado completo en su totalidad.

Muestra A1: Tras 36 días de incubación se dejan cuatro bloques expuestos al sol y al aire para un secado natural. Se consigue un secado gradual donde el micelio mantiene su color blanco.

Muestra A2: También con 36 días de incubación se somete a un secado acelerado mediante hornos eléctricos a temperatura controlada de 100ºC, se logra una deshidratación rápida pero afecta al color y a la textura de los bloques.

Muestra A3: Se prolonga su incubación a 60 días, luego se somete a un secado en horno a 140ºC. Estos bloques de micelio muestran una estructura bastante compacta y una superficie lisa.

Muestra B: Se deja 46 días en incubación, se somete a un secado artificial en horno a 140ºC durante dos horas. Los bloques resultantes están muy unidos y tienen, una mezcla de colores.

The drying process of the mycelium begins when all the faces of the blocks are covered by the white layer, indicating that the mycelium has completely colonized the piece. At this point, it is necessary to stop the growth of the mycelium and stabilize the material. To achieve this, the mycelium must be dried, allowing the piece to lose approximately 75% of its initial fresh weight. There are two main methods for drying and completing the process (Image 8):

Natural drying: This method involves leaving the piece in a place protected from rain but exposed to the sun and air flow, allowing for slow and gradual drying.

Heat drying: This method accelerates the process by using heat from an electric oven. The drying time depends on the weight, size, and number of pieces placed in the oven.

In this final phase of the research, sample A is divided into three subgroups (A1, A2, and A3) to experiment with different drying methods, while sample B undergoes a complete drying process.

Sample A1: After 36 days of incubation, four blocks are left exposed to the sun and air for natural drying. A gradual drying process is achieved, where the mycelium retains its white color.

Sample A2: Also, after 36 days of incubation, the blocks undergo accelerated drying using electric ovens at a controlled temperature of 100ºC. This results in rapid dehydration but affects the color and texture of the blocks.

Sample A3: The incubation period is extended to 60 days, followed by drying in an oven at 140ºC. These mycelium blocks show a fairly compact structure and a smooth surface.

Sample B: Left for 46 days of incubation, it undergoes artificial drying in an oven at 140ºC for two hours. The resulting blocks are tightly bound and have a mix of colors.



Muestra A1/ Sample A1 Muestra A2/ Sample A2 Muestra A3/ Sample A3 Muestra B/ Sample B

Imagen 8. Resultado del proceso de secado. Image 8. Result of the Drying Process

Ensayos realizados/ Tests conducted

Se han realizado ensayos de dureza para la muestra A utilizando dos tipos de durómetros.

- **Durómetro Shore A:** diseñado para materiales blandos
- **Durómetro Shore D:** diseñado para materiales duros.

También se ha realizado ensayos de compresión de los bloques de la muestra A con una prensa hidráulica

Hardness tests were conducted on sample A using two types of durometers:

- Shore A durometer: designed for soft materials
- Shore D durometer: designed for hard materials.

Compression tests were also performed on the blocks of sample A using a hydraulic press.

Resultados/ Results

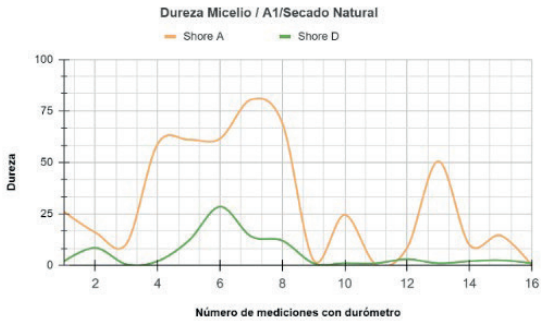
Evaluación de Dureza de los bloques

Los durómetros miden la resistencia del material a la penetración, con una escala de 0 a 100 (HA o HD) representada en el eje vertical (y). Se realizaron 16 mediciones por muestras, representada en el eje horizontal (x) (Graficas 1 y 2). La variabilidad en los resultados indica diferencias significativas en la dureza dentro de la misma muestra. Aunque algunas áreas muestran baja resistencia también se observan zonas rígidas de alta resistencia, como en la toma 7 de la muestra A1, que alcanza los 80.5 HA. Esto indica que, mejorando la uniformidad en el proceso de producción de los bloques, se podría lograr una mayor consistencia y resistencia. Los valores promedio muestran una dureza alta de la muestra A3 frente a A1 y A2, con 52,3 en Shore A y 11,8 en Shore D, mientras que las muestras A1 y A2 no se diferencian en dureza (ver tabla 1).

Hardness Evaluation of the Blocks

The durometers measure the material's resistance to penetration, with a scale from 0 to 100 (HA or HD) represented on the vertical axis (y). Sixteen measurements were taken per sample, represented on the horizontal axis (x) (Graphs 1 and 2). The variability in the results indicates significant differences in hardness within the same sample. While some areas show low resistance, rigid areas of high resistance are also observed, such as measurement 7 of sample A1, which reaches 80.5 HA. This suggests that by improving the uniformity in the block production process, greater consistency and resistance could be achieved. The average values show a high hardness for sample A3 compared to A1 and A2, with 52.3 in Shore A and 11.8 in Shore D, while samples A1 and A2 do not differ significantly in hardness (see Table 1).

Grafica 1. Dureza de bloques, secado natural.
Graph 1. Hardness of blocks, natural drying



Grafica 2. Dureza de bloques, secado en horno.
Graph 2. Block Hardness, Oven Drying

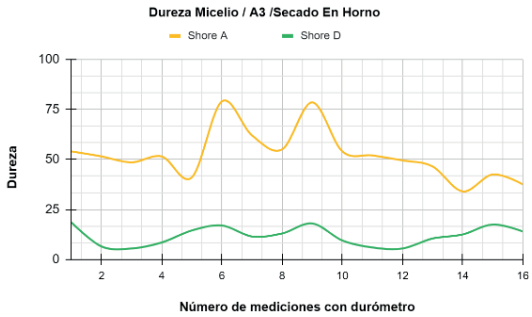


Tabla 1 Promedio de durezas muestra A.Table 1 Average hardness of sample A

MUESTRA/ AGGREGATE	Media ShoreA/ Media Shore A	Media ShoreD/ Media Shore D
A1	30,9	5,8
A2	31,8	3,8
A3	52,3	11,8

Análisis de la resistencia mecánicas.

Los ensayos de compresión de los bloques de micelio mostraron una presión máxima de 8,25 MPa (Imagen 9). Este valor supera la resistencia típica de un ladrillo convencional, que es aproximadamente 5 MPa. Esto indica que, aunque la resistencia a compresión del micelio es moderada, se encuentra dentro de un rango aceptable y se aproxima a los valores característicos de ciertos materiales cerámicos. Durante el ensayo, se observó que las muestras presentaban un comportamiento esponjoso, lo que evidenció la existencia de porosidad en los bloques. Estas características combinadas con su estructura ligera resaltan el potencial del material en aplicaciones específicas como aislante térmico y acústico.

Analysis of Mechanical Strength

The compression tests on the mycelium blocks showed a maximum pressure of 8.25 MPa (Image 9). This value exceeds the typical strength of a conventional brick, which is approximately 5 MPa. This indicates that, while the mycelium's compression strength is moderate, it is within an acceptable range and approaches the characteristic values of certain ceramic materials. During the test, it was observed that the samples exhibited a spongy behavior, highlighting the porosity in the blocks. These characteristics, combined with their lightweight structure, emphasize the potential of the material in specific applications such as thermal and acoustic insulation.

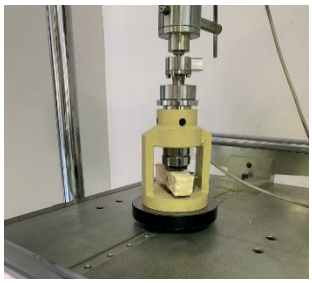


Imagen 9. Ensayo de compresión muestra A.
Image 9. Compression Test Sample A

Proyecto experimental/ Experimental Project

El objetivo final de este trabajo es investigar el potencial del micelio en aplicaciones arquitectónicas. Aunque el desarrollo de este tipo de material se encuentra aún en una fase experimental, los resultados obtenidos hasta el momento, especialmente en términos de resistencia y

propiedades observadas, permiten la realización de pequeñas construcciones que, por ahora, son más experimentales que funcionales. Se propone la construcción de una pirámide hecha con bloques de micelio, para evaluar su funcionalidad y durabilidad. El prototipo se ubicará en un espacio público como es el Centro de Interpretación de la Muralla Púnica (CIM) en Cartagena (Imagen 10).

The final objective of this work is to investigate the potential of mycelium in architectural applications. Although the development of this material is still in an experimental phase, the results obtained so far, especially in terms of strength and observed properties, allow for the construction of small structures that, for now, are more experimental than functional. A pyramid made of mycelium blocks is proposed to evaluate its functionality and durability. The prototype will be located in a public space, specifically at the Interpretation Center of the Punic Wall (CIM) in Cartagena (Image 10).



Imagen 10. Proyecto Experimental: Pirámide Hueca.
Image 10. Experimental Project: Hollow Pyramid

Conclusiones

- El estudio mediante SEM ha permitido visualizar cómo el micelio se integra con el sustrato del que se alimenta para formar un nuevo material sólido, cuyas propiedades mecánicas pueden ser manipuladas y optimizadas
- Los bloques de micelio conseguidos destacan por su ligereza y capacidad de ser compostables. Sin embargo, los ensayos de dureza y compresión muestran una resistencia globalmente baja, evidenciando un considerable margen de mejora.
- las propiedades del micelio pueden ajustarse modificando factores como el tipo de hongo, el sustrato utilizado y las condiciones de incubación. Estos ajustes permiten optimizar la densidad, resistencia y durabilidad de los bloques de micelio.
- Es un biomaterial biodegradable, de bajo impacto ambiental, que puede ser moldeado y aplicado en diversas soluciones arquitectónicas.
- El micelio tiene el potencial de transformar la arquitectura sostenible, proporcionando un material que no solo es ecológico, sino también estéticamente versátil y funcional.
- El micelio, aún poco explorado, ofrece grandes ventajas y un enorme potencial para la innovación, por lo que hay continuar con esta línea de investigación, hasta encontrar el producto ideal con las mejores características posibles.

Conclusions

- The study using SEM has allowed us to visualize how the mycelium integrates with the substrate it feeds on to form a new solid material, whose mechanical properties can be manipulated and optimized.
- The mycelium blocks achieved stand out for their lightness and compostability. However, the hardness and compression tests show generally low resistance, highlighting a considerable margin for improvement.

- The properties of the mycelium can be adjusted by modifying factors such as the type of fungus, the substrate used, and the incubation conditions. These adjustments allow for the optimization of the density, strength, and durability of the mycelium blocks.
- It is a biodegradable biomaterial with a low environmental impact that can be molded and applied in various architectural solutions.
- Mycelium has the potential to transform sustainable architecture, providing a material that is not only eco-friendly but also aesthetically versatile and functional.
- Mycelium, still underexplored, offers significant advantages and enormous potential for innovation, and therefore, this line of research should continue until the ideal product with the best possible characteristics is found.

AGRADECIMIENTOS:
Este trabajo forma parte de las actividades de formación, divulgación y difusión para fomentar el intercambio de conocimiento en economía circular en el marco del sector de la construcción del proyecto titulado: ECOSISTEMA DE INNOVACIÓN DE ECONOMÍA CIRCULAR EN EL MARCO DEL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN (ECONOVA-MSC), Expediente EXP - 00167108 / ECO-20241015 y financiado por CENTRO PARA EL DESARROLLO TECNOLÓGICO INDUSTRIAL (CDTI).

This work is part of the training, dissemination, and outreach activities aimed at promoting the exchange of knowledge on circular economy within the construction sector, as part of the project titled: CIRCULAR ECONOMY INNOVATION ECOSYSTEM WITHIN THE CONSTRUCTION SECTOR (ECONOVA-MSC), File EXP - 00167108 / ECO-20241015, and funded by the CENTRE FOR THE DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY (CDTI).

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- Dueñas N. (2024) Biofabricación con micelio de hongos | MICOTECTURA [hotmart] https://micomaterial.club.hotmart.com/lesson
- Conde, I. (2021) "BIOCOMPUESTOS DE MICELIO Y SUS POSIBLES APLICACIONES EN LA ARQUITECTURA" https://uvadoc.uva.es/handle/10324/50464
- Fuentes-Cantillana, I. (junio, 2020). "Bio Fabricación. Micelio como material de construcción: biocomposite en sustratos lignocelulósicos" https://oa.upm.es/63507/
- Rejeesh CR (junio,2022). Packaging Applications of Fungal Mycelium-Based Biodegradable Composites. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/360079915_Packaging_Applications_of_Fungal_Mycelium-Based_Biodegradable_Composites?enrichId=rgreq-af680f3ef4f5339dac01fb8391e445b3-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzM2MDA3OTkxNTtBUzoxMTcyNzA4NDIzNDE3ODU2QDE2NTY2MDY4ODQwNDc%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf
- Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Carrera de Diseño. (Material biobasado, compuesto del micelio del hongo Trametes Versicolor y cáscaras de nuez Juglans Regia)
- Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., & John, S. (2020). Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. Materials & Design, 187, 108397. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108397

LA FIBRA DE COCO EN MATRIZ DE MORTERO

COCONUT FIBRE IN MORTAR MATRIX

Gina Isabel San Andrés Zevallos
Profesora investigadora de la Universidad San Gregorio de Portoviejo, Ecuador. Profesora titular en la Carrera de Arquitectura. Ingeniera civil, Máster en Gestión Ambiental, Doctora en Investigación de Ciudades y Paisaje por la Universidad de Basilicata, Italia. E-mail: gisanandres@sangregorio.edu.ec
Research professor at the San Gregorio University, Portoviejo, Ecuador. Full professor in the Architecture Department. Civil Engineer, Master's in Environmental Management, PhD. in Research on Cities and Landscape by the University of Basilicata, Italy. E-mail: gisanandres@sangregorio.edu.ec

Javier Chonillo Portés
Profesor investigador de la Universidad San Gregorio de Portoviejo, Ecuador. Arquitecto. Máster en Planificación Territorial y Gestión Ambiental (UB), Máster en Arquitectura Avanzada (UPV). E-mail: jchonillo@sangregorio.edu.ec
Research professor at the San Gregorio University, Portoviejo, Ecuador. Architect. Master's in Territorial Planning and Environmental Management, Master's in Advanced Architecture. E-mail: jchonillo@sangregorio.edu.ec

Joseph Jamil Cedeño Palacios
Estudiante de Arquitectura de la Universidad San Gregorio de Portoviejo, Ecuador. E-mail: e.jjcedeno3@sangregorio.edu.ec
Architecture Student USGP, Ecuador. E-mail: e.jjcedeno3@sangregorio.edu.ec

Melina Merislexi Villacreses López
Estudiante de Arquitectura de la Universidad San Gregorio de Portoviejo, Ecuador. E-mail: e.mmvillacreses@sangregorio.edu.ec
Architecture Student USGP, Ecuador. E-mail: e.mmvillacreses@sangregorio.edu.ec

Resumen

En Ecuador, los residuos de coco representan una problemática persistente, especialmente en los cantones de Rocafuerte y Portoviejo. Debido a la falta de un manejo adecuado y clasificación de estos residuos, la mayoría de ellos terminan depositados en rellenos sanitarios o son incinerados. Los estudios sobre las características de los residuos de coco y su uso en diversas matrices de materiales compuestos han evidenciado la capacidad de la fibra de coco para optimizar las características mecánicas, térmicas y acústicas en nuevos materiales compuestos.

En base a esto, se planteó investigar de manera experimental la incorporación de fibra de coco en la matriz de mortero, se propone la incorporación de la fibra en la matriz compuesta de: cemento, arena, agua y fibra de coco, con una dosificación 1:3. Siendo las variables la longitud y dosificación de la fibra. Entre los principales resultados se identificó la aportación de la fibra de coco en la resistencia a la flexión.

Palabras Clave

Fibra de coco, morteros, resistencia mecánica, material compuesto.

Abstract

In Ecuador, coconut waste is a persistent problem, especially in the cantons of Rocafuerte and Portoviejo. Due to the lack of adequate management and classification of these wastes, most of them end up in landfills or are incinerated. Studies on the characteristics of coconut waste and its use in various composite material matrices have shown the capacity of coconut fibre to optimise the mechanical, thermal and acoustic characteristics of new composite materials.

Based on this, it was proposed to experimentally investigate the incorporation of coconut fibre in the mortar matrix, the incorporation of the fibre in the matrix composed of: cement, sand, water and coconut fibre, with a dosage of 1:3. The variables being studied are the length and dosage of the fibre. Among the main results, the contribution of coconut fibre in the flexural strength was identified.

Keywords

Coconut fibre, mortars, mechanical strength, composite material.

Introducción

La gestión de residuos agroindustriales, como los generados por la producción de coco en la provincia de Manabí, Ecuador, representa un desafío significativo debido a la ausencia de estrategias eficientes de valorización. En los cantones de Rocafuerte, Portoviejo y Manta, [1] [7] [10] [13], la mayor parte de estos desechos, compuestos principalmente por fibra y endocarpio, son eliminados sin un aprovechamiento óptimo. Estudios han caracterizado sus propiedades morfológicas, físicas, químicas y térmicas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), fluorescencia de rayos X (FRX), termogravimetría (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC); para identificar la estructura, composición, comportamiento mecánico y térmico de la fibra, estableciendo su idoneidad para aplicaciones en matrices de materiales compuestos como cementarías y poliméricas [6] [9] [8] [12]. La integración de estos residuos en materiales de construcción puede contribuir a la reducción del impacto ambiental, mejorar propiedades mecánicas y fomentar un modelo de economía circular en el sector.

Esta investigación se enfocó en evaluar experimentalmente la incorporación de la fibra de coco en el mortero de cemento, con el objetivo de analizar su influencia en la resistencia a la flexión y compresión. Para ello, se llevaron a cabo distintos procesos de preparación, tratamiento y ensayo de muestras, explorando cómo la variación en la cantidad y longitud de la fibra afecta las características finales de los materiales.

Introduction

The management of agro-industrial waste, such as that generated by coconut production in Manabí, Ecuador, represents a significant challenge due to the absence of efficient valorisation strategies. In the cantons of Rocafuerte, Portoviejo and Manta, [1] [7] [10] [13], most of these wastes, mainly composed of fibre and endocarp, are disposed of without optimal utilisation. Studies have characterised their morphological, physical, chemical and thermal properties by scanning electron microscopy (SEM), X-ray fluorescence (XRF), thermogravimetry (TGA) and differential scanning calorimetry (DSC); to identify the structure, composition, mechanical and thermal behaviour of the fibre, establishing its suitability for applications in composite matrices such as cementitious and polymeric materials [6] [9] [8] [8] [12]. The integration of these wastes into construction materials can contribute to the reduction of environmental impact, improve mechanical properties and foster a circular economy model in the sector.

This research focused on experimentally evaluating the incorporation of coconut fibre in cement mortar, with the aim of analysing its influence on flexural and compressive strength. For this purpose, different sample preparation, treatment and testing processes were carried out, exploring how the variation in the amount and length of the fibre affects the final characteristics of the materials.

Plan Experimental

Materiales:

- Fibra de coco.

Las muestras de las fibras para la caracterización de las propiedades físicas, químicas, mecánicas, térmicas y morfológicas provienen de los tipos de coco: Manila, Manilón, Híbrido y Criollo, tomadas aleatoriamente. En la caracterización morfológica, la fibra de coco tiene una estructura escamosa con formaciones internas tubulares yuxtapuestas e hileras de copos de silicio. Fig.1 Sus propiedades físicas incluyen una longitud media de 196 mm (±1 mm), diámetro promedio de 0.31 mm (±0.08 mm) y un peso específico de 0.69 g/cm³. Mecánicamente, alcanza una resistencia a la tracción de 228 MPa (±99 MPa) y un módulo de elasticidad de 3.03 GPa (±0.26 GPa), [11] características que la hacen viable para refuerzos en materiales compuestos. [4]

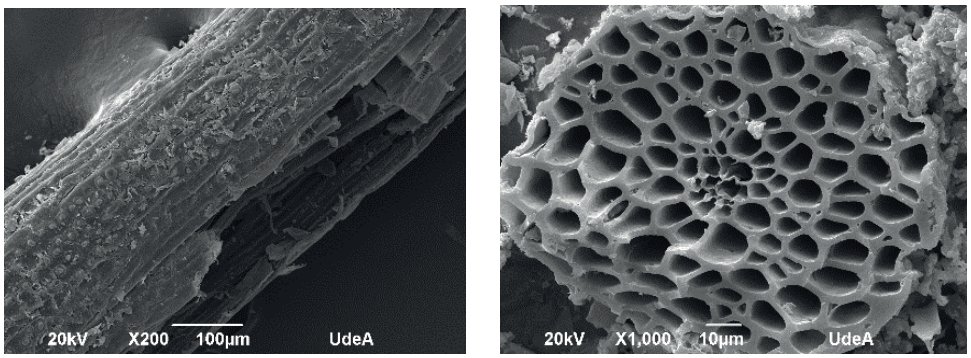


Fig. 1 Imágenes del SEM, fibra de coco. [11]

En términos térmicos, el análisis TGA indica una degradación progresiva de la fibra, con pérdidas de humedad del 3% a 63 °C, degradación de la hemicelulosa en un 15% a 273 °C y descomposición de la celulosa en un 35% a 330 °C. El análisis DSC muestra un flujo endotérmico hasta los 400 °C, con picos térmicos a 153 °C y 224 °C, lo que evidencia la presencia de material amorfo y una transición de fase de sólido a gas a 14.4 W/g. [11]

El análisis FRX revela la presencia de óxidos como CaO, SiO_2, SO_3, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, P_2O_5 y K_2O, con mayor concentración en muestras calcinadas a 600 °C y 650 °C. [11] Estos componentes inorgánicos sugieren un alto potencial para su integración en materiales cementicios. Su combinación de resistencia mecánica, estabilidad térmica y baja densidad la convierte en una alternativa sostenible para la industria de la construcción y el desarrollo de materiales avanzados. [11]

- Cemento.

Se identificó la composición química del cemento Gu, Tabla 1, que se utilizó para las muestras el mortero con fibra de coco; el ensayo de Fluorescencia de rayos X (FRX) con el equipo Thermi ARL Optim´XWDXRF, es un tipo de análisis semicuantitativo con el software Uniquant y las condiciones del análisis fueron, humedad 41% y temperatura 24.7 ºC, el peso de la masa analizada 18000mg.

- Arena.

Respecto a los agregados finos utilizados para la mezcla de mortero más fibra de coco, se procedió a realizar los ensayos de granulometría, Tabla 2, obteniendo además la curva granulométrica Fig. 2. Además, se determinó la densidad y absorción de agua del agregado fino, Tabla 3.

Compound	Wt%	Est.Error	Element	Wt%	Est.Error
CaO	64.77	0.24	Ca	46.31	0.17
SiO2	11.06	0.16	Si	5.17	0.07
SO3	2.86	0.08	Sx	1.15	0.03
Al2O3	2.61	0.08	Al	1.38	0.04
Fe2O3	1.78	0.07	Fe	1.25	0.05
MgO	0.891	0.044	Mg	0.537	0.027
P2O5	0.241	0.012	Px	0.105	0.0053
K2O	0.143	0.0071	K	0.119	0.0059
TiO2	0.116	0.0058	Ti	0.0695	0.0035
SrO	0.0838	0.0042	Sr	0.0709	0.0035
MnO	0.0543	0.0027	Mn	0.0420	0.0021
BaO	0.0419	0.0086	Ba	0.0375	0.0077
CuO	0.0313	0.0030	Cu	0.0250	0.0024
Cr2O3	0.0209	0.0020	Cr	0.0143	0.0013
ZnO	0.0188	0.0009	Zn	0.0151	0.0008
Cl	0.0178	0.0021	Cl	0.0178	0.0021
PuO2	0.0158	0.0035	Pu	0.0139	0.0031
V2O5	0.0143	0.0023	V	0.0080	0.0013
NiO	0.0116	0.0010	Ni	0.0091	0.0008
Sc2O3	0.0032	0.0025	Sc	0.0021	0.0016
ZrO2	0.0028	0.0016	Zr	0.0021	0.0012

Known Concentration = 15,21 LOI
Sum Weight% before normalization to 100% = 91.5 %
Total Weight% Oxygen = 28,45

Tabla 1. Composición química de cemento Portland.

Tamiz		Retenido	Retenido	Retenido	Pasante
INEN	ASTM	Parcial (g)	Parcial (%)	Acumulado (%)	Acumulado (%)
9,50 mm	3/8 in.	0.0	0	0	100
4,75 mm	No. 4	2.8	0	0	100
2,36 mm	No. 8	64.1	7	7	93
1,18 mm	No. 16	113.1	12	18	82
600 µm	No. 30	76.9	8	26	74
300 µm	No. 50	81.0	8	35	65
150 µm	No. 100	533.3	55	89	11
Bandeja		103.3	11	100	0
Masa final (g):	974.5		Módulo de Finura :	1.76	
Pérdida ≤0.3%	Ensayo válido				

Tabla 2. Granulometría agregado fino.

Agregado Fino Densidad y Absorción de Agua — KMAT-H00-RC07

Planta: Picoazá

Fecha	Muestra	Origen	A g	B g	S g	C g	Ds kg/m³	Dsss kg/m³	D kg/m³	Po %	Hecho Por
11-04-22	Megamezcla	Picoaza	485.2	651.6	500	958.1	2501	2578	2708	3.1	César Mora

Nomenclatura Según INEN 856

A:	Masa en el aire de la muestra secada al horno
B:	Masa del matraz lleno de agua hasta la marca de calibración
S:	Masa en el aire de la muestra en estado saturado superficialmente seco
C:	Masa del matraz con la muestra lleno de agua hasta la marca de calibración
Ds:	Densidad de Volumen a 23 C del árido fino seco
Dsss:	Densidad de Volumen a 23 C del árido fino en estado saturado superficialmente seco
D:	Densidad aparente del árido fino a 23 C
Po:	Porcentaje de absorción de agua del árido fino

Tabla 3. Densidad y absorción de agua.

Experimental Plan

Materials:

- Coconut fibre.

The fibre samples for the characterisation of physical, chemical, mechanical, thermal and morphological properties came from the following types of coconut: Manila, Manilon, Hybrid and Criollo, taken at random. In the morphological characterisation, the coconut fibre has a flaky structure with juxtaposed tubular internal formations and rows of silica flakes. Fig.1 Its physical properties include an average length of 196 mm (±1 mm), average diameter of 0.31 mm (±0.08 mm) and a specific weight of 0.69 g/cm³. Mechanically, it achieves a tensile strength of 228 MPa (±99 MPa) and a modulus of elasticity of 3.03 GPa (±0.26 GPa), [11] characteristics that make it viable for reinforcement in composite materials. [4]

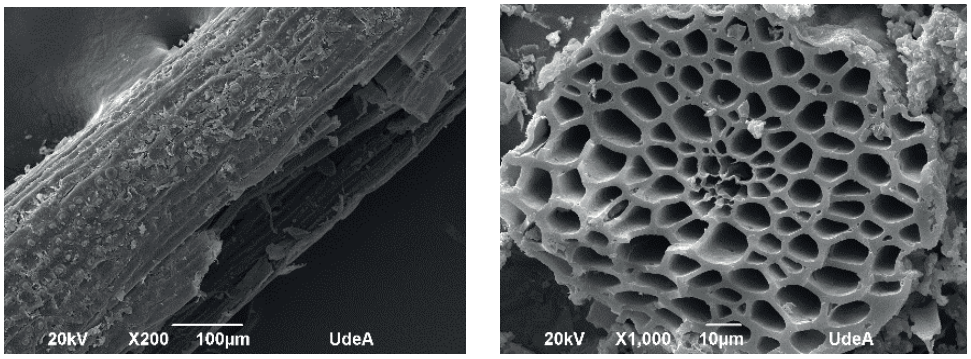


Fig. 1 SEM images, coconut fibre. [11]

In thermal terms, TGA analysis indicates a progressive degradation of the fibre, with moisture losses of 3% at 63 °C, hemicellulose degradation by 15% at 273 °C and cellulose decomposition by 35% at 330 °C. DSC analysis shows endothermic flow up to 400 °C, with thermal peaks at 153 °C and 224 °C, evidencing the presence of amorphous material and a solid-to-gas phase transition at 14.4 W/g. [11]

XRF analysis reveals the presence of oxides such as CaO, SiO_2, SO_3, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, P_2O_5 and K_2O, with higher concentration in samples calcined at 600 °C and 650 °C. [11] These inorganic components suggest a high potential for integration into cementitious materials. Its combination of mechanical strength, thermal stability and low density makes it a sustainable alternative for the construction industry and the development of advanced materials. [11]

- Cement

The chemical composition of Gu cement was identified, Table 1, which was used for the coconut fibre mortar samples; the X-ray Fluorescence (XRF) test with the Thermi ARL Optim'XWDXRF equipment is a type of semi-quantitative analysis with Uniquant software and the analysis conditions were 41% humidity and temperature 24.7 ºC, the weight of the mass analysed was 18000mg.

- Sand

Regarding the fine aggregates used for the mortar mix plus coconut fibre, the granulometry tests were carried out, Table 2, also obtaining the granulometric curve Fig. 2. In addition, the density and water absorption of the fine aggregate were determined, Table 3.

Compound	Wt%	Est.Error	Element	Wt%	Est.Error
CaO	64.77	0.24	Ca	46.31	0.17
SiO2	11.06	0.16	Si	5.17	0.07
SO3	2.86	0.08	Sx	1.15	0.03
Al2O3	2.61	0.08	Al	1.38	0.04
Fe2O3	1.78	0.07	Fe	1.25	0.05
MgO	0.891	0.044	Mg	0.537	0.027
P2O5	0.241	0.012	Px	0.105	0.0053
K2O	0.143	0.0071	K	0.119	0.0059
TiO2	0.116	0.0058	Ti	0.0695	0.0035
SrO	0.0838	0.0042	Sr	0.0709	0.0035
MnO	0.0543	0.0027	Mn	0.0420	0.0021
BaO	0.0419	0.0086	Ba	0.0375	0.0077
CuO	0.0313	0.0030	Cu	0.0250	0.0024
Cr2O3	0.0209	0.0020	Cr	0.0143	0.0013
ZnO	0.0188	0.0009	Zn	0.0151	0.0008
Cl	0.0178	0.0021	Cl	0.0178	0.0021
PuO2	0.0158	0.0035	Pu	0.0139	0.0031
V2O5	0.0143	0.0023	V	0.0080	0.0013
NiO	0.0116	0.0010	Ni	0.0091	0.0008
Sc2O3	0.0032	0.0025	Sc	0.0021	0.0016
ZrO2	0.0028	0.0016	Zr	0.0021	0.0012

Known Concentration = 15,21 LOI
Sum Weight% before normalization to 100% = 91.5 %
Total Weight% Oxygen = 28,45

Table 1. Chemical composition of Portland cement.

Tamiz	891	Retenido	Retenido	Retenido	Pasante
INEN	ASTM	Parcial (g)	Parcial (%)	Acumulado (%)	Acumulado (%)
9,50 mm	3/8 in.	0.0	0	0	100
4,75 mm	No. 4	2.8	0	0	100
2,36 mm	No. 8	64.1	7	7	93
1,18 mm	No. 16	113.1	12	18	82
600 µm	No. 30	76.9	8	26	74
300 µm	No. 50	81.0	8	35	65
150 µm	No. 100	533.3	55	89	11
Bandeja		103.3	11	100	0
Masa final (g):	974.5		Módulo de Finura :	1.76	
Pérdida ≤0.3%	Ensayo válido				

Table 2. Granulometry of fine aggregate.

Agregado Fino Densidad y Absorción de Agua KMAT-H00-RC07

Planta: Picoazá

Fecha	Muestra	Origen	A g	B g	S g	C g	Ds kg/m³	Dsss kg/m³	D kg/m³	Po %	Hecho Por
11-04-22	Megamezcla	Picoaza	485.2	651.6	500	958.1	2501	2578	2708	3.1	César Mora

Nomenclatura Según INEN 856

A:	Masa en el aire de la muestra secada al horno
B:	Masa del matraz lleno de agua hasta la marca de calibración
S:	Masa en el aire de la muestra en estado saturado superficialmente seco
C:	Masa del matraz con la muestra lleno de agua hasta la marca de calibración
Ds:	Densidad de Volumen a 23 C del árido fino seco
Dsss:	Densidad de Volumen a 23 C del árido fino en estado saturado superficialmente seco
D:	Densidad aparente del árido fino a 23 C
Po:	Porcentaje de absorción de agua del árido fino

Table 3. Density and water absorption.

Proceso de elaboración de la matriz de mortero

El desarrollo del mortero se llevó a cabo en tres fases:

Fase 1: Limpieza. El proceso de limpieza y secado, para favorecer la adherencia de la fibra a los compuestos del mortero, consistió en limpiar la fibra con agua, luego es sumergida por 48h en una solución acuosa de hidróxido de sodio de 1,6 mol/l; las fibras resultantes se vuelven a sumergir en una solución con ácido acético 100ml por 4h., una vez limpia la fibra se esparce en una superficie seca y libre, expuesta al sol por 48h aproximadamente. [2] [6]. Para culminar el proceso de secado y eliminar la humedad, la fibra ingresa al horno a 100ºC por 48 h. La fibra debe quedar libre de impurezas para proceder a cortarla en tres longitudes diferente 1cm, 3cm y 5cm.

Fase 2: Dosificación. El mortero más fibra de coco, está compuesto por el cemento Portland, agregado fino con una combinación de arena homogenizada y arena de duna, más agua, la dosificación de la base del mortero es 1:3 y la relación agua/cemento de 0.5, además la incorporación de la fibra se la propone en tres proporciones en función del peso del cemento, a 2%, 3% y 4%, Tabla 4.

Componentes	Peso (gr)
Cemento Portland	150,00
Arena	450,00
Agua	75,00
Fibra de coco 0%	0,00
Fibra de coco 2%	3,00
Fibra de coco 3%	4,50
Fibra de coco 4%	6,00

Tabla 4. Diseño de mezcla de mortero más fibra de coco.

Se elaboraron muestras de mortero con una dosificación de 1:3 y relación agua-cemento de 0.5, variando la cantidad de fibra (2%, 3% y 4%) y la longitud de la fibra (1 cm, 3 cm y 5 cm).

Fase 3: Ensayos. Se ensayaron 90 cubos y 90 vigas para evaluar la resistencia a compresión y flexión. Para la prueba de resistencia a compresión se realizaron 90 cubos de 5x5x5cm, Fig. 3a, según la norma ASTM C109.

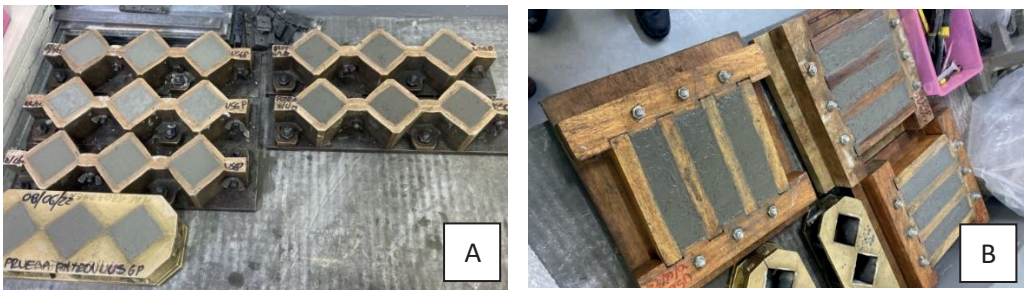


Fig. 3. Muestras de especímenes para pruebas de compresión y tracción de mortero.

Para la prueba de resistencia a flexión se realizaron 90 prismas de 5x5x20cm, Fig. 3b, según la norma ASTM C348, con una dosificación 1:3 y con las 3 variables de porción de fibra de coco 2%, 3%, 4% y la longitud de 1 cm de fibra, las pruebas de resistencias se las llevó a cabo los días 7, 14, y 28, en cada uno de estos días se ensayaron 3 prismas de muestras.

Mortar matrix development process

The development of the mortar was carried out in three phases:

Phase 1: Cleaning. The cleaning and drying process, to favour the adherence of the fibre to the mortar compounds, consisted of cleaning the fibre with water, then it is immersed for 48h in an aqueous solution of sodium hydroxide of 1.6 mol/l; the resulting fibres are again immersed in a solution with acetic acid 100ml for 4h, once cleaned the fibre is spread on a dry and free surface, exposed to the sun for approximately 48h. [2] [6]. To complete the drying process and eliminate the humidity, the fibre is placed in an oven at 100ºC for 48 hours. The fibre must be free of impurities in order to proceed to cut it into three different lengths: 1cm, 3cm and 5cm.

Phase 2: Dosage. The mortar plus coconut fibre is composed of Portland cement, fine aggregate with a combination of homogenised sand and dune sand, plus water, the dosage of the mortar base is 1:3 and the water/cement ratio is 0.5, in addition the incorporation of the fibre is proposed in three proportions according to the weight of the cement, at 2%, 3% and 4%, Table 4.

Components	Weight (gr)
Portland cement	150,00
Sand	450,00
Water	75,00
Fiber coconut 0%	0,00
Fiber coconut 2%	3,00
Fiber coconut 3%	4,50
Fiber coconut 4%	6,00

Table 4. Mix design of mortar plus coconut fibre.

Mortar samples were prepared with a dosage of 1:3 and a water-cement ratio of 0.5, varying the amount of fibre (2%, 3% and 4%) and the length of the fibre (1 cm, 3 cm and 5 cm).

Phase 3: Testing. Ninety cubes and 90 beams were tested to evaluate the compressive and flexural strength. For the compressive strength test, 90 cubes of 5x5x5cm, Fig. 3a, were made according to ASTM C109.

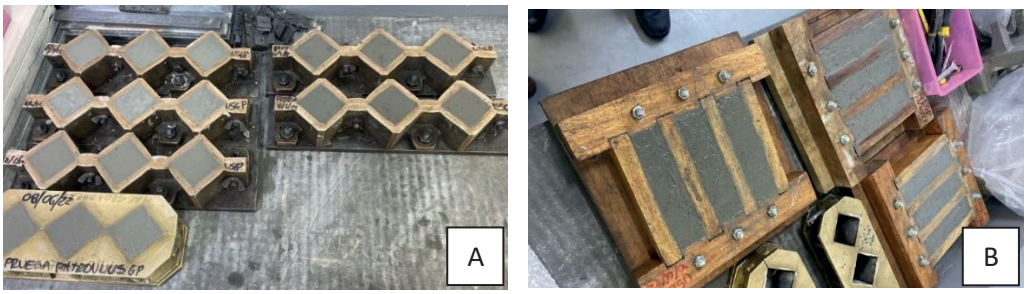


Fig. 3. Specimen samples for compressive and tensile testing of mortar.

For the flexural strength test, 90 prisms of 5x5x20cm, Fig. 3b, according to ASTM C348, with a 1:3 dosage and with the 3 variables of coconut fibre portion 2%, 3%, 4% and the length of 1 cm of fibre, the strength tests were carried out on days 7, 14, and 28, on each of these days 3 prisms of samples were tested.

Resultados

Los resultados de los ensayos mecánicos del mortero indicaron que la incorporación de fibra de coco favoreció a la resistencia a la flexión, obteniendo una resistencia de 1.05 MPa con 3% de fibra y 5 cm de longitud, en comparación con 1.01 MPa del mortero base. En términos de resistencia a la compresión, el mortero base alcanzó 6.21 MPa, mientras que con 3% de fibra y 3 cm llegó a 5.35 MPa, siendo mayor en el mortero base. Se sugiere que el mortero con fibra de coco sea utilizado como mortero de pega y enlucidos. Tabla 5.

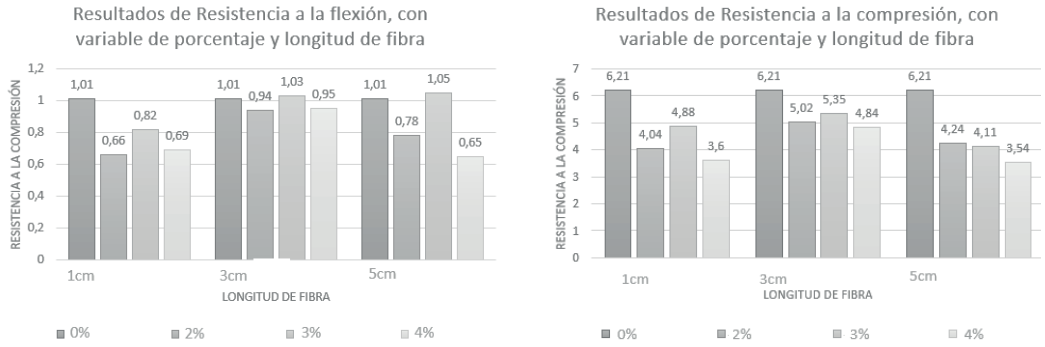


Tabla 5. Resultado de ensayos de resistencia a compresión y tracción.

Este estudio aporta importantes implicaciones a la industria de la construcción, demostrando que los residuos agroindustriales, como la fibra de coco, pueden utilizarse para mejorar las características mecánicas a flexión de los materiales de construcción, promoviendo así la sostenibilidad ambiental y el reciclaje.

Results

The results of the mechanical tests of the mortar indicated that the incorporation of coconut fibre favoured the flexural strength, obtaining a strength of 1.05 MPa with 3% fibre and 5 cm in length, compared to 1.01 MPa for the base mortar. In terms of compressive strength, the base mortar reached 6.21 MPa, while with 3% fibre and 3 cm it reached 5.35 MPa, being higher in the base mortar. It is suggested that the coconut fibre mortar should be used as a mortar for grouting and plastering. Table 5.

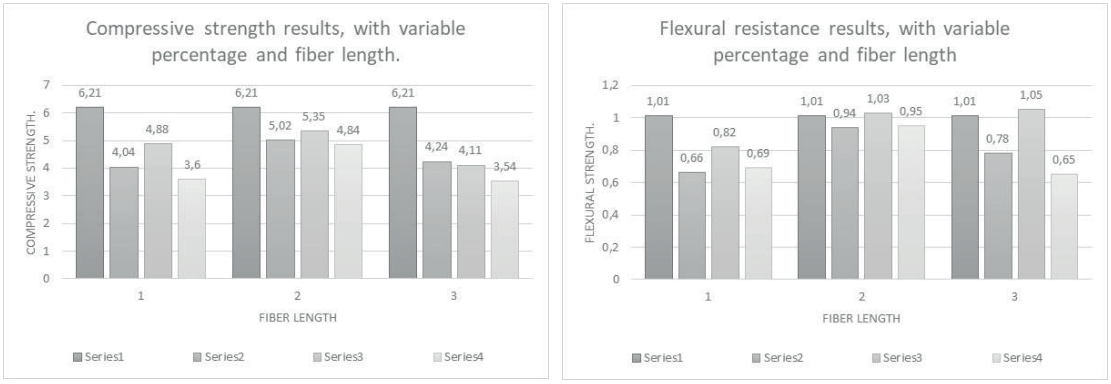


Table 5. Results of compressive and tensile strength tests.

This study has important implications for the construction industry, demonstrating that agro-industrial wastes, such as coconut fibre, can be used to improve the flexural mechanical characteristics of building materials, thus promoting environmental sustainability and recycling.

BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

[1] Agrocalidad . (2020). Ministerio de Agriculatura, Ganadería y Pesca. Agencia de regulación y Control Fitosanitario. Resolución111. https://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2020/05/111.pdf.

[2] Arrakhiz, F. Z., El Achaby, M., Malha, M., Bensalah, M. O., Fassi-Fehri, O., Bouhfid, R., Benmoussa, K., & Qaiss, A. (2013). Mechanical and thermal properties of natural fibers reinforced polymer composites: Doum/low density polyethylene. *Materials and Design*, *43*, 200–205. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.056

[3] C. Asasutjarit, J. Hirunlabh, J. Khedari, S. Charoenvai, B. Zeghmati, and U. C. Shin, "Development of coconut coir-based lightweight cement board," Constr. Build. Mater., vol. 21, no. 2, pp. 277–288, 2007, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.08.028.

[4] C. Lu, S. Hou, Z. Zhang, J. Chen, Q. Li, and X. Han, "The mystery of coconut overturns the crashworthiness design of composite materials," Int. J. Mech. Sci., vol. 168, no. July 2019, p. 105244, 2020, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105244.

[5] INEC. (2020). Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/webinec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2020/Metodologia%20ESPAC%202020.pdf.

[6] Le Troedec, M., Sedan, D., Peyratout, C., Bonnet, J. P., Smith, A., Guinebretiere, R., Gloaguen, V., & Krausz, P. (2008). Influence of various chemical treatments on the composition and structure of hemp fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *39*(3), 514–522. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.12.001

[7] N. Mar et al., "Caracterización de la producción y diversificación del coco para la transformación de la matriz productiva en Manabí- Ecuador" pp. 2–17, 2018.

[8] Orbe,T. (2008). Emplean fibras organicas en construcción sostenible. Eci-Dev-Net. Ediciones América Latina y el Caribe. https://www.scidev.net/america-latina/news/emplean-fibras-org-nicas-en-construcci-n-sostenibl/.

[9] T. Liu, S. Hou, X. Nguyen, and X. Han, "Energy absorption characteristics of sandwich structures with composite sheets and bio coconut core," Compos. Part B Eng., vol. 114, pp. 328–338, 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.01.035.

[10] San Andrés Zevallos GI, Aguilar Sierra SM. The current state of the coconut life cycle in Manabí, Ecuador. Medwave 2022;22(S1): eCI37 doi: 10.5867/Medwave.2022.S1.CI37

[11] San Andrés, G., Aguilar-Sierra, S., & Graziella, B. (2023). Morphological, physical, and chemical characterization of coconut residues in Ecuador. Heliyon 9(9).

[12] Ö. Andiç-Çakir, M. Sarikanat, H. B. Tüfekçi, C. Demirci, and Ü. H. Erdoğan, "Physical and mechanical properties of randomly oriented coir fiber-cementitious composites".

[13] V. Delgado, G. Rosado and S. Cossío, "Análisis de la cadena agroalimentaria del coco (cocos nucifera) en la provincia de Manabí, Ecuador.," pp. 43–72, 2020.

CHAPTER 6

TOWN PLANNING

CAPÍTULO 6 ***URBANISMO***

VÁYASE USTED DE AQUÍ: DISEÑO URBANO CONTRA LAS PERSONAS
GET OUT OF HERE: URBAN DESIGN AGAINST PEOPLE

Arianna Guardiola Víllora
Investigadora en el Dpto. Mecánica de Medios Contínuos y Teoría de Estructuras. Universitat Politècnica de València; Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Profesora Titular de Universidad, Arquitecto, Doctora en Arquitectura por la UPV. E-mail: aguardio@mes.upv.es
Researcher at the Department of Continuum Mechanics and Theory of Structures. Universitat Politècnica de València, Senior Lecturer, Architect, PhD Architecture by the UPV. E-mail: aguardio@mes.upv.es

Elena Navarro Astor
Investigadora en el Dpto. de Organización de Empresas. Universitat Politècnica de València; Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Profesora Titular de Universidad, adscrita a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. E-mail: enavarro@omp.upv,es
Researcher at the Department of Business Organization. Universitat Politècnica de València, Senior Lecturer assigned to the School of Building Engineering. E-mail: enavarro@omp.upv.es

Abstract

ONU Habitat (2016) defines public spaces as places publicly owned or of public use, accessible and enjoyable by all for free and without a profit motive. They can become a powerful instrument in the city to encourage social inclusion and fight discrimination by improving access to the most disadvantaged urban residents. Yet, municipalities are investing more in spaces easily governable by private interests and that are profitable in economic terms, and less in public spaces for the general use and enjoyment of all people.

This paper aims to raise awareness of hostile architecture, a subtle yet pervasive trend shaping daily urban life for residents and visitors alike. By critically examining public spaces in various European cities, the authors explore what makes them broadly 'unpleasant'. Their findings classify aggressive or hostile elements—or their absence— into distinct categories that are described: benches, rough surfaces and unshaded and unfurnished spaces. By putting the spotlight on this trend, the authors hope to mobilise the reader to observe with care and different lenses the spaces that surround them, to discover patterns of hostile architecture across the cities.

Keywords
Hostile Architecture, Inequality, Public Spaces, Urban design.

Introducción

ONU-Hábitat (2016) define los espacios públicos como lugares de propiedad o uso público, accesibles y disponibles para ser aprovechados por toda la gente de manera gratuita y sin fines de lucro. Incluyen bienes destinados al uso y disfrute general, en el ejercicio de los derechos y libertades de las personas (Aguado i Cudolá 2023a). Además, cuando mejoran el acceso de los residentes urbanos desfavorecidos, los espacios públicos se convierten en un poderoso instrumento para fomentar la inclusión social y combatir la discriminación. "Las dificultades para garantizar el acceso a una vivienda adecuada y asequible para todos deben compensarse con una provisión generosa de espacios y servicios públicos de calidad" (ONU-Hábitat 2016, p. 19).

Sin embargo, parece que los ayuntamientos invierten más en espacios fácilmente gobernables por intereses privados y rentables económicamente, que en espacios públicos como parques y plazas (Smith y Walters 2017). El éxito de esta estrategia radica en el "tipo" de usuario que atraen estos espacios: personas con ingresos económicos disponibles para ser gastados. Así, el espacio urbano en las ciudades modernas está siendo controlado y privatizado, desalentando la presencia de ciertos grupos, como personas sin hogar o jóvenes, y restringiendo su "derecho a la ciudad" (Romero 2019).

La arquitectura hostil carece de una definición clara, fusionando a menudo términos como "defensiva", "hostil", "desagradable" y "disciplinaria" (Kive 2024; De Fine 2023; Rosenberg 2023 y 2020). Aunque los estudios científicos sobre el tema están aumentando (Nitrato Izzo 2022), la mayoría de las discusiones aparecen en blogs, prensa y foros urbanos. Kive (2024, p. 690) señala que el diseño hostil se refiere "al uso deliberado del diseño para evitar que las personas utilicen un espacio u objeto de una manera indeseable". Es un tipo de diseño conductual (De Fine 2023), denominado Diseño Urbano Contra las Personas (DUCP) por las autoras, ya que busca generar incomodidad tanto física como mental. A menudo sutil e imperceptible, afecta a la vida cotidiana sin un reconocimiento manifiesto (Lorini y Moroni 2022). A diferencia de medidas administrativas explícitas como las prohibiciones o sanciones, actúa de manera discreta al restringir físicamente ciertos usos de los espacios públicos (Aguado i Cudolá 2023b).

Este artículo busca concienciar sobre la arquitectura hostil, una tendencia sutil pero omnipresente que moldea la vida urbana diaria de residentes y visitantes. Al analizar críticamente espacios públicos de varias ciudades europeas, las autoras exploran qué los hace "desagradables" en términos generales y clasifican estos elementos agresivos u hostiles —o su ausencia— en distintas categorías.

Categorías de elementos hostiles

Aquí se incluyen los bancos, las superficies rugosas y los espacios sin sombra ni mobiliario urbano (ver Tabla 1). Por tanto, no siempre los elementos de diseño urbano son los que nos hacen sentir mal, sino que es precisamente su ausencia lo que genera malestar, obligando a la gente a abandonar rápidamente un determinado espacio público (y no por una situación de inseguridad). Las categorías de la Tabla 1 se desarrollan a continuación.

Bancos "disciplinarios o defensivos"

Descritos como "posmodernos", "higiénicos" y "anti-indigentes" (Bergamaschi et al., 2014: 51), su objetivo es ser inhóspitos para disuadir a personas sin hogar o ambulantes, variando en forma y tamaño (Smith y Walters 2017; Romero 2019). Operan mediante un mecanismo de "imposición física", bloqueando usos específicos del espacio (Rosenberg 2023).

Deberíamos empezar por el elemento conocido popularmente como el «primer elemento de diseño hostil», el banco Camden, instalado en 2012 en el barrio de Camden, Londres (Reino Unido). Diseñado por Factory Furniture, siguiendo las directrices del encargo del Camden Borough Council, sus principales características son: disuadir de dormir al raso, de traficar con drogas, de robar bolsos o mochilas y de depositar basura. Según anuncia el fabricante, el diseño también ganó algunos premios

Introduction

ONU Habitat (2016) defines public spaces as places publicly owned or of public use, accessible and enjoyable by all for free and without a profit motive. They comprise those assets for the general use and enjoyment of all people, in the exercise of their rights and freedoms (Aguado i Cudolá 2023a). In addition, by improving their access to disadvantage urban residents, public spaces become a powerful instrument in the city to encourage social inclusion and fight discrimination. 'Difficulties in securing access to adequate and affordable housing for all should be compensated by generous provision of good quality public space and public services' (UN Habitat 2016, p. 19).

Yet, municipalities are investing more in spaces that are easily governable by private interests and that are profitable in economic terms, and less in public spaces such as parks and city squares (Smith and Walters 2017). The success of this strategy lies on the 'type' of user attracted by these spaces, users with disposable income. Hence, urban space in modern cities is being controlled and privatised, discouraging the presence of certain people such as the unhoused or youth, and restricting their 'right to the city' (Romero 2019).

Hostile architecture lacks a clear definition, often merging terms like 'defensive', 'hostile', 'unpleasant' and 'disciplinary', among others (Kive 2024, De Fine 2023, Rosenberg 2023 and 2020). While scientific studies on the topic are growing (Nitrato Izzo 2022), most discussions appear in blogs, press, and urban forums. Kive (2024, p. 690) notes that hostile design refers 'to the deliberate use of design to prevent people from utilizing a space or an object in an undesirable manner'. It is a type of behavioural design (De Fine 2023), that we, authors, name Urban Design Against People (UDAP) because it consists of one form of design intended to make people feel uncomfortable, both physically and mentally. Often subtle and unnoticed, it impacts daily life without explicit recognition (Lorini & Moroni 2022). Unlike overt administrative measures like bans or sanctions, it operates discreetly by physically restricting certain uses of public spaces (Aguado i Cudolá 2023).

This paper aims to raise awareness of hostile architecture, a subtle yet pervasive trend shaping daily urban life for residents and visitors alike. By critically examining public spaces in various European cities, the authors explore what makes them broadly 'unpleasant'. Their findings classify aggressive or hostile elements—or their absence— into distinct categories.

Hostile elements categories

This includes benches, rough surfaces and spaces without shade or street furniture (see Table 1). Therefore, it is not always the urban design elements that make us feel bad, but it is precisely their absence that generates discomfort, forcing people to leave a certain public space, to abandon it quickly (and not because of a situation of insecurity). The different categories shown in Table 1 are discussed below.

Disciplining or defensive benches

They have also been labelled as 'postmodern', 'hygienic' and 'bum-proof' (Bergamaschi et al. 2014: 51). Different shapes and sizes exist, but their aim is to be inhospitable in order to discourage the homeless and itinerant (Smith and Walters 2017, Romero 2019). According to Rosenberg's categorization of hostile design they function by a mechanism of 'physical imposition': getting in the way of a specific manner in which the space could be used (Rosenberg 2023).

We should start by the item popularly known as being the 'first hostile design element', the Camden bench, installed in 2012 in the borough of Camden, London (UK). Designed by Factory Furniture, following the guidelines of the commissioning of Camden Borough Council, its main features are: deterring rough sleeping, drugs dealing, bag theft and littering. The design also won some awards, as advertised by the manufacturer (Nitrato Izzo 2022). At the time of writing this article, all reference to this design has disappeared from the Factory Furniture web-site. In fact, Image 1 is a collage created with the internet archive capture and a picture taken by the authors of the benches at the small pedestrian area at Great Queen Street, corner with Drury Lane.

From authors' experience, benches could be classified, at least, into 5 typologies (see Table 1), although their differences are somewhat blurred: Uncomfortable benches, divided benches, solo benches, 'healthy benches' and 'organic benches'.

(Nitrato Izzo 2022). En el momento de escribir este artículo, toda referencia a este diseño ha desaparecido del sitio web de Factory Furniture. De hecho, la Imagen 1 es un collage creado con la captura de archivos de Internet y una foto de los bancos hecha por las autoras en la pequeña zona peatonal de Great Queen Street, esquina con Drury Lane. Según la experiencia de las autoras, los bancos podrían clasificarse en al menos las 5 tipologías de la Tabla 1, aunque sus diferencias son un poco difusas: bancos incómodos, bancos divididos, bancos solitarios, "bancos saludables" y "bancos orgánicos".

El banco Candem de la Imagen 1 entraría dentro de la categoría de bancos incómodos. En cuanto a los bancos divididos, los más reconocibles son los que tienen reposabrazos o separadores de asiento, variando su número y posición (Imagen 2). Su principal objetivo es evitar que los sin techo duerman en la calle, por eso también se les denomina bancos «contra el sueño» (Rosenberg 2020). Pero indirectamente también impiden que la gente se tumbe en el espacio público. Podría ser el caso, por ejemplo, de un padre con un niño pequeño que necesita descansar después de visitar la ciudad, o el de un ejecutivo que desea salir al aire libre durante la pausa del almuerzo para tomar el sol y oxigenarse.

La evolución natural de los bancos divididos son los bancos individuales (Imagen 3). A veces se colocan juntos, para fomentar la conversación y el diálogo, pero muchas veces están solos, siendo el único banco de la zona donde el usuario puede sentarse, lejos de los demás (Romero 2019). Y una vez más, podemos encontrar bancos-solos incómodos, poco amigables para la mayoría de los residentes.

Tabla 1. Categorías de elementos hostiles analizadas. Fuente: las autoras
Table 1. Categories of the hostile elements analysed. Source: the authors

Bancos Benches		bancos incómodos Uncomfortable benches
		bancos divididos divided benches
		bancos solitarios solo benches
		bancos saludables healthy benches
		bancos orgánicos organic benches
Superficies rugosas		Rough surfaces
Espacios sin sombra		Unshaded and unfurnished spaces

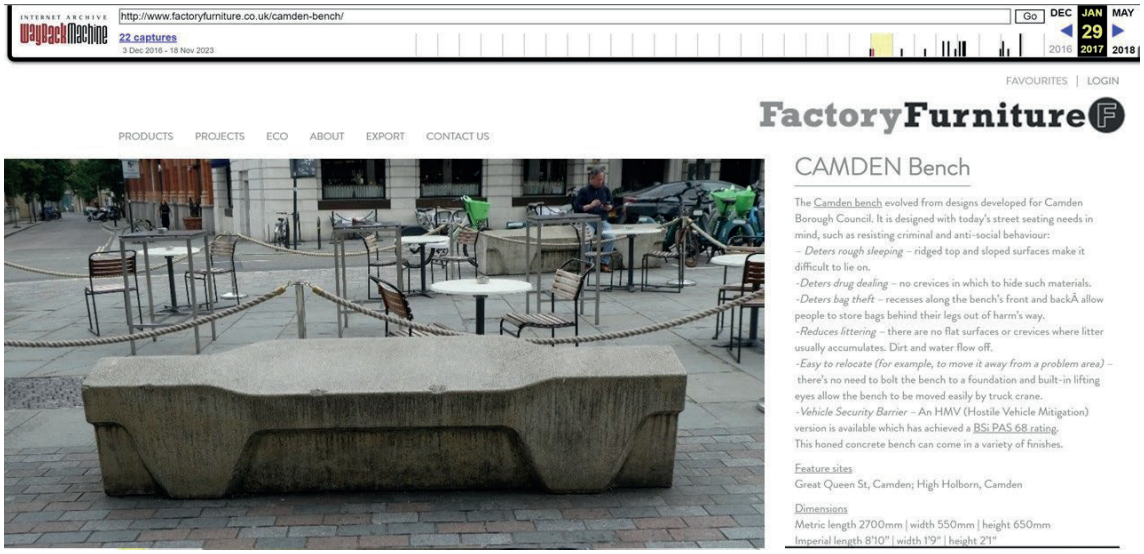


Imagen 1. Banco Camden y descripción. Fuente: Fotografías de las autoras; descripción en Factory Furniture n.d.
Image 1. Camden bench and description. Source: Authors' photograph 2024; description in Factory Furniture n.d.

The Candem bench in Image 1 would fall into the category of uncomfortable benches. As for the divided benches, the most recognisable divided benches are those with brackets or armrests, varying the number and position of the arms (Image 2). They are benches fitted with seat dividers, also called 'anti-sleep' benches (Rosenberg 2020). Being their main purpose to prevent homeless from sleeping in the streets, they indirectly also stop people from lying down in the public space. It could be, for example, the case of a father with a small child, needing to rest after visiting the city, or an executive wishing to go outdoors during the lunch-break to sunbath and oxygenate.

The natural evolution of divided benches are individual benches. Sometimes they are placed together, to encourage conversation and dialogue, but many times they stand alone, being the only bench in the area where the user can sit, away from others (Romero 2019). And once again, we can find uncomfortable bench-solos, unfriendly to most of the residents.

In our classification 'healthy benches' are those known as ischial support benches or leaning bars. Benches that are said to be designed for elderly people with mobility issues, being easier to stand up from them than from ordinary ones. In our experience, they seem to be conceived to guarantee that users don't stay too much time resting on them, as after a while they get tired, in fact they are almost standing upright. As a matter of fact, they are also called 'the leaning bar'. We are used to find them in public transport and bus stops, but they can also be found in hiking routes in the countryside. What could be a surprise was to see a pair of solo-ischial benches in the middle of a newly urbanised area (Image 4).

Finally, we have the so called 'organic benches', because they usually seem simple, organic, natural and friendly compositions with smooth surfaces inspired by nature. A second thought revels them as places where lying down is not possible, nor even be seated for a long time. Images of those misleading designs are grouped in Image 5.



Imagen 2 / Image 2. Bancos divididos / Divided benches. Fuente / Source: Authors' photographs 2024



Imagen 3 / Image 3 Bancos solitarios / Solo benches. Fuente / Source: Authors' photographs 2024



Imagen 4 / Image 4. Bancos saludables / Leaning bars. Fuente /Source: Authors' photographs 2024

Los "bancos saludables" incluyen los bancos isquiáticos o barras de apoyo, diseñados supuestamente para personas mayores con problemas de movilidad, ya que facilitan levantarse. Sin embargo, parecen pensados para evitar largas permanencias, ya que resultan incómodos tras un tiempo al obligar a estar casi de pie. Comunes en transporte público y paradas de autobús, también aparecen en rutas de senderismo. Sorprendentemente, encontramos un par de estos bancos en medio de una zona recientemente urbanizada (Imagen 4).

Por último, tenemos los llamados «bancos orgánicos», porque suelen parecer composiciones sencillas, orgánicas, naturales y acogedoras, con superficies lisas inspiradas en la naturaleza. Una segunda reflexión los revela como lugares donde no es posible tumbarse, ni siquiera estar sentado durante mucho tiempo. En la Imagen 5 se agrupan imágenes de estos engañosos diseños.

Superficies rugosas

A diferencia de los ejemplos anteriores, esta tipología tiene un objetivo obvio (Rosenberg 2020, 2023). Similares a los pinchos utilizados contra las palomas, se han denominado «pinchos humanos» y fueron una de las primeras herramientas para llamar la atención como «hostiles» (Quinn 2014). En su primera fase impedían específicamente robar, dañar o traspasar la propiedad privada, pero el enfoque más reciente se dirige a las personas que buscan refugio o descanso (Nitrato Izzo 2022).

Los acabados rugosos o agresivos se colocan en las superficies para impedir que la gente se apoye, se siente o se tumbe en ellas; «disuaden a los indeseables de merodear en público» (Bergamaschi et al. 2014, 12). Estos conjuntos están formados por elementos rugosos, afilados o puntiagudos, y pueden verse en alféizares, escaparates, escaleras o el pavimento. Su mecanismo es imposición física, pero también de autocoerción, es decir, «uno que incita a la población objetivo a vigilarse a sí misma» (Rosenberg 2023, 60). Los pinchos no sólo impiden sentarse, sino que también comunican a los desalojados que no se les quiere. En la Imagen 6 se muestran ejemplos más o menos sutiles; nótese que una lámina de agua, en principio inofensiva, puede tener el mismo efecto.

Espacios sin sombra ni mobiliario

Otra lógica en la gestión del espacio público es la eliminación total de bancos o árboles, de modo que un área específica se convierte en una zona de paso sin permitir que la gente se siente, descanse o duerma (Aguado i Cudolà 2023). Esto puede tener lugar, por ejemplo, en parques públicos para evitar la presencia de personas dedicadas a actividades ilegales (Nitrato Izzo 2022). A veces ocurre en plazas rehabilitadas, dejándolas sin los árboles ni la sombra esperados (Romero 2019). Esta lógica de diseño opera a través del mecanismo de ausencia (Rosenberg 2023) o de las "amenidades fantasma" (Chellew 2019).

Un buen ejemplo es la Plaza del Zarrón, en Almazán (Soria) ilustrada en la Imagen 7, con las fotos colgadas por los arquitectos en Facebook y en su propia página web (BOV estudio). Llamativamente, en Archello.com está categorizada como Espacios Verdes Urbanos y los arquitectos mencionan que proponen "vegetación autóctona de hoja caduca" que... "hará de la plaza un lugar cambiante con sombras en verano y sol en invierno" (BOV estudio). Sin embargo, la plaza es como un desierto. Además, los bancos de madera no parecen acogedores ni cómodos, ya que muchos carecen de respaldo y son demasiado estrechos para compartirlos.



Imagen 5 / Image 5: Bancos orgánicos / Organic benches. Fuente /Source: Authors' photographs 2024



Imagen 6 / Image 6. Superficies rugosas / Rough surfaces. Fuente / Source: Authors' photographs 2024

Rough surfaces

Unlike previous examples, this typology has an obvious objective (Rosenberg 2020, 2023). Similar to the spikes used for pigeons, they have been called 'human spikes' and they were one of the first tools to attract attention as 'hostiles' (Quinn 2014). In their earlier phase they specifically prevented stealing, damaging or trespassing private property, but the newer approach targets people looking for shelter or rest (Nitrato Izzo 2022).

Rough or aggressive finishes are placed on surfaces to prevent people from leaning, sitting or lying down there; in other words, 'they deter the unwanted from loitering in public' (Bergamaschi et al. 2014, 12). These assemblies are formed by rough, sharp or pointed elements, and can be seen in windowsills, shop windows, stairs or the pavement. Their mechanism is one of physical imposition again, but also of self-coercion that is, 'one that incites the target population to police themselves' (Rosenberg 2023, 60). Not only do the spikes prevent sitting, but they also communicate to the unhoused that they are not wanted. Image 6 shows more or less subtle examples. Note that a seemingly harmless sheet of water can have the same effect.

Unshaded and unfurnished spaces

Another logic in the management of public space is the complete removal of benches or trees, so that a specific area becomes a transit zone without allowing people to sit, rest or sleep (Aguado i Cudolà 2023). This may take place in public parks in order to avoid the presence of people engaged in illegal activities (Nitrato Izzo 2022). At times it happens in refurbished squares, leaving them without expected trees or shade (Romero 2019). This design logic operates through Rosenberg's mechanism of absence (Rosenberg 2023) or Cara Chellew's 'ghost amenities' (Chellew 2019).

A good example is Zarrón Square, in Almazán (Soria) illustrated in Image 7, with the photographs posted by the architects in Facebook and their own web page (BOV estudio). Strikingly, in Archello.com it is categorised as Urban Green Spaces and the architects mention they propose native 'deciduous vegetation' that … 'will make the plaza a changing place with shadows in the summer and sunshine in the winter' (BOV estudio). Yet, the square seems like a desert. In addition, the wooden benches do not seem welcoming nor comfortable, since many are backless and too narrow to share.

Discussion and conclusions

Once the citizens are aware of this trend, the philosophy is clear and examples are easily spotted, but it is still an open secret. Nothing related to this strategy is included in the Terms and Conditions of the council contracts regarding open urban spaces and furniture, and manufacturers and sellers do not mention the issue, except for the case of the Camden bench (Image 1), nowadays disappeared from the website of Factory Furniture, probably for not being politically correct. When this design was installed on Camden Street for the first time, it was displayed with no complexes, even boasting about how hostile it was (Coggins 2016). Twelve years later, there are many more examples on our streets, yet there is disguise about their ultimate purpose. An example is shown in Image 8, where nothing is said in the bench's characteristics about it being a divided bench.

In spite of the new theories of citizen participation, of the city being the space for people to meet, socialise and strengthen relationships (heir to the Greek agora), contemporary public spaces are (re) shaped by neoliberal ideologies. They are being privatised and are only within the reach of a few elites.

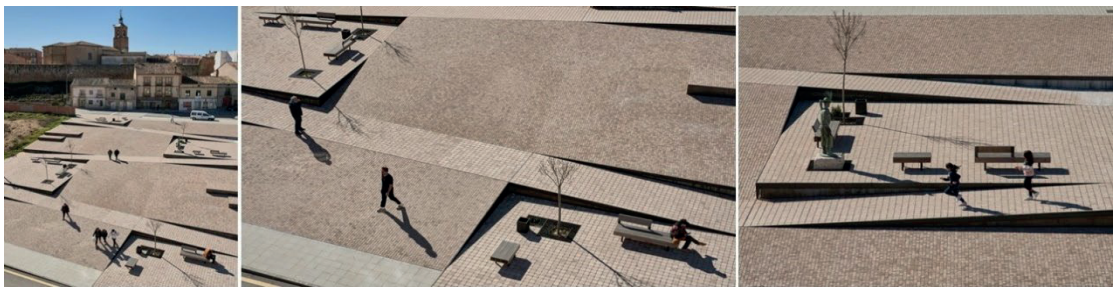


Imagen 7 / Image 7. Poco acogedora plaza de Zarrón (Almazán) / Unwelcoming Zarrón square (Almazán).
Fuente / Source: BOV estudio. Fotografía Javier Bravo

Discusión y conclusiones

Una vez que la ciudadanía es consciente de esta tendencia, la filosofía está clara y los ejemplos son fáciles de detectar, pero sigue siendo un secreto a voces. Nada relacionado con esta estrategia figura en los pliegos de condiciones de los contratos de los ayuntamientos sobre espacios urbanos abiertos y mobiliario, y los fabricantes y vendedores no mencionan el tema, salvo en el caso del banco Camden (Imagen 1), hoy desaparecido de la web de Factory Furniture, probablemente por no ser políticamente correcto. Pero cuando este diseño se instaló por primera vez en Camden Street, se exhibió sin complejos, incluso presumiendo de lo hostil que era (Coggins 2016). Doce años después, existen muchos más ejemplos en nuestras calles, y sin embargo hay disimulo sobre su finalidad última. La Imagen 8 muestra un claro ejemplo, donde en las características del banco no se dice nada de que sea un banco dividido.

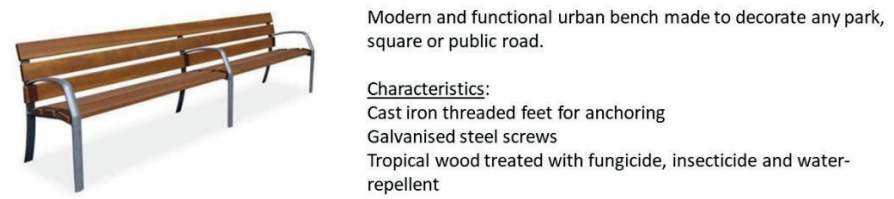


Imagen 8. Descripción neutral de un banco en catálogo del fabricante. Fuente: Elaboración propia, 2024.
Image 8. Neutral description of a bench in the manufacturer's catalogue. Source: Authors' elaboration, 2024.

A pesar de las nuevas teorías de participación ciudadana, de que la ciudad es el espacio para que la gente se reúna, socialice y estreche relaciones (heredera del ágora griega), los espacios públicos contemporáneos están (re) configurados por ideologías neoliberales. Están siendo privatizados y sólo se encuentran al alcance de unas pocas élites.

Según Ferraz (2013), ciertas cualidades urbanas son esenciales para generar bienestar y aceptación en los espacios públicos. De hecho, crear espacios que fomenten la interacción a pie de calle será crucial en una época en la que el aislamiento social subyace a tantos retos a los que se enfrenta nuestra sociedad (Building Material Reporter 2023). Pero cuando la ciudad elige "una arquitectura que obstruye la capacidad de pasar cómodamente el tiempo en entornos públicos" (Littman et al. 2024), el efecto puede ser contrario a la hospitalidad, es decir, hostilidad. Considerado crucial para la generación de encuentros, el espacio público es un lugar de libre acceso y uso colectivo que no requiere reservas ni normas de utilización. Es donde la gente circula y hace ejercicio, donde los y las turistas obtienen sus primeras impresiones de la ciudad y, lamentablemente, donde vive mucha gente. El problema de la arquitectura hostil es que no pretende resolver la crisis de las personas sin techo. Lo único que consigue es hacer la vida más difícil a quienes ya lo están pasando mal. Obligar a la gente a buscar otros lugares donde dormir no resolverá el problema de las personas sin hogar; intenta hacerlo menos evidente, ocultarlo (Rosenberg 2020, Romero 2019). Se trata de un problema complejo con soluciones difíciles, pero independientemente de las dificultades, interesa destacar la voluntad política para la acción. Así, existen ejemplos importantes a seguir como el del senador brasileño que en 2021 propuso el Projeto de Lei nº 488/2021, denominado 'Lei Padre Júlio Lancellotti', para modificar la ley 2001 Estatuto da Cidade y prohibir el uso de técnicas arquitectónicas hostiles en espacios abiertos de uso público (Contarato 2021, Aguado i Cudolá 2023).

Sin embargo, la arquitectura también puede ser un medio para unir a las personas. Consideremos por ejemplo el banco inclusivo (Imagen 9) en la lluviosa Vancouver (Canadá), fruto de la colaboración entre una organización sin ánimo de lucro y una empresa de diseño (Morant, 2020). El banco puede permanecer plegado para ser utilizado como uno normal, o desplegar una cubierta para proteger a la persona que duerme.

El objetivo de este artículo es poner de relieve esta tendencia para sensibilizar a la opinión pública. De este modo, las autoras esperan movilizar a las personas destinatarias del diseño no hostil, es decir, la mayoría, la población alojada, ajena a las agendas hostiles en determinados lugares. Quizás al principio se sorprendan, pero puede que se animen a observar con detenimiento y lentes diferentes

los espacios que les rodean, para descubrir patrones de arquitectura hostil en todas las ciudades. Puede que algunas personas incluso simpaticen con las minorías objetivo y las apoyen. Al fin y al cabo, la pobreza y la desigualdad son problemas evitables, y la hospitalidad hacia el extranjero pobre y el refugiado es un signo de progreso cultural y civilización que nos sitúa a un nivel verdaderamente humano, en la medida en que es justa y compasiva (Cortina 2017).

According to Ferraz (2013), certain urban qualities are essential for generating well-being and acceptance in public spaces. In fact, creating spaces that encourage interaction in the street level will be crucial in an era where social isolation underlies so many challenges facing our society (Building Material Reporter 2023). But when the city chooses 'architecture which obstructs one's ability to comfortably spend time in public settings' (Littman et al. 2024), the effect can be contrary to hospitality, that is, hostility. Considered crucial for the generation of encounters, public space is a place of free access and collective use that does not require reservations or rules of use. It is where people circulate and exercise, where tourists get their first city impressions and, sadly, where many people live.

The problem with hostile architecture is that it doesn't aim to address the homelessness crisis. All it achieves is making life harder for those already struggling. Forcing people to find other places to sleep will not solve the issue of homelessness; it tries to make it less obvious, to hide it (Rosenberg 2020, Romero 2019). It is a complex problem with difficult solutions, but regardless of the difficulties, what is important to point out is the political will for action. There are important examples to follow such as the Brazilian senator who in 2021 proposed Projeto de Lei nº 488/2021, named 'Lei Padre Júlio Lancellotti', to amend law 2001 Estatuto da Cidade to forbid the use of hostile architectural techniques in open spaces for public use (Contarato 2021, Aguado i Cudolá 2023).

Yet, architecture can also be a means for bringing people together. For instance, consider the example of the inclusive bench (Image 9) in rainy Vancouver (Canada), the result of a collaboration between a non-profit organization and a design firm (Morant, 2020). The bench can remain folded to be used as a normal one, or deploy a cover to protect the sleeping person.

The aim of this paper was to put the spotlight on this trend in order to raise awareness. Hence, the authors hope to mobilise non-hostile design targeted persons, that is the majority, the housed population, unaware of hostile agendas at particular places. At first they may be surprised, but they may be prompted to observe with care and different lenses the spaces that surround them, to discover patterns of hostile architecture across the cities. Maybe some will even sympathize with targeted minorities and support them. Poverty and inequality are avoidable problems after all, and hospitality to the poor foreigner and refugee is a sign of cultural progress and civilization that places us at a truly human level, insofar as it is fair and compassionate (Cortina 2017).



Imagen 9 / Image 9. Banco inclusivo en Vancouver / Inclusive bench in Vancuver. Fuente / Source: Morant 2020

REFERENCIAS / REFERENCES

- Aguado i Cudolà, V. «El sensellarisme i l'exclusió residencial. Entre el control, els serveis socials i les polítiques d'habitatge. » *Revista Catalana de Dret Públic* 66 (2023): 39-55.
- Archello.com. Accessed December 9, 2024 https://archello.com/project/plaza-del-zarron
- Bergamaschi, M., Castrignanò, M. and De Rubertis, P. «The homeless and public space: urban policy and exclusion in Bologna.» *Revue Interventions économiques* 51 (2014), http://journals.openedition.org/interventionseconomiques/2441
- BOV estudio. 'Plaza del Zarron'. Accessed November 28, 2024. https://archello.com/project/plaza-del-zarron
- Building Material Reporter. 'Street Corners: Time to Place a Bench!'. Accessed May 20, 2024. https://www.buildingmaterialreporter.com/influencers/articles/street-corners-time-to-place-a-bench.
- Chellew, C. «Defending Suburbia: Exploring the Use of Defensive Urban Design Outside of the City Center.» *Canadian Journal of Urban Research* 28, nº 1 (2019): 19–33.
- Coggins, T. «Robert Moses, Pig-Ears and the Camden Bench: How Architectural Hostility Became Transparent.» *Failed Architecture* (17 June 2016) Accessed May 15, 2024.
- Contarato F.'Nota Técnica Projeto de Lei nº 488/2021'. Accessed December 9, 2024. https://direitoshumanos.dpu.def.br/wp-content/uploads/2021/06/Nota-Tecnica-no-SEI-4444358-GTR-1.pdf.
- Cortina, A. *Aporofobia, el rechazo al pobre. Un desafío para la democracia*. Barcelona: Paidós, 2017.
- De Fine Licht, K. «Behavioral designs defined: how to understand and why it is important to differentiate between 'defensive,' 'hostile,' 'disciplinary', and other designs in the urban landscape.» *Urban Desing International* 28 (2023): 330–343. https://doi.org/10.1057/s41289-023-00231-2
- Ferraz, V. «Hospitalidade urbana em grandes cidades. São Paulo em foco. » (PhD diss., Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Sao Paulo, 2013). https://doi.org/10.11606/T.16.2013.tde-10072013-161802
- Kive, S. «Designing Out: A Framework for Studying Hostile Design.» *ACSA 112th Annual Meeting:* Disrupters on the Edge, Vancouver, BC. March 14-16, (2024): 690-696.
- Littman, D. M., Milligan, T., Berry, R., Holloway, B., and Scott, M. L. «What do recently housed young people imagine for the future of third places? Using game-based inquiry to (re)imagine affirming, youth-centered third places. » *American Journal of Community Psychology* (2024): 1–15. https://doi.org/10.1002/ajcp.12750
- Lorini, G., and Moroni, S. «Ruling Without Rules: Not Only Nudges. Regulation Beyond Normativity.» *Global Jurist* 20, nº 3 (2020). https://doi.org/10.1515/gj-2019-0051.
- Morant Ramiro, A. «Arquitectura hostil. La hipocresía del no habitar». *Arquitectura y empresa.* Accessed 15 May 2024. https://arquitecturayempresa.es/noticia/arquitectura-hostil-la-hipocresia-del-no-habitar
- Nitrato Izzo, V. «Law and hostile design in the city: Imposing decorum and visibility regimes in the urban environment», *Oñati Socio-Legal Series*, 12, nº 3 (2022): 522–539. doi: 10.35295/osls.iisl/0000-0000-0000-1306.
- ONU Habitat. «Global Public Space Toolkit: From Global Principles to Local Policies and Practice» (2016). Available at: https://unhabitat.org/global-public-space-toolkit-from-global-principles-to-local-policies-and-practice (Accessed 15 November 2024).
- Quinn, B. 'Anti-homeless spikes are part of a wider phenomenon of 'hostile architecture'.' *The Guardian* [online], 13 June 2014. Accessed April 25, 2024. https://www.theguardian.com/artanddesign/2014/jun/13/anti-homeless-spikes-hostile-architecture
- Romero Riquelme, L.C. «Ciudades del control y la restricción: las personas sin hogar y la arquitectura hostil.» *La Razón Histórica*, nº 42 (2019): 163-178.
- Rosenberger, R. «On hostile design: Theoretical and empirical prospects.» *Urban Studies* 57, nº 4 (2020): 883-893. https://doi.org/10.1177/0042098019853778
- Rosenberger, R. «A Classification Scheme for Hostile Design.» *Philosophy of the City Journal* 1, nº 1 (2023): 49–70. https://doi.org/10.21827/potcj.1.1.40323.
- Smith, N. and Walters, P. «Desire lines and defensive architecture in modern urban enviroments.» *Urban Studies* 55, nº 13 (2017): 2980–2995. https://doi.org/10.1177/0042098017732690

ESTÁNDARES EN EL DISEÑO DE ESPACIOS EN LAS ESTACIONES DE FERROCARRIL

STANDARDS IN THE DESIGN OF RAILWAY STATION SPACES

Juan-Bautista Font Torres
Doctorando en el Programa de Doctorado en Arquitectura, Edificación, Patrimonio y Ciudad, Investigador en el Dpto. Patrimonio Arquitectónico y Conservación; Universitat Politècnica de València; Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Arquitecto técnico, Máster en Ingeniería de Transportes, Territorio y Urbanismo, Máster en Ingeniería y Mantenimiento Ferroviario, Doctor en Transportes y Territorio por la UPV. E-mail: juafont1@gmail.com
PhD Candidate in the PhD Programme in Architecture, Building, Heritage and City, Researcher in the Dept. of Architectural Heritage and Conservation; Universitat Politècnica de València; Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, Spain. Technical Architect, Master in Transport Engineering, Territory and Urban Planning, Master in Railway Engineering and Maintenance, PhD in Transport and Territory by the UPV. E-mail: juafont1@gmail.com

Jorge-Luís García Valldecabres
Investigador en el Centro de Investigación Arquitectura, Patrimonio y Gestión del Desarrollo Sostenible PEGASO; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Doctor en Arquitectura. E-mail: jorgegvallde@gmail.com
Researcher at the Research Centre for Architecture, Heritage and Management of Sustainable Development PEGASO; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, Spain, PhD in Architecture. E-mail: jorgegvallde@gmail.com

Luís Cortés Meseguer
Profesor en Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España, Doctor en Arquitectura. E-mail: luiscorme@upv.es
Lecturer in the Department of Architectural Constructions; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, Spain, PhD in Architecture, PhD in Architecture. E-mail: luiscorme@upv.es

Abstract

The liberalisation of passenger transport by rail has produced a turning point in this mode of transport, with an increase in the number of passengers using this means of transport. This situation has had repercussions on existing stations, making it necessary to extend their surface areas, as the spaces initially designed are not capable of absorbing this new increase, posing a problem for the future.

In addition to the problem of space, the problem has a direct negative impact on the users of these infrastructures as they perceive a lack of quality of service in terms of comfort and safety.

In this document the authors analyse the case of the station of Valencia Joaquin Sorolla, station of High Speed which it is under process of prolong. The station was conceived as a provisional station until the construction of the tunnel under the city, but the provisional nature of the station has been prolonged, creating the need to extend the station to absorb the demand for new passengers until the works are completed. However, this increase in demand has had a negative impact on the initial design of the station and on the planned extension, which has been overwhelmed by this growth.

Keywords
Passengers, stations, liberalisation, railways, spaces, demand

Introducción

La llegada de la liberalización de la alta velocidad ferroviaria conlleva un cambio en el modelo de estación por las necesidades como por el planeamiento que de su uso se hace. En este sentido, las estaciones prexistentes no tienen capacidad para acoger estas nuevas necesidades, por lo que se opta por la construcción de nuevas estaciones o ampliación de estas.

Esta situación obliga a replantear la ordenación de los espacios y dedicados a nuevos usos. Las características técnicas y de operatividad necesarias exigen la renovación de la red arterial ferroviaria de cada espacio urbano, y en segundo lugar buscar los proyectos de integración de este nuevo ferrocarril. En el caso estudiado debido a la construcción de la línea de Alta Velocidad Madrid-Castilla La Mancha-Comunidad Valenciana surge la necesidad de crear una nueva estación en València, integrando las distintas líneas que confluyen en la ciudad. Sin embargo el pasillo ferroviario de acceso a la estación Valencia Estació de Nord constituye una barrera urbanística, ocasionando problemas en el funcionamiento por la interceptación de la red viaria.

Es por ello por lo que se plantea el enterramiento de estas líneas así como la construcción de una estación soterrada que ofrezca la continuidad a la estructura en el centro de la ciudad, dotando a las zonas ocupadas actualmente por las vía de equipamientos, espacios y zonas verdes, solucionando los déficits que tiene esta área de València.

La complejidad de las obras y al no estar disponible dicha estación soterrada para la fecha de puesta en servicio de la línea de Alta Velocidad, obliga a construir una estación provisional para acoger estos servicios.

Pero la liberalización de la Alta Velocidad en España y la aparición de nuevas empresas ferroviarias en el último trimestre de 2022, ha supuesto un aumento en el número de viajeros que utilizan este tipo de servicio. La estación "provisional", inaugurada en diciembre de 2010 se encuentra en fase de ampliación para satisfacer las necesidades de los viajeros mientras terminan las obras del nuevo canal de acceso a la ciudad y su estación central soterrada.

Los espacios diseñados no son capaces de absorber este nuevo incremento planteándose el problema incide directamente de forma negativa en los usuarios de estas infraestructuras al percibir una falta de calidad del servicio en cuanto a confort y seguridad.

Introduction

The arrival of the liberalisation of the high-speed rail system entails a change in the station model due to the needs and the planning of its use. In this sense, the existing stations do not have the capacity to accommodate these new needs, which is why new stations are being built or extended.

This situation makes it necessary to rethink the planning of spaces dedicated to new uses. The necessary technical and operational characteristics require the renovation of the arterial railway network in each urban area, and secondly, the search for integration projects for this new railway. In the case studied, due to the construction of the Madrid-Castilla La Mancha-Comunidad Valenciana high-speed line, the need arises to create a new station in Valencia, integrating the different lines that converge in the city. However, the railway corridor leading to the Valencia Estació de Nord station constitutes an urban barrier, causing problems in its operation due to the interception of the road network.

It is for this reason that the proposal is to bury these lines and build an underground station to provide continuity to the structure in the city centre, providing the areas currently occupied by the tracks with facilities, spaces, and green areas, solving the deficits in this area of Valencia.

The complexity of the works and the fact that this underground station will not be available for the commissioning date of the high-speed line means that a provisional station will have to be built to accommodate these services.

However, the liberalisation of the High Speed in Spain and the appearance of new railway companies in the last quarter of 2022, has led to an increase in the number of passengers using this type of service. The 'provisional' station, inaugurated in December 2010, is currently being extended to meet the needs of passengers while work on the new access canal to the city and its underground central station is completed.

But the spaces designed are not capable of absorbing this new increase, and the problem has a direct negative impact on the users of these infrastructures, who perceive a lack of quality of service in terms of comfort and safety.



Imagen 1. Barrera urbanística por las vías de acceso a la estación de València Estació del Nord. (IDOM, 2008)

Image 1. Urban planning barrier by the access roads to València Estació del Nord Station. (IDOM, 2008)

Objetivos

Las ampliaciones de las estaciones de ferrocarril existentes debidas al incremento de la oferta de servicios hacen que las soluciones adoptadas para absorber el aumento de viajeros puedan requerir importantes ampliaciones que el planeamiento urbanístico de la ciudad donde se ubican no puede llevar a cabo, como es el caso de la estación objeto de estudio. Por ello, se hace necesario definir un protocolo de diseño de espacios para viajeros como punto de partida para el cálculo de la capacidad de los diferentes espacios que componen estas infraestructuras ferroviarias.

Objectives

The extensions to existing railway stations due to the increase in the supply of services mean that the solutions adopted to absorb the increase in passengers may require significant expansions that the urban planning of the city where they are located cannot be carried out, as in the case of the station under study. This is why it is necessary to define a protocol for the design of spaces for passengers as a starting point for calculating the capacity of the different areas that make up these railway infrastructures.

Metodología

El método empleado tiene en cuenta todos los espacios que debe cruzar un viajero (andén, escaleras, vestíbulo), los tiempos de espera en la estación y una hora determinada en la cual se produce la mayor afluencia de trenes a la estación (hora punta), lo cual permite la obtención del número máximo de viajeros y en base de la superficie de las áreas a estudio permite determinar el nivel de servicio (LoS) según (Fruin, 1960).

Para el cálculo de la ocupación se toma el valor máximo de ocupación a lo largo del día y en el periodo correspondiente a la hora punta. La amplitud de la hora punta a considerar se fija dentro del intervalo anterior siendo sensible al servicio de trenes de la estación. El criterio utilizado para calcular la ocupación durante el periodo considerado es el de todos los trenes que pueden entrar o salir simultáneamente de la estación y los trenes siguientes a los anteriores, considerando únicamente los viajeros que embarcan. La ocupación depende de los horarios definidos en las mallas de circulación, incluyen las horas de parada, obteniéndose la hora punta a partir de las horas de llegada y salida. En cuanto al tiempo de permanencia en la estación, éste está directamente relacionado con el tipo de cliente. En el caso de los usuarios que van a viajar, llegan con antelación, un tiempo denominado tiempo de precaución, mientras que en el caso de los viajeros que salen de la estación, este tiempo depende de factores como la orientación dentro de la estación y el itinerario seguido por el viajero para salir de la estación. Este tiempo de precaución se compone de un tiempo de seguridad, producido por los viajeros que prevén posibles retrasos durante el trayecto hasta la estación, un tiempo utilizado para la orientación dentro de la propia estación y, en su caso, un tiempo utilizado para la despedida de los acompañantes. Es evidente que el tiempo de previsión depende de la distancia entre el origen del viaje y la estación y está relacionado con el comportamiento y la psicología de los propios pasajeros.

La determinación del número de usuarios de la estación proporciona el inicio del proceso para el cálculo de la capacidad de los distintos elementos que componen estas infraestructuras como pasillos, vestíbulos, controles de acceso, andenes, etc. El cálculo se basa en la capacidad de absorción de estos elementos. El cálculo se basa en la capacidad de absorción de estos elementos. Por ello, esta capacidad de absorción se determinará como oferta y el número de usuarios que pretendan pasar por estas zonas se determinará como demanda. En lo referente al tiempo en la estación, este tiempo está relacionado directamente con el tipo de usuario. En el caso de usuarios que van a viajar, estos llegan con antelación, tiempo denominado tiempo de precaución, mientras que en el caso de viajeros que salen de la estación este tiempo es dependiente de factores como son la orientación dentro de la estación y del recorrido tomado por el viajero para salir de la misma. El tiempo de precaución está compuesto por un tiempo de seguridad, producido por la anticipación de los viajeros por posibles retrasos durante el recorrido hacia la estación, un tiempo empleado en la orientación dentro de la propia estación y si es el caso un tiempo utilizado en la despedida a acompañantes. Es obvio que el tiempo de precaución es dependiente de la distancia existente entre el origen el viaje y la estación y relacionado con el comportamiento y psicología de los propios viajeros. En la imagen 2 se muestra la afluencia de viajeros dependiendo del tiempo de precaución empleado por los usuarios. En el cado estudiado la pendiente del gráfico muestra el aumento de viajeros en espera al acercarnos al minuto en el que se anuncia el tren (30 minutos antes de la salida) y da comienzo el embarque. En estos 30 minutos previos a la salida del tren el porcentaje de viajeros alcanza el 90% de las plazas ocupadas:

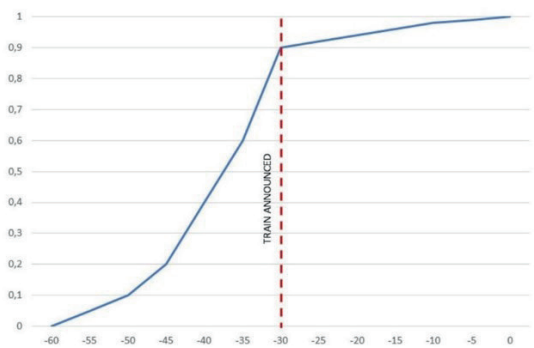
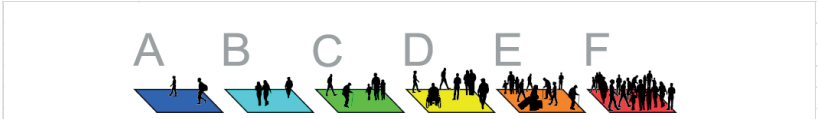


Imagen 2. Hora de llegada y número de viajeros a la estación estudiada. Fuente: Autores.

Image 2. Arrival time and number of passengers at the station studied. Source: Authors.

Para determinar la densidad de ocupación, se utilizará el método investigado por J.J. Fruin en los años sesenta para los flujos peatonales. La elección de este método se basa en la relación volumen/capacidad mediante la cual se determinan los niveles de diseño (seis en total, entre A y F) permitiendo obtener un diseño cualitativo y cuantitativo del caso de estudio.



Level of Service (LoS)	Definition
A	Free circulation
B	Uni-directional flows
C	Sightly restricted circulation with dificulty passing others. Reverse and cross-flows with difficulty
D	Restricted circulation for most. Reverse and cros-flows with significant difficulty
E	Restricted circulation for all intermitent stoppages and serious difficulty for reverse and cross-flows
F	Complete breakdown of flow with frecuente stoppages

Tabla 1. Niveles de servicio (LoS). Fuente: Elaboración propia a partir de J.J. Fruin (1960)

Table 1. Levels of service (LoS). Source: Authors based J.J. Fruin (1960)

La utilización de este método en condiciones normales permite obtener los niveles adecuados de confort en las zonas ocupadas por los pasajeros, así como la evaluación del uso máximo de estas zonas (Tabla 2):

Level of Service (LoS)	Surface	Density
	m^2/passenger	passenger/m^2
A	>3,24	<0,27
B	2,32-3,24	0,43-0,31
C	1.39-2,32	0,72-0,43
D	0,93-1,39	1,08-0,72
E	0,46-0,93	2,17-1,08
F	<0,46	>2,17

Tabla 2. Niveles de servicio en función de la superficie ocupada. Fuente: J.J. Fruin (1960).

Table 2. Levels of Service according to area occupied. Source: J.J. Fruin (1960).

Methodology

The method used takes into account all the spaces that a passenger must cross (platform, stairs, vestibule), the waiting times in the station and a specific time at which there is the greatest influx of trains at the station (rush hour), which allows the maximum number of passengers to be obtained and, based on the surface area of the areas under study, allows the level of service (LoS) to be determined according to (Fruin, 1960).

For the calculation of occupancy, the maximum occupancy value is taken throughout the day and in the period corresponding to the peak hour. The peak hour range to be considered is set within the above interval and is sensitive to the train service at the station.

The criterion used to calculate occupancy during the period considered is that of all trains that can enter or leave the station simultaneously and the trains following the previous ones, considering only boarding passengers.

Occupancy depends on the timetables defined in the circulation grids, including stopping times, and the peak hour is obtained from the arrival and departure times. The time spent in the station is directly related to the type of customer.

For commuters arriving in advance, a time called caution time, while for passengers leaving the station, this time depends on factors such as orientation within the station and the route taken by the passenger to leave the station. This precautionary time is composed of a safety time, produced by passengers anticipating possible delays during the journey to the station, a time used for orientation within the station itself and, where appropriate, a time used for the farewell of accompanying persons. The anticipation time depends on the distance between the origin of the journey and the station and is related to the behaviour and psychology of the passengers themselves.

The determination of the number of users of the station provides the start of the process for the calculation of the capacity of the various elements that make up these infrastructures such as concourses, lobbies, access controls, platforms, etc. The calculation is based on the absorption capacity of these elements. The calculation is based on the absorption capacity of these elements. Therefore, this absorption capacity shall be determined as supply and the number of users intending to pass through these areas shall be determined as demand.

In terms of time in the station, this time is directly related to the type of customer. In the case of commuters, they arrive early, which is called caution time, while in the case of passengers leaving the station, this time is dependent on factors such as the orientation within the station and the route taken by the passenger to leave the station.

The caution time is composed of a safety time, produced by passengers anticipating possible delays during the journey to the station, a time used for orientation within the station itself and, if applicable, a time used for farewells to be accompanying persons.

It is obvious that the caution time is dependent on the distance between the origin of the journey and the station and is related to the behaviour and psychology of the passengers themselves.

Image 2 shows the number of passengers depending on the caution time used by the users. In the case studied, the slope of the graph shows the increase in waiting passengers as we approach the minute when the train is announced (30 minutes before departure) and boarding begins. In these 30 minutes prior to the train's departure, the percentage of passengers reaches 90% of the seats occupied:

To determine the occupancy density, the method investigated by J.J. Fruin in the 1960s for pedestrian flows will be used. The choice of this method is based on the volume/capacity ratio by which the design levels are determined (six in total, between A and F) allowing a qualitative and quantitative design of the case study to be obtained.

The use of this method under normal conditions makes it possible to obtain the appropriate levels of comfort in the areas occupied by passengers, as well as the assessment of the maximum use of these areas (Table 2).

Resultados

La hora punta se obtiene de los horarios de los trenes. En el caso estudiado, obtenemos la hora punta de la mañana y de la tarde, las horas con mayor número de trenes circulando por la estación y, en consecuencia, mayor número de plazas ofertadas:

	Arrival	Departure	From	To	Seats
Morning Peak Hour		10:00	València JS	Madrid Chamartín	457
		10:06	València JS	Madrid Chamartín	509
	10:19		Burgos RM	València JS	353
	10:30	10:30	Barcelona Sants	Alacant Terminal	332
		10:35	València JS	Madrid Chamartín	353
	10:40		Madrid Chamartín	València JS	457
Afternoon Peak Hour		18:00	València JS	Madrid Chamartín	457
		18:01	València JS	Barcelona Sants	332
	18:19		Madrid Chamartín	València JS	353
	18:40		Madrid Chamartín	València JS	457
	18:42	18:42	Gijón / Xixón	Vinaròs	353
		18:45	València JS	Madrid Chamartín	353
	18:55	18:55	Alacant Terminal	Barcelona Sants	332

Tabla 3. Horas punta en la estación. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de ADIF.

Table 3. Peak times at the station. Source: Authors, based on ADIF data.

Según la cifra anterior, el número de plazas ofertadas es de 2.461 en la hora punta de la mañana y de 2.637 en la hora punta de la tarde.

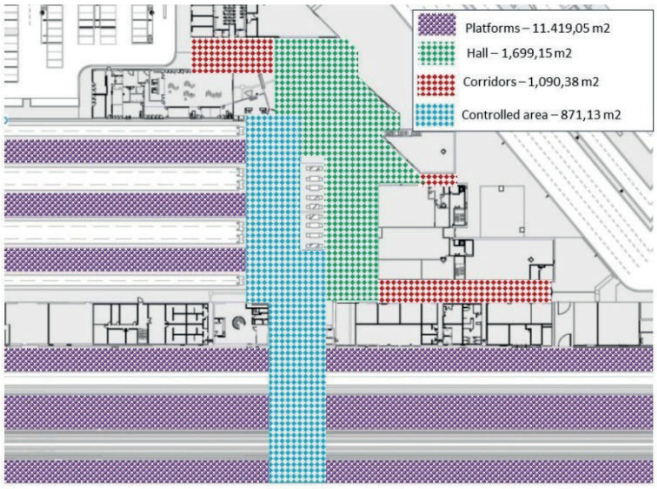


Imagen 3. Áreas de tránsito de la estación y superficies. Fuente: Autores a partir de (INECO, S.A., 2022)

Image 3. Station transit areas and surfaces. Source: Authors based on (INECO, S.A., 2022).

Area	Surface (m2)	From 10:00 to 11:00 h	From 18:00 to 19:00 h
		m^2/passenger	
Hall	1.699,15	0,52	0,49
Controlled Area	871,13	0,26	0,25

Table 4. Areas estudiadas. Ocupación por unidad de superficie. Fuente: Autores

Table 5. Areas studied. Occupation per unit area. Source: Authors

De los niveles alcanzados en las zonas estudiadas, hall y área controlada de la Figura 3, se obtienen unos niveles de ocupación F y G respectivamente (Tabla 4), los cuales, influyen negativamente en cuanto a confort y seguridad percibidos por los viajeros.

Results

The peak hour is obtained from the train timetables. In the case studied, we obtain the morning and afternoon peak hour, the hours with the highest number of trains running through the station and, consequently, the highest number of seats offered. According to the above figure, the number of seats offered is 2,461 in the morning peak hour and 2,637 in the evening peak hour.

From the levels reached in the areas studied, hall and controlled area in Figure 3, we obtain occupancy levels F and G respectively (Table 4), which have a negative influence on the comfort and safety perceived by passengers. These values have been calculated with normal operating levels and are increased in the event of degraded situations. This can lead to the collapse of the station due to high occupancy.

Conclusiones

- El diseño de las estaciones, aunque sea provisional, debe adaptarse para ofrecer un nivel de comodidad y seguridad que sea percibido por los usuarios. Por eso es necesaria una planificación cuidadosa y una inversión sostenida para garantizar que las estaciones ferroviarias puedan hacer frente al creciente número de pasajeros. Es necesario establecer un diseño óptimo, empezando por el análisis de las horas punta de tráfico de pasajeros en la estación.
- Las horas punta coinciden con el mayor número de llegadas y salidas de trenes, iniciándose así el proceso de cálculo de las superficies necesarias para las distintas áreas que componen estas infraestructuras.
- Este cálculo se basa en la capacidad de absorción de estos elementos, determinándose la oferta como la capacidad de absorción y la demanda como el flujo de usuarios que pretenden pasar por estas zonas.

Conclusions

- The design of stations, even if they are provisional, must be adapted to offer a level of comfort and safety that is perceived by users. This is why there is a need for careful planning and sustained investment to ensure that railway stations can cope with growing passenger numbers. The establishment of an optimal design is necessary, starting with the analysis of the hours of peak passenger traffic at the station.
- The peak hours coincide with the highest number of train arrivals and departures, thus beginning the process of calculating the surface areas required for the different areas that make up these infrastructures.
- This calculation is based on the absorption capacity of these elements, the supply being determined as the absorption capacity and the demand as the flow of users who intend to pass through these areas.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- Benmoussa, M. D. (2011). Analyse des flux piétonniers en gare de Laussane. Tech. Rep., Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Fruin, J. J. (1960). Designing for pedestrian: A level of service concept. New York: The Port of New York Authority.
- Ganansia, F. C. (2014). A promising approach to people flow assessment in railway stations using standard CCTV networks. Transport Research Arena.
- Hoogendoorn, S. B. (2004). Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. Transp. Res. Part B: Methodol(38), 160-190.
- Hoogendoorn, S. D. (2004). Evaluación del diseño de las estaciones de transferencia de Lisboa mediante simulación microscópica de peatones. Actas del Congreso CompRail IX, 135-147.
- IDOM. (2008). Proyecto Constructivo Red arterial ferroviaria de Valencia. Canal de Acceso. .Acceso provisional ancho UIC. Madrid: Ministerio de Fomento - Secretaría de Estado de Infraestructuras.
- INECO, S.A. (2022). Proyecto de construcción para ampliación y remodelación de la estación de Valencia Joaquín Sorolla. Madrid: Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF Alta Velocidad).
- Jiten, S. J. (2016). Effect of Stairway Width on Pedestrian Flow Characteristics at Railway Stations. The International Journal of Transportation Research, 8, 98-112.
- Lam, W. C. (1999). A study of crowding effects at the Hong Kong light rail transit stations. Transp. Res. Part A: Policy Pract. 33, 401-415.
- Nio, I. (2012). Het station als publieke ruimte. Amsterdam: Tech. Rep., Bureau Spoorbouwmeester.
- Zhang, Z. L. (2017). Optimization-based feedback control of passenger flow in subway stations for improving level of service. Transportation Letters-the International Journal of Transportation, 1-12.

EVOLUCIÓN URBANA DEL ENTORNO DEL REAL COLEGIO SEMINARIO DE CORPUS CHRISTI (EL PATRIARCA) DE VALENCIA, ESPAÑA

URBAN EVOLUTION OF THE ENVIRONMENT OF THE ROYAL COLLEGE SEMINARIO DE CORPUS CHRISTI (EL PATRIARCA) OF VALENCIA, SPAIN

Concepción López González
Investigadora en PEGASO Centro de Investigación en Arquitectura, Patrimonio y Gestión Sostenible y adscrita al Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica; Universitat Politècnica de València; Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Catedrática de Escuela Universitaria, Doctora Arquitecta. E-mail: mlopezg@ega.upv.es

Pablo Ariel Escudero
Investigador en PEGASO Centro de Investigación en Arquitectura, Patrimonio y Gestión Sostenible. Arquitecto. Becario predoctoral FPI. E-mail: pabes@arq.upv.es

Luis Cortés Meseguer
Investigador en el Centro de Investigación de Tecnología de la Edificación y adscrito al Departamento de Construcciones Arquitectónicas; Universitat Politècnica de València; Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Profesor contratado doctor, Doctor en Arquitecta. E-mail: luicorme@upv.es

Jorge García Valldecabres
Investigador en PEGASO Centro de Investigación en Arquitectura, Patrimonio y Gestión Sostenible y adscrit al Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica; Universitat Politècnica de València; Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Profesor Titular, Doctor en Arquitecta. E-mail: jgvallde@ega.upv.es

Abstract

This research aims to analyze the urban development that has existed in the surroundings of the building of the Royal Seminary College of Corpus Christi (El Patriarca) in Valencia (Spain). It is an urban area located in the Historic Center of the city. Its urban fabric dates back to Roman times, whose circus reached the vicinity of the Patriarch. It was part of the Muslim city, integrating inside the walls. After the Christian conquest in 1238 it became part of the Jewish quarter and, finally, the group of houses and streets that made up the last Jewish quarter was purchased by Juan de Ribera to build the Royal Seminary College. In the 19th century, Paz Street was opened and in the 20th century, the current Poeta Querol Street was opened through an aggressive intervention that led to the annihilation of the historic urban fabric where five noble houses were located, which were demolished. .

This rich urban history is unknown in most cases. The research being carried out aims to introduce the information into a GIS that allows the documentary management of urban historiography.

Keywords

Urban planning of Valencia, GIS, Urban historiography, Urban management

Introducción

Esta investigación se realiza en el marco del proyecto de investigación "Análisis y desarrollo de la integración HBIM en SIG para la creación de un protocolo de planificación turística del patrimonio cultural de un destino (HBIMSIG-TURISMO)" (PID2020-119088RB-I00) subvencionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España. En este proyecto se pretende analizar aspectos como la conservación preventiva y la gestión del uso público a partir de las potencialidades que ofrece HBIM para la gestión de edificios históricos y SIG para la gestión espacial del territorio donde se encuentran.

El estudio se realiza sobre tres edificios religiosos de la ciudad de Valencia y el entorno urbano donde se asientan. Han sido seleccionados por su importancia arquitectónica, cultural y turística: La Catedral Metropolitana es uno de los edificios más visitados de la ciudad ; la iglesia de San Juan del Hospital fue la primera iglesia que se consagró en la ciudad tras la conquista de Valencia en 1238 y tiene una gran afluencia de visitantes y feligresía por tratarse de una iglesia con mucha actividad religiosa; el Real Colegio Seminario de Corpus Christi, llamado tradicionalmente "el Patriarca", es el primer edifico renacentista de la ciudad y atesora importantes documentos históricos en su archivo de actas notariales, por lo que es muy visitado por los investigadores. Los tres edificios disponen de importantes museos, por lo que los tres reciben un amplio abanico de visitantes. Todos ellos situados en el Distrito 1 Ciutat Vella, considerado también un Bien de Interés Cultural (BIC) en la categoría de centro histórico

En el Proyecto de Investigación cobra gran importancia el análisis del entorno territorial sobre el que se asientan estos tres conjuntos arquitectónicos. En esta aportación nos centramos en el entorno del Patriarca. Se trata de una parte de la ciudad con un gran valor histórico y patrimonial. Su historiografía es desconocida para la mayoría de los ciudadanos y visitantes. La introducción de los datos en el Sistema de Información Geográfica SIG, es uno de los retos que se propone el proyecto.



Imagen 1: Sobre una fotografía aérea de la ciudad de valencia se han marcado los tres edificios: En la parte inferior se encuentra la catedral metropolitana; en el centro se ubica el conjunto de San Juan del Hospital de Jerusalén; y en la parte superior se sitúa el Real Colegio Seminario de Corpus Christi

Image 1. On an aerial photograph of the city of Valencia, the three buildings have been marked: At the bottom is the metropolitan cathedral; In the center is the San Juan complex of the Jerusalem Hospital; and at the top is the Royal College Seminary of Corpus Christi

Introduction

This research is carried out within the framework of the research project "Analysis and development of HBIM integration in GIS for the creation of a tourism planning protocol for the cultural heritage of a destination (HBIMSIG-TURISMO)" (PID2020-119088RB-I00) subsidized by the Ministry of Science and Innovation of the Government of Spain. This project aims to analyze aspects such as preventive conservation and management of public use based on the potential offered by HBIM for the management of historic buildings and GIS for the spatial management of the territory where they are located.

The study is carried out on three religious buildings in the city of Valencia and the urban environment where they are located. They have been selected for their architectural, cultural and tourist importance: The Metropolitan Cathedral is one of the most visited buildings in the city; The church of San Juan del Hospital was the first church that was consecrated in the city after the conquest of Valencia in 1238 and has a large influx of visitors and parishioners because it is a church with a lot of religious activity; The Royal Seminary College of Corpus Christi, traditionally called "the Patriarch", is the first Renaissance building in the city and houses important historical documents in its archive of notarial records, which is why it is highly visited by researchers. All three buildings have important museums, so all three receive a wide range of visitors. All of them located in District 1 Ciutat Vella, also considered an Asset of Cultural Interest (BIC) in the historic center category.

In the Research Project, the analysis of the territorial environment on which these three architectural groups are based is of great importance. In this contribution we focus on the Patriarch's environment. It is a part of the city with great historical and heritage value. His historiography is unknown to most citizens and visitors. The introduction of data into the GIS Geographic Information System is one of the challenges proposed by the project.



Imagen 2: A la izquierda una imagen extraída del SIG indicando el área de estudio en torno al Patriarca. Se han señalado los hitos historiográficos (incluido el antiguo recorrido de la muralla árabe). 1) Universitat de València-Estudi General; 2)La iglesia de San Juan de la cruz; 3) Palacio del Marqués de Dosaguas; 4) Palacio de Cardona; 5) Palacio de los Boïl d´Arenós; 6) Iglesia de Santo Tomás y San Felipe Neri; 7) Iglesia de San Juan del Hospital. A la izquierda imágenes siguiendo el mismo orden.

Image 2. On the left an image extracted from the GIS indicating the study area around the Patriarca. Historiographical milestones have been noted (including the ancient route of the Arab wall). 1) Universitat de València-Estudi General; 2)The church of San Juan de la Cruz; 3) Palace of the Marquis of Dosaguas; 4) Cardona Palace; 5) Palace of the Boïl d'Arenós; 6) Church of Saint Thomas and Saint Philip Neri; 7) Church of San Juan del Hospital. On the left images following the same order.

Objetivos y metodología

En esta investigación se pretende trasladar a un Sistema de Información Geográfica (SIG) los datos relativos a la evolución urbana que ha tenido el entorno del Patriarca a lo largo de los años desde que la ciudad fue conquistada por Jaime I en 1238. Para ello, inicialmente, fueron consultados los planos de la ciudad, desde el más antiguo (Mancelli, 1608) Fig. 3a) hasta el catastro actual. Hay que hacer especial mención a los planos de Tosca (1704) porque aportan una información de gran precisión (Fig. 3b). También el plano de 1728 de Francisco Ferrer, donde se aprecia una pequeña ampliación de la plaza del Patriarca tras el derribo de una casa (fig. 3c) y el Plano anónimo de 1892 (sección 9) donde se delinea con todo detalle el interior de los edificios del patriarca y de la Universidad, señalando en rojo las reformas urbanas que en ese momento se contemplan (Fig 3d).

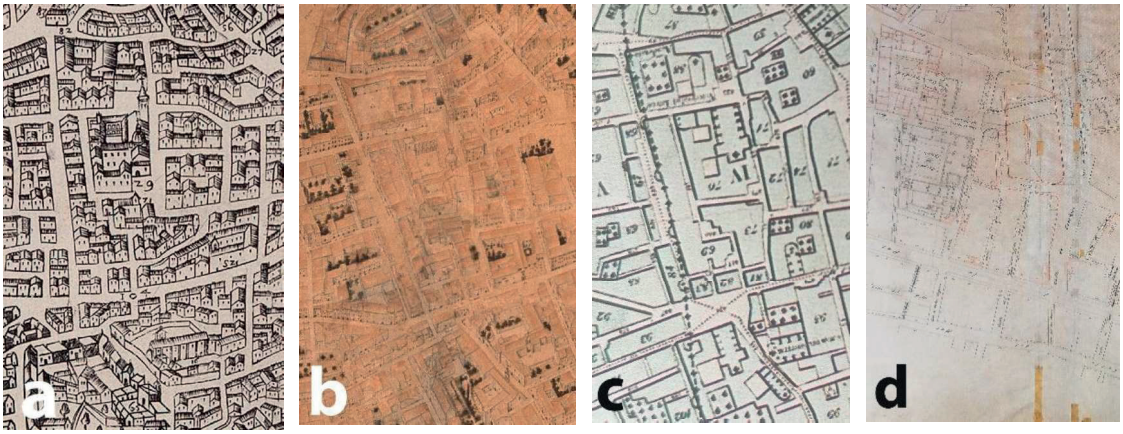


Imagen 3: a) Mancelli 1608; b) Tosca1704; c) Ferrer 1828; Anónimo 1892. Fuente: Herrera et al. 1985

Image 3. a) Mancelli 1608; b) Tosca1704; c) Ferrer 1828; Anonymous 1892. Source: Herrera et al. 1985

Paralelamente se han buscado más información gráfica en el Archivo Histórico Municipal de Valencia. El Fondo Rieta que se custodia en este archivo, ha proporcionado planos de detalle de pequeñas actuaciones destinadas a la regularización de alineaciones como el ensanchamiento de la antigua calle de les Granotes (actual Poeta Querol en su confluencia con la calle de las Barcas), realizada por Salvador Pérez en 1795[1]. También la regularización de la fachada del palacio de Cardona recayente a la calle del mismo nombre realizada por Vicente Cazador en 1814[2]. La regularización de alineaciones de la Plaza Villarrasa, abierta tras el asalto a la judería en 1391 (López y Taberner, 2019) fue llevada a cabo por Carlos Spain en 1892[3]. (Fig. 4)

Se han consultados las fuentes bibliográficas que en mayor medida aportan datos sobre los cambios urbanos en esta zona: *Llibre del Repartiment*; *Libro de Compras de casas encorporadas en el Collegio y Seminario fundado por el Ilustrísimo señor Don Juan de Ribera, Patriarcha y Arçobispo de Valencia*. (Archivo del Colegio del Patriarca); La imagen grabada de la ciudad de Valencia entre 1499 y 1695 (tesis doctoral de Cisneros Álvarez, 2012); Quinientos planos de alineación de la ciudad de Valencia (1860-1909) (Faus Prieto, 2018, Cuadernos de Geografía); Cartografía histórica de la ciudad de valencia. 1704-1910 (Herrera et al., 1985); Nuevas aportaciones al estudio del recinto de la Judería de Valencia delimitado en 1244 (López González, 2014, Sefarad); Trazado y apertura de la calle de la Paz: del sventramento a la protección patrimonial (Taberner, 2003, Historia de la ciudad III); Revisión y nuevas contribuciones al límite meridional y oriental de la segunda judería de valencia y fijación de los límites de la tercera y última judería. 1390-1392-1492 (López González y Máñez Testor, 2020, Sefarad); Evolution of the urban image of the University of Valencia district seen through historical cartography and architectural drawings (López González y Taberner Pastor, 2019, Disegnarecon). Los datos extraídos se trasladaron a AutoCad y finalmente fueron implementados en SIG mediante el software ArcGIS..

[1] AHMV F. Rieta ER 1-11 G leg. 8

[2] AHMV F. Rieta Legajo 65C

[3] AHMV F. Rieta ERB 11

Objectives and methodology

This research aims to transfer to a Geographic Information System (GIS) the data related to the urban evolution that the Patriarch's environment has had over the years since the city was conquered by James I in 1238. To do this, Initially, the city plans were consulted, from the oldest (Mancelli, 1608) Fig. 3a) to the current cadastre. Special mention must be made of the Tosca plans (1704) because they provide highly precise information (Fig. 3b). Also the 1728 plan by Francisco Ferrer, where a small extension of the Plaza del Patriarca can be seen after the demolition of a house (fig. 3c) and the anonymous plan from 1892 (section 9) where the interior of the building is outlined in detail. the buildings of the patriarch and the University, indicating in red the urban reforms that were being contemplated at that time (Fig 3d).

At the same time, more graphic information has been searched in the Municipal Historical Archive of Valencia. The Rieta Fund, which is kept in this archive, has provided detailed plans of small actions aimed at regularizing alignments such as the widening of the old Calle de les Granotes (current Poeta Querol at its confluence with Calle de las Barcas), carried out by Salvador Pérez in 1795[4]. Also the regularization of the façade of the Cardona palace facing the street of the same name carried out by Vicente Cazador in 1814[5]. The regularization of the alignments of Plaza Villarrasa, opened after the assault on the Jewish quarter in 1391 (López and Taberner, 2019), was carried out by Carlos Spain in 1862[6] (Fig. 4)

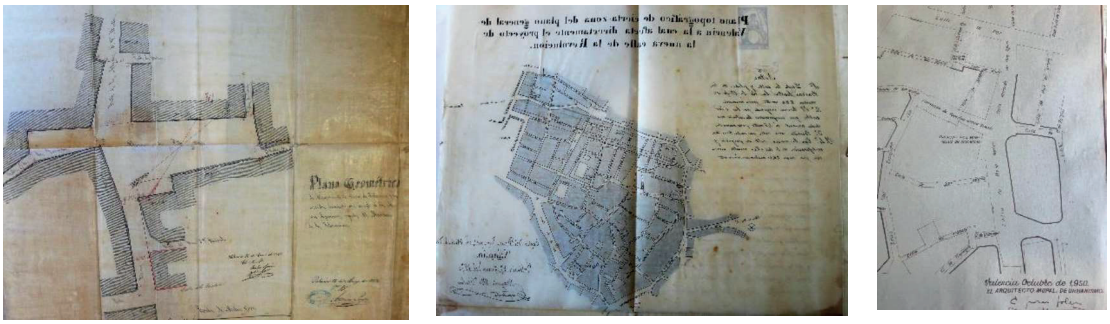


Imagen 4: A la izquierda plano de alineaciones de Carlos Spair y Pérez de 1962. En el centro, plano de alineaciones de Joaquín Calvo en 1870 donde se delinea por primera vez la apertura de la calle de la Paz, entonces denominada de la Revolución. A la derecha plano de alineaciones de Camilo Grau en 195 para la apertura de la calle de Poeta Querol

Image 4. On the left, alignment plan by Carlos Spair y Pérez from 1962. In the center, alignment plan by Joaquín Calvo in 1870 where the opening of Peace Street, then called Revolution Street, is outlined for the first time. On the right, Camilo Grau's alignment plan at 195 for the opening of Poeta Querol street

The bibliographic sources that provide the greatest data on urban changes in this area have been consulted: Llibre del Repartiment; Purchase Book of houses incorporated in the College and Seminary founded by the Most Illustrious Lord Don Juan de Ribera, Patriarch and Archbishop of Valencia. (Archive of the Patriarch's College); The engraved image of the city of Valencia between 1499 and 1695 (doctoral thesis by Cisneros Álvarez, 2012); Five hundred alignment plans of the city of Valencia (1860-1909) (Faus Prieto, 2018, Cuadernos de Geografía); Historical cartography of the city of Valencia. 1704-1910 (Herrera et al., 1985); New contributions to the study of the Jewish quarter of Valencia delimited in 1244 (López González, 2014, Sefarad); Layout and opening of Peace Street: from sventramento to heritage protection (Taberner, 2003, History of the city III); Review and new contributions to the southern and eastern limit of the second Jewish quarter of Valencia and establishment of the limits of the third and last Jewish quarter. 1390-1392-1492 (López González and Máñez Testor, 2019, Sefarad); Evolution of the urban image of the University of Valencia district seen through historical cartography and architectural drawings (López González and Taberner Pastor, 2019, Disegnarecon). The extracted data was transferred to AutoCad and finally implemented in GIS using ArcGIS software.

[4] AHMV F. Rieta ER 1-11 G leg. 8

[5] AHMV F. Rieta Legajo 65C

[6] AHMV F. Rieta ERB 11

Resultados y Conclusiones

Se establecen tres etapas de transformaciones o *sventramentos* importantes en el área de estudio:

1) Tras la conquista de Valencia en 1238, el rey Jaime I establece un recinto destinado a barrio judío situado junto a la puerta de la Xerea de la antigua muralla árabe (López, 2014). Este barrio estaba cerrando y amurallado (Fig. 5). La judería fue ampliada hacia el sur en 1390, ocupando los terrenos sobre los que asienta el actual Colegio de Corpus Christi (López y Máñez, 2020). Tras el asalto a la judería de 1391 y la huida de la mayoría de los judíos, el barrio quedó reducido al ámbito que ocupa el Patriarca. En ese momento se produce una importante intervención urbanística que da como resultado la formación de la plaza de Villarrasa (López y Taberner, 2019). En 1493 fue adquirida una casa de Isabel Saranyo para la construcción del *Studi General* o Universidad y en 1498 se contrató al insigne Pere Compte, autor de la Lonja, para que diseñara y construyera nueve salas (Vives 1902: 83-85).

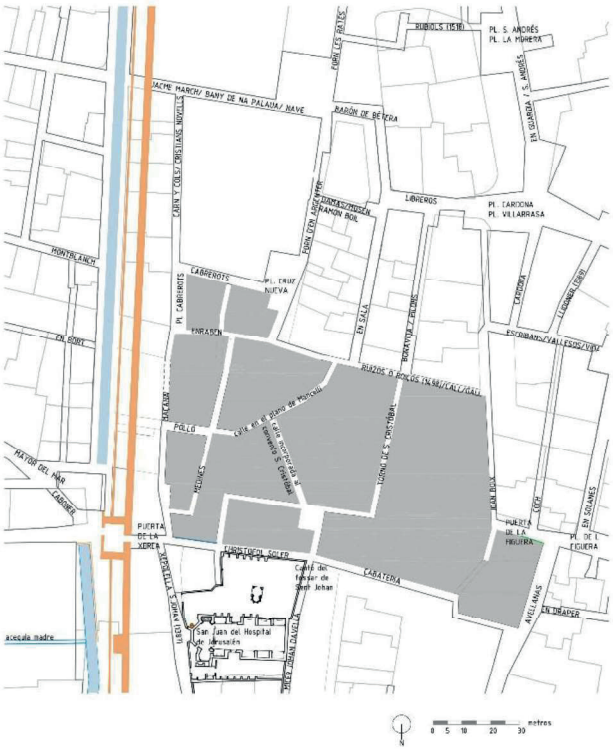


Imagen 5: Ámbito que ocupaba la antigua judería con algunas calles que han desparecido.

Image 5 Area occupied by the old Jewish quarter with some streets that have disappeared

2) En 1586, el Patriarca y Arzobispo de Valencia Juan de Ribera, compra las casas y calles que habían ocupado el último recinto de la judería para la construcción del Real Colegio de Corpus Chrisiti. Tras el análisis del *Libro de Compras de casas encorporadas en el Collegio y Seminario fundado por el Ilustrísimo señor Don Juan de Ribera, Patriarcha y Arçobispo de Valencia* (Anónimo, 1600)[7] se comprueba que se compraron un total de 49 propiedades y se mencionan diversas calles Alguaziría, Buidar les campanes, Nau (antes de Napalaua), Carnicols, Judería, Plaza de Cabrerots, Señor de Bétera, Cruz Nueva y de las Escuelas, (Fig. 6). La construcción de este imponente edifico que ocupa una manzana completa duró 30 años (1586-1615), aunque estaba prácticamente finalizado en 1608 como se puede apreciar en el plano de Mancelli (Fig. 3a).

[7] En el Archivo del Real Colegio de Corpus Christi se conserva el libro original Anónimo de 1600 "Libro de Compras de casas encorporadas en el Collegio y Seminario fundado por el Illustrisimo señor Don Juan de Ribera, Patriarcha y Arcobispo de Valencia ". En 1892 se hizo una copia por autor anónimo: "Libro de Construcción y Fábrica

Results and conclusions

Three stages of important transformations or events are established in the study area:

1) After the conquest of Valencia in 1238, King James I established an enclosure destined for a Jewish quarter located next to the Xerea gate of the old Arab wall (López, 2014). This neighborhood was closing and walled, although free movement of Jews, Arabs and Christians was allowed (Fig. 5). This Jewish quarter was expanded to the south in 1390, occupying the land on which the current Corpus Christi College sits (López and Máñez, 2020). After the assault on the Jewish quarter in 1391 and the flight of most of the Jews, the neighborhood was reduced to the area occupied by the Patriarch's architectural complex. At that time, an important urban intervention occurred that resulted in the formation of the Plaza de Villarrasa (López and Taberner, 2019). In 1493 a house was acquired from Isabel Saranyo for the construction of the Studi General or University and in 1498 the distinguished Pere Compte, author of the Lonja, was hired to design and build nine rooms (Vives 1902: 83-85).

2) In 1586, the Patriarch and Archbishop of Valencia, Juan de Ribera, bought the houses and streets that had occupied the last area of the Jewish quarter for the construction of the Royal College of Corpus Christi. After the analysis of the *Purchase Book of houses incorporated in the College and Seminary founded by the Most Illustrious Lord Don Juan de Ribera, Patriarch and Archbishop of Valencia* (Anonymous, 1600)[8], it is found that a total of 49 properties were purchased and various streets are mentioned. . There is very little data regarding the urban fabric that existed before it was intervened, although some streets have been identified according to the indications in the text: Calle de la Alguaziría, Buidar les campanes, de la Nau (before Napalaua), Carnicols, Judería, Plaza of Cabrerots, of the Lord of Bétera, of the New Cross and of the Schools, (Fig. 6). The construction of this imposing building that occupies an entire block lasted 30 years (1586-1615), although it was practically completed in 1608 as can be seen in Mancelli's plan (Fig. 3a).

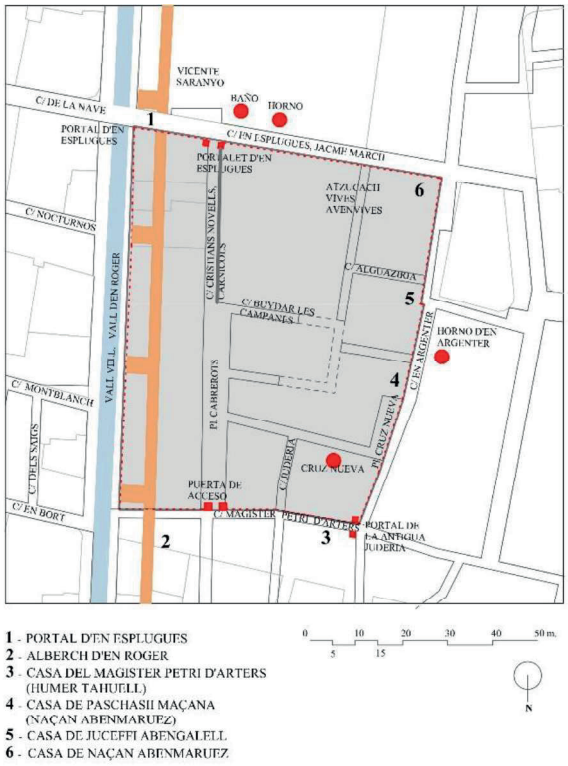


Imagen 6: Ámbito de la última judería sobre el que se edificó el Real Colegio de Corpus Christi. Se han identificado algunas calles y algunos hitos utilizados en el texto de la delimitación del último barrio judío (López y Máñez, 2019)

[8] In the Archive of the Royal College of Corpus Christi, the original Anonymous book from 1600 is preserved "Book of Purchases of houses incorporated in the College and Seminary founded by the Most Illustrious Lord Don Juan de Ribera, Patriarch and Archbishop of Valencia." In 1892 a copy was made by an anonymous author: "Book of Construction and Factory

Image 6 Area of the last Jewish quarter on which the Royal College of Corpus Christi was built. Some streets and some landmarks used in the text of the delimitation of the last Jewish neighborhood have been identified (López and Máñez, 2019).

3) En los siglos XIX y XX se producen las dos transformaciones urbanas que afectan al entorno de análisis de forma más agresiva: La apertura de la calle de la Paz y la apertura de la calle de Poeta Querol. El espíritu progresista de las autoridades del siglo XX llevó a realizar diversas intervenciones destinadas a la ampliación de calles y plazas como Castellvins, Salvá, plaza del Patriarca, Rodrigo Botet, y la más importante: la apertura de la calle de la Paz propuesta por los arquitectos Sorní y Mercader en 1869 y finalizada a comienzos del siglo XX (Taberner, 2003).

En 1950, la municipalidad plantea la apertura de la actual calle de Poeta Querol. Esta sería la actuación más aniquiladora del entramado histórico que se ha efectuado en este entorno. Su recorrido estaba formado por una sucesión de pequeñas calles y plazuelas donde se ubicaban hasta once casas señoriales, de las cuales fueron derribadas cinco: los dos palacios de la familia Castellvins, el palacio de los Nieulant, la de los Escrivá de Híjar, y la del Marqués de Mirasol (López González, 1996).

En la Imagen 7 puede observarse las transformaciones urbanas que se han operado en el entorno del Real Colegio de Corpus Christi durante los siglos XIX y XX. Sobre alineaciones extraídas del plano de Tosca y Mancelli, se han sombreado las manzanas correspondientes al catastro actual.

Se puede concluir que el entorno inmediato al Patriarca se ha mantenido urbanísticamente estable, lo que contribuye a fortalecer y engrandecer la imagen arquitectónica de este potente edificio. Sin embargo, El urbanismo del área geográfica donde se ubica, ha sido un urbanismo agresivo. La apertura de la actual calle de Poeta Querol, ha borrado la historia urbana, histórica y arquitectónica de un barrio. Su memoria sólo es posible a través de los documentos históricos. Su integración en sistemas digitales puede colaborar de forma excelente a su conservación y conocimiento.

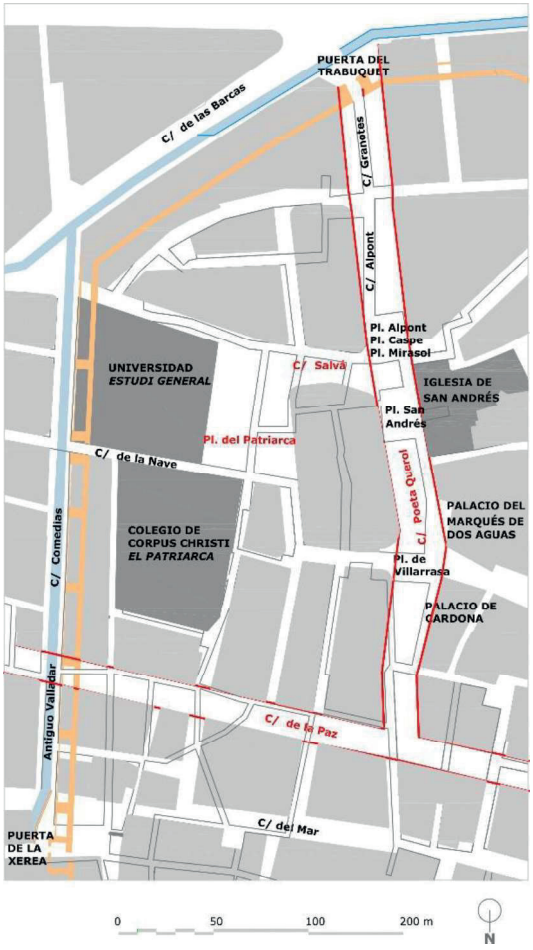


Imagen 7: Sobre un plano de alineaciones derivadas de los planos de Tosca y Mancelli, se superponen las manzanas sombreadas del catastral actual. En rojo las actuaciones más agresiva de los siglos XIX y XX

Image 7 On an alignment plan derived from the Tosca and Mancelli plans, the shaded blocks of the current cadastral are superimposed. In red the most aggressive actions of the 19th and 20th centuries

3) In the 19th and 20th centuries, two urban transformations occurred that affected the analysis environment most aggressively: The opening of Calle de la Paz and the opening of Calle de Poeta Querol. The progressive spirit of the authorities of the 20th century led to various interventions aimed at expanding streets and squares such as Castellvins, Salvá, Plaza del Patriarca, Rodrigo Botet, and the most important: the opening of Calle de la Paz proposed by the architects Sorní and Mercader in 1869 and completed at the beginning of the 20th century (Taberner, 2003).

In 1950, the municipality proposed the opening of the current Poeta Querol street. This would be the most annihilating action of the historical fabric that has been carried out in this environment. Its route was made up of a succession of small streets and squares where up to eleven stately homes were located, of which five were demolished: the two palaces of the Castellvins family, the Nieulant palace, the Escrivá de Híjar palace, and the of the Marquis of Mirasol (López González, 1996).

In Image 7 you can see the urban transformations that have occurred around the Royal College of Corpus Christi during the 19th and 20th centuries. On alignments extracted from the Tosca and Mancelli plan, the blocks corresponding to the current cadastre have been shaded.

It can be concluded that the immediate surroundings of the Patriarch have remained urban-stable, which contributes to strengthening and enlarging the architectural image of this powerful building. However, the urban planning of the geographical area where it is located has been an aggressive urban planning. The opening of the current Poeta Querol street has erased the urban, historical and architectural history of a neighborhood. Its memory is only possible through historical documents. Its integration into digital systems can contribute excellently to its conservation and knowledge.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- Anónimo (1892). Libro de Construcción y Fábrica, f.. 64r. Copia de: Anónimo (1600). Libro de Compras de casas encorporadas en el Collegio y Seminario fundado por el Ilustrísimo señor Don Juan de Ribera, Patriarcha y Arçobispo de Valencia. Archivo del Colegio del Patriarca. Valencia
- Cisneros Álvarez, P. (2012). La imagen grabada de la ciudad de Valencia entre 1499 y 1695, Tesis doctoral inédita. Universitat de València, 711 pp.
- Faus Prieto, A. (2018). Quinientos planos de alineación de la ciudad de Valencia (1860-1909). *Cuadernos de geografía*, 100, 121-148
- Herrera, J.M., Llopis, A., Martinez, R., Perdigón, L. y Taberner, F. (1985). Cartografía histórica de la ciudad de valencia. 1704-1910. Valencia: Ayuntamiento de Valencia
- López González, C. (1996). Análisis gráfico de las fachadas de los edificios señoriales construidos durante los siglos XIV y XV en la ciudad de Valencia. *EGA revista de expresión gráfica arquitectónica*, 4, 186-190
- López González, C. (2014). Nuevas aportaciones al estudio del recinto de la Judería de Valencia delimitado en 1244. *Sefarad* 74 (1) 10.3989/sefarad.2014.v74.i1
- López González, C. y Mañez Testor, S. (2020) Revisión y nuevas contribuciones al límite meridional y oriental de la segunda judería de Valencia y fijación de los límites de la tercera y última judería: 1390-1392-1492. *Sefarad*, 1 (8), 25 - 54. 10.3989/sefarad.020-002
- López González, C. y Taberner Pastor, F. (2019). Evolution of the urban image of the University of Valencia district seen through historical cartography and architectural drawings. *Disegnarecon* 22 (12), 14.1 - 14.18.
- Taberner Pastor, F. (2003). Trazado y apertura de la calle de la Paz: del sventramento a la protecciòn patrimonial. En Historia de la ciudad III Arquitectura y transformación urbana. Valencia: Ajuntament de Valencia-CTAV
- Vives y Liern, V. (1902). Las Casas de los Estudios de Valencia. Valencia: Talleres de Imprimir Vda. de Emilio Pascual

CHAPTER 7

HUMAN RESOURCES

CAPÍTULO 7 ***RECURSOS HUMANOS***

© 2025, ETS de Ingeniería de Edificación. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA - 538

LA ARQUITECTURA SOCIAL DE AUTOR. DESDE EL ESTUDIO DEL PROYECTO ORIGINAL HASTA SU RECALIFICACIÓN ENERGÉTICA

AUTHOR'S SOCIAL HOUSING. FROM THE STUDY OF THE ORIGINAL PROJECT TO THE ENERGY REQUALIFICATION

Giuseppe Angileri
Dottorando presso il Dipartimento di Ingegneria; Università di Messina; Contrada Di Dio, 98158 Sant'Agata, Messina ME, Italia, Ingegnere Edile per il Recupero.
PhD student at the Department of Engineering; University of Messina; Contrada Di Dio, 98158 Sant'Agata, Messina ME, Italy. Construction Engineering for recovery. E-mail: giuseppe.angileri@studenti.unime.it

Graziella Bernardo
Profesoressa di Scienza e Tecnologia del Materiali, Dottore di ricerca. Dipartimento per l'Innovazione Umanistica, Scientifica e Sociale - D.I.U.S.S Universitá degli Studi della Basilicata; via Lanera 20,75100, Matera, Italia. Professor of Materials Science and Technology, Senior lecture and researcher, Department for Humanistic, Scientific, and Social Innovation. University of Basilicata; via Lanera, 20,75100, Matera, Italy. Email: graziella.bernardo@unibas.it

Giuseppina Currò
Dottoranda presso il Dipartimento di Ingegneria; Università di Messina; Contrada Di Dio, 98158 Sant'Agata, Messina ME, Italia. Ingegnere Edile per il Recupero.
PhD student at the Department of Engineering; University of Messina; Contrada Di Dio, 98158 Sant'Agata, Messina ME, Italy. Construction Engineering for recovery. Email: giuseppina.curro@studenti.unime.it

Luis Palmero Iglesias
Profesor Titular de Universidad; Departamento Construcciones Arquitectónicas, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Doctor por la Universitat Politècnica de València, Doctor Europeus por la Facoltà di Architettura di Firenze, Ingeniero de Edificación, y Licenciado en Bellas Artes por la Universitat Politècnica de València,
Associate Professor; Department of Architectural Constructions, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, Spain. PhD from the Universitat Politècnica de València, PhD Europeus from the Facoltà di Architettura di Firenze, Building Engineer, and Degree in Fine Arts from the Universitat Politècnica de València. E-mail: lpalmero@csa.upv.es

Giovanni Francesco Russo
Dottorando presso il Dipartimento di Ingegneria; Università di Messina; Contrada Di Dio, 98158 Sant'Agata, Messina ME, Italia. Ingegnere Edile per il Recupero.
PhD student at the Department of Engineering; University of Messina; Contrada Di Dio, 98158 Sant'Agata, Messina ME, Italy. Construction Engineering for recovery. Email: giovanni.russo6@studenti.unime.it

Abstract

In Spain, social housing experienced an evolutionary history characterized by design experimentation and by the adoption of innovative technologies for the construction of important works. To the point of being considered today as important architectural heritages to be safeguarded. The contribution illustrates peculiarities and original solutions present in a residential complex built in Valencia in the late 1950s by architect Santiago Artal Ríos. In the complex, named Santa María Micaela, the relationships between formal components, principles of the Modern Movement and technical-constructive aspects are distinguishable, achieving a balance between the different technological-constructive, organizational-distributive, environmental-climatic and figurative-formal subsystems. In addition to the analysis of the structure and architecture, an analysis was carried out from the point of view of energy and climatic comfort of a typical apartment in the building in order to define how an architecture more than fifty years old meets the most modern housing standards and what the solutions might be in a possible energy upgrading project that first and foremost safeguards the architectural peculiarities of the structure..

Keywords

Social housing, Architectural design, Energy requalification

Introducción: Orígenes y motivaciones del estudio

En España, aunque con cierto retraso en comparación con otros países europeos, la construcción de viviendas sociales ha tenido una singular historia evolutiva caracterizada por experimentaciones de diseño e innovaciones tecnológicas firmadas por los arquitectos más célebres de la época moderna.

En 1930 se fundó el Grupo de Artistas y Técnicos Españoles para el Progreso de la Arquitectura Contemporánea - GATEPAC, una especie de sección española del Congrès Internationaux d'Architecture Moderne - CIAM (1928-1959), que animaría los debates sobre el panorama arquitectónico contemporáneo en el país hispano. Desde 1931 hasta el comienzo de la Guerra Civil (1937), el movimiento promovió los principios de la arquitectura de vanguardia, en particular el racionalismo (funcionalismo, pureza de formas, renovación, reparto), a través de la revista Documentos de Actividad Contemporánea - AC. La posterior dictadura militar del General Francisco Franco obstaculizó los debates en curso sobre la modernidad, prefiriendo estilos más tradicionalistas, autoritarios y monumentales para los edificios públicos, y tipos de construcción vernácula para las construcciones residenciales. Para expresar libremente su creatividad, los diseñadores de vanguardia se vieron obligados a trasladarse a otros países.

No fue hasta la década de 1950, cuando la dictadura franquista lanzó un programa de modernización en el país, que los arquitectos progresistas tuvieron la oportunidad de experimentar con las nuevas visiones del Movimiento Moderno en proyectos como el de los Poblados Dirigidos y los Concursos de Viviendas sociales (1956 -1966). El nuevo modelo de edificación consistía en construcciones en "torre", una edificación de altura con viviendas dúplex en régimen de cooperativa. Desarrollado y perfeccionado a lo largo del tiempo, esta idea resolvía el problema de la demanda de vivienda y el consumo de suelo sin descuidar aspectos de confort y bienestar para los residentes. De hecho, siguiendo los dictados del movimiento higienista y los nuevos conocimientos en el campo de la salud, el diseño también tuvo en cuenta aspectos encaminados a mejorar las condiciones de confort, es decir, la exposición, la radiación solar de las habitaciones y la ventilación natural.

La contribución destaca las peculiaridades y originalidad de la vivienda social ibérica a través del estudio tipológico y constructivo de un complejo residencial diseñado por el arquitecto Santiago Artal Ríos en la década de 1950 en Valencia. La investigación profundizará en los aspectos técnico-funcionales originales, también con miras a posibles intervenciones de mantenimiento y/o modernización energética de la envolvente del edificio que respeten la ejemplar combinación entre calidad estético-formal y confort termo-higrométrico perteneciente al autor.

Introduction: Origins and motivation of the study

In Spain, although with a certain delay compared to other European countries, social housing has had a singular evolutionary history marked by design experimentation and technological innovations signed by the most famous architects of the Modern period.

In 1930 the Group of Spanish Artists and Technicians for the Progress of Contemporary Architecture - GATEPAC was founded, a kind of Spanish section of the Congrès Internationaux d'Architecture Moderne - CIAM (1928-1959), which would animate the debates on the contemporary architectural scene at national level. From 1931 until the beginning of the Civil War (1937), the movement promoted the principles of *avant-garde* architecture, particularly rationalism (functionalism, purity of form, renewal, sharing), through the magazine Contemporary Activity Documents - C.A. The subsequent military dictatorship of General Francisco Franco hindered the ongoing debates on modernity, preferring more traditionalist, authoritarian, monumental styles for public buildings, and vernacular building types for residential constructions. To freely express their creativity, *avant-garde* designers were forced to move to other countries.

It was not until the 1950s, when new programmes for future building are initiated a modernisation in the country, that progressive architects had the opportunity to experiment with the new visions of the Modern Movement for example the project call Managed Villages and Social Housing Competitions (1956 -1966). The new building model consisted of 'tower' constructions with

duplex housing in a cooperative regime. Developed and perfected over time, it solved the problem of housing demand and land consumption, without neglecting aspects related to the comfort and well-being of residents. In fact, following the dictates of the hygienist movement and the new knowledge in the health field, the design also considered aspects aimed at improving comfort conditions, i.e. exposure, solar radiation of the rooms and natural ventilation.

The contribution highlights the peculiarities and originality of Iberian social housing through the typological and constructive study of a residential complex designed by architect Santiago Artal Ríos in the 1950s in Valencia. The research will delve into the original technical-performance aspects, also with a view to possible maintenance interventions and/or energy modernization of the envelope that are respectful of the exemplary combination of aesthetic-formal quality and thermo-hygrometric comfort belonging to the author.

El proyecto del Complejo Santa María Micaela

Entre todos los edificios de viviendas sociales construidos en Valencia entre finales de la década de 1950 y 1960, destaca el Complejo Santa María Micaela de la Cooperativa de Agentes Comerciales, diseñado por Santiago Artal Ríos en 1958 y completado en 1961, por la originalidad de su diseño arquitectónico y la elección formal/funcional de los materiales. El edificio, ubicado en la esquina de la Calle Santa Mª Micaela y la Avenida Pérez Galdós en el barrio de Petxina, consta de tres bloques lineales dispuestos a lo largo del perímetro rectangular del terreno (45.50x83.40 m), dando forma con sus volúmenes a un área central libre destinada a actividades recreativas de uso comunitario.

El complejo se organiza en 138 unidades de vivienda, sin personal de servicio, construidas para una clientela de clase media y divididas en los tres edificios. Los dos edificios más altos cuentan con 13 pisos, dispuestos en forma de L y se organizan en 6 plantas de apartamentos dúplex más la planta baja para uso comercial. El edificio bajo, con tres elevaciones, comprende dos niveles de apartamentos de tipo sencillo y sirve como enlace para acceder a toda la estructura, garantizando, con su baja altura, luz al patio interior y una vista al bloque de atrás. Todos los apartamentos dúplex se caracterizan por una clara distinción entre la zona de estar en el piso inferior (sala de estar-comedor, cocina y aseo) y la zona de descanso en el piso superior (habitaciones y baño), con una superficie que varía de 120 m^2 a 159 m^2 según las diferentes tipologías (6) de apartamentos.

La composición arquitectónica de las fachadas queda definida por los pilares y vigas de hormigón armado expuestos con esquinas biseladas a 45° con una separación de 4.80x4.80 metros. La malla que forma la estructura se alterna con paredes regulares de ladrillo amarillo con juntas de mortero escalonadas; marcos de ventanas y puertas con marcos de hierro de color negro de altura completa (desde el intradós hasta el extradós de las losas entre pisos) con un antepecho bajo ventana de vidrio reticular cubierto con un panel rojo opaco; paredes de los pasillos que conducen a las viviendas y con las barandas de los balcones hechas de hormigón blanco siguiendo la tipología brasileña del *cobogó*, elemento que permite el paso de la luz y la ventilación.

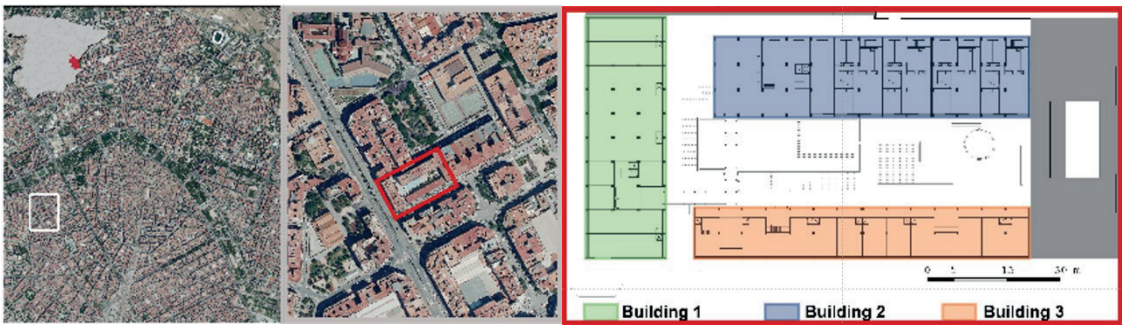


Imagen 1. Contexto territorial de la residencia. Image 1. Territorial context of the residential

The Santa María Micaela residential complex project

Among all the social housing buildings constructed in Valencia between the late 1950s and 1960s, the Santa María Micaela Complex of the Commercial Agents' Cooperative, designed by Santiago Artal Ríos in 1958 and completed in 1961, stands out for the originality of its architectural design and the formal/functional choice of materials. The building, located on the corner of Calle Santa Mª Micaela and Avenida Pérez Galdós in the Petxina neighbourhood, consists of three linear blocks arranged along the rectangular perimeter of the plot (45.50x83.40 m), giving shape with its volumes to a central free area destined for recreational activities for community use.

The complex is organised into 138 housing units, without service staff, built for a middle-class clientele and divided between the three buildings. The two tallest buildings have 13 storeys, arranged in an L-shape, and are organised into 6 floors of duplex flats plus the ground floor for commercial use. The lower building, with three elevations, comprises two levels of single flats and serves as a link to access the entire structure, guaranteeing, with its low height, light to the inner courtyard and a view to the block behind. All the duplex flats are characterised by a clear distinction between the living area on the lower floor (living-dining room, kitchen and toilet) and the sleeping area on the upper floor (bedrooms and bathroom), with a surface area varying from 120 m2 to 159 m2 depending on the different typologies (6) of flats.

The architectural composition of the facades is defined by the exposed reinforced concrete columns and beams with 45° chamfered corners spaced 4.80x4.80 metres apart. The mesh that forms the structure alternates with regular yellow brick walls with staggered mortar joints; window and door frames with full-height black iron frames (from the soffit to the top of the slabs between floors) with a lattice glass parapet-window covered with an opaque red panel; walls of the corridors leading to the flats and balcony railings made of white concrete following the Brazilian typology of the cobogó, an element that allows light and ventilation to pass through.

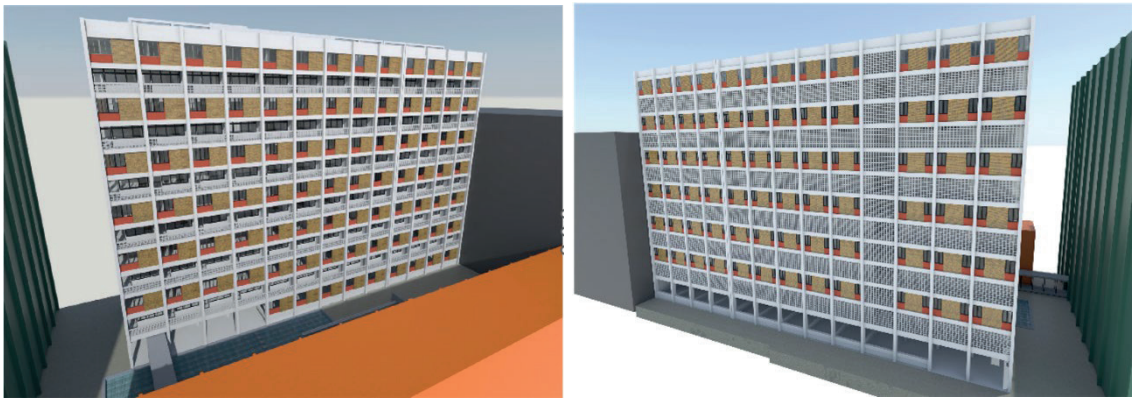


Imagen 2. BIM 3D del edificio n°2, fachada principal y trasera. Image 2. 3D BIM of the building n°2, principal and rear façade

Las elecciones de diseño de Santiago Artal Ríos

La composición del conjunto se caracteriza además por soluciones técnicas refinadas que aportan cierta personalidad al conjunto, como por ejemplo el pasillo que conecta los tres bloques con pavimento gris antideslizante, un techo de losa de hormigón cubierto en el intradós con listones de madera y apoyado en delgados pilares de hierro negro, todo muy racional de acuerdo con los conceptos de la arquitectura moderna. Las superficies de la entrada principal están terminadas con paneles de madera con la excepción de una pared revestida en mármol verde griego. Las escaleras de los bloques altos están hechas de hormigón armado con escalones de piedra artificial y una barandilla autoportante unida a dos pilares de hierro que parten desde la planta baja y suben hasta la terraza. Las paredes de las áreas comunes y las terrazas de los pisos están completamente cubiertas de mosaicos con teselas de vidrio de diferentes colores, para los primeros, y en tonos de azul, para los segundos. La atención a la selección de materiales, diferentes en composición y acabado superficial, hace que el conjunto sea vivo y policromado, creando alternancia y movimiento constante entre opacidad, transparencias y color.

Dentro de las viviendas, el arquitecto Artal también cuida mucho la elección y el uso de materiales a los efectos de ser elementos decorativos, utilizando materiales más simples que los elegidos para los espacios compartidos. Para los baños y cocinas, adopta un suelo cerámico antideslizante "Nolla", cuyo nombre hace referencia a la técnica utilizada para hacer mosaicos hechos a mano típicos de la región valenciana, creados por la familia del mismo nombre. El pasillo, por otro lado, está iluminado por un tragaluz de vidrio coloreado. Tiene ventanas con aberturas de diferentes tamaños según el tamaño y la función de la habitación para garantizar el intercambio de aire durante todo el año y maximizar o minimizar el efecto de los vientos según su dirección. Para optimizar el espacio, crea nichos en las paredes para colocar armarios y la bañera. En los balcones, las luces de techo están empotradas en el techo para no crear una perturbación visual en la geometría de las fachadas.

Se ha prestado una atención adicional al diseño de la infraestructura tecnológica. Dentro de los apartamentos, las tuberías se dejan al descubierto para crear una solución versátil motivada también por el grosor reducido de las tomas, que no permite la perforación. Los sistemas están centralizados a través de las chimeneas de ventilación de los baños y se instala una escalera de servicio, que va desde el sótano hasta el techo, para facilitar el mantenimiento. En el sótano, se ha creado un túnel de 1.50x2.00 metros de altura para albergar las tuberías y tomas de aire de las chimeneas de ventilación y se ramifica a lo largo de toda la longitud de los tres edificios. Es fácil ver cómo todas las instalaciones verticales y subterráneas son accesibles. Además, se instaló una lavandería mecánica industrial en la terraza de uno de los tres bloques para lavar y secar la ropa.

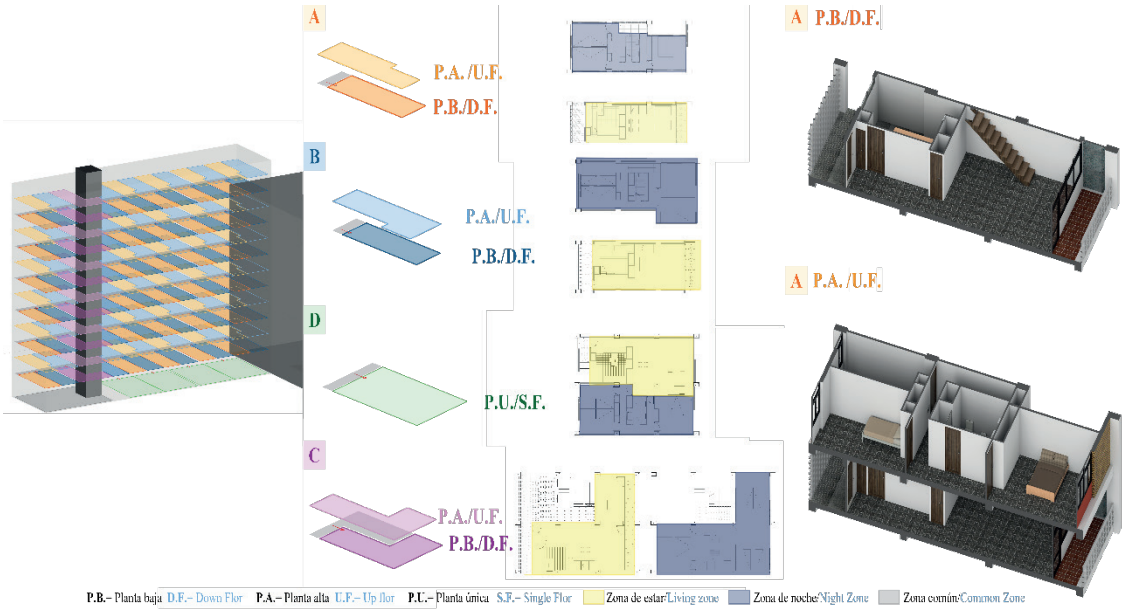


Imagen Tipos de vivienda en el edificio nº 2 y distinción entre zonas de estar y de noche - Sección axonométrica de la unidad de tipo A edificio 2, dúplex, 130 m². Image 2 Housing types in building no. 2 and distinction between living and Night zones - Axonometric cross-sections of unit type A building 2, duplex, 130 m².

The application of rationalist principles and design quality

The decorative apparatus is further characterised by refined technical solutions that lend a certain courtliness to the whole, such as the walkway connecting the three blocks with grey non-slip paving, a reinforced concrete slab roof covered on the intrados with wooden battens and resting on thin black iron pillars. The surfaces of the main entrance are finished with wood panels with the exception of a wall clad in green Greek marble. The stairs of the high blocks are made of reinforced concrete with artificial stone steps and a self-supporting handrail attached to two iron pillars that start from the ground floor and go up to the terrace. The walls of the common areas and flat terraces are entirely covered in mosaics with glass tesserae in different colours, for the former, and in shades

of blue, for the latter. Attention to the selection of materials, different in composition and surface finish, makes the whole lively and polychrome, creating alternation and constant movement between opacity, transparencies and colour. Inside the home Artal Rìos also takes great care in the choice and use of decorative elements, while using simpler materials than those chosen for the shared spaces. For the bathrooms and kitchens he adopts "Nolla" ceramic non-slip flooring, the name of which refers to the technique used to make handmade mosaics typical of the Valencian region, created by the family of the same name. The corridor, on the other hand, is lit by a coloured glass transom. It has windows with different sized openings depending on the size and function of the room to ensure both year-round air exchange and to maximise or minimise the effect of winds depending on their direction. In order to optimise space, he creates wall niches to place cupboards and the bath tub. In the balconies, ceiling lights are recessed into the ceiling so as not to create a visual disturbance in the geometry of the façades.

Special attention has been paid to the design of the technological part. Inside the flats, installations such as pipes are left exposed to create a versatile solution, which is also motivated by the reduced thickness of the sockets, which does not allow drilling. The systems are centralised through the ventilation chimneys in the bathrooms and a service staircase from the basement to the roof is installed to facilitate maintenance. In the basement, a 1.50x2.00 metre high tunnel has been created to house the pipes and air intakes of the ventilation stacks and branches out along the entire length of the three buildings. It is easy to see how all vertical and underground installations are accessible. In addition, an industrial mechanical laundry was installed on the terrace of one of the three blocks for washing and drying clothes.

ANÁLISIS ENERGÉTICO: ESTUDIO DE LA VENTILACIÓN Y PROPUESTA DE MEJORA

El caso de estudio se centró en una vivienda dúplex a modo de unidad de muestra, y se realizó una inspección para comprobar cómo la distribución original ha permanecido inalterada a lo largo del tiempo, manteniendo los acabados, las puertas y ventanas originales de la fase de diseño.
Se investigó el estado térmico del conjunto del edificio, estudiando en detalle los flujos de ventilación, que desempeñaron un papel importante en el diseño del edificio: se identificaron tres vías principales de ventilación, que afectan a las estancias interiores del piso analizado, con su distribución con su característico desarrollo longitudinal.
Se subraya que la zona de estar, en la planta baja de la vivienda, está expuesta al flujo de aire en dirección norte-sur a lo largo de la misma planta de acceso. Además, se subraya que este flujo se proporciona a niveles escalonados, conectando la zona de estar con un dormitorio en la planta superior, a través del hueco de la escalera. En la zona de noche, en cambio, el pasillo permite un flujo longitudinal desde el dormitorio principal al otro dormitorio, mejorando la ventilación dentro del piso. Esto significa una importante contribución al confort termo higrométrico de las instalaciones exteriores, que permiten modular el flujo de aire que las atraviesa, ya sea abriendo la clásica hoja doble o abriendo las vasistas superiores, evitando la incomodidad que provoca un flujo a la altura de los ojos.
La ventilación es útil no sólo para evitar la formación de moho, sino también para impedir la propagación de olores desagradables desde las habitaciones en las que se originan a las contiguas. El flujo de aire de la cocina procede del balcón de entrada, ya filtrado por la rejilla del *cobogó*, y entra en él a través del par de ventanas oscilobatientes, antes de ser dirigido, mediante un conducto de ventilación, al gran hueco que recorre toda la altura del edificio, hasta la terraza: de este modo, sin ningún apoyo mecánico, pero aprovechando el efecto chimenea de *torre-cavedium*, los humos y diversos productos de desecho son expulsados de la casa sin afectar a las demás estancias, junto con el aire caliente, que tiene una densidad menor y tiende a subir por convección.
En cuanto al análisis de rendimiento del estado de la cuestión, se realizó la calibración energética, establecida según la normativa vigente, definida en el Código Técnico de la Edificación de España, CTE, un análisis de todo el edificio realizado mediante el programa CE3X, desarrollado por la empresa Efinovatic: en una escala que va desde la clase A (la más eficiente) hasta la G, dio como resultado una clase D, con un consumo de 17 kg $CO2/m^2$.

De esta forma desde las condiciones térmicas de partida, se plantearon hipótesis de intervención que no cointraveniesen con la expresión estilístico-formal del proyecto original: considerando el buen estado de la envolvente, la propuesta de recualificación energética sólo implicaba la instalación de una caldera de condensación de última generación (asociada a la disposición de paneles fotovoltaicos en la cubierta, aprovechando la gran terraza, para aumentar la cantidad de energía renovable) para satisfacer las necesidades de climatización invernal y producción de agua caliente sanitaria, y la sustitución de los anacrónicos marcos metálicos de las ventanas de vidrio simple sin rotura de puente térmico por vidrios de triple acristalamiento de baja emisividad, sin alterar el diseño y la superficie de cada uno de los huecos. Se decidió no aportar ninguna solución para la climatización estival, muy coherente con el diseño bioclimático de Artal, centrado en la ventilación entre los dos frentes: para favorecerla, se propone crear un segundo marco de ventana fuera de la puerta de entrada, una persiana con aletas regulables que actuaría como filtro hacia la zona común, al tiempo que permitiría la circulación del aire cuando la puerta estuviera abierta; este recurso, acompañado de la posibilidad de maniobra independiente del lucernario de la puerta interior (hoy fijo), daría una opción adicional a la ventaja de la ventilación, al tiempo que protegería la intimidad en las habitaciones individuales.
La aplicación de las intervenciones que se acaban de proponer permitiría una clara mejora de la calificación energética, situando al edificio rehabilitado en la clase C, con una producción de 9,3 kg $CO2/m^2$, casi la mitad de lo calculado analizando las condiciones actuales.

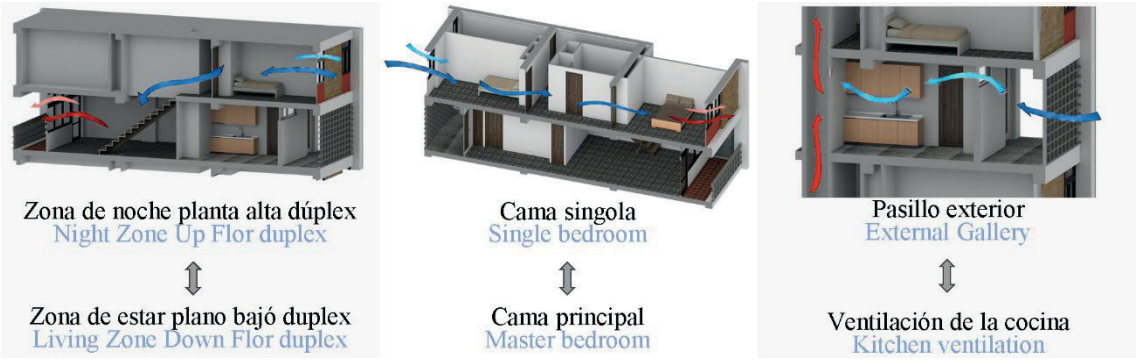


Imagen 2 Principales vías de ventilación identificadas. Image 2 Main ventilation paths identified.

ENERGY ANALYSIS: STUDY OF VENTILATION AND PROPOSAL FOR RENOVATION

The case study focused on a duplex dwelling as a sample unit, and an inspection was carried out to see how the original layout has remained unchanged over time, maintaining the original finishes, doors and windows from the design phase.
The thermal state of the building as a whole was investigated, studying in detail the ventilation flows, which played an important role in the design of the building: three main ventilation routes were identified, affecting the interior rooms of the flat analysed, with their distribution with their characteristic longitudinal development.
It is emphasised that the living area, on the ground floor of the dwelling, is exposed to the air flow in a north-south direction along the same access floor. Furthermore, it is underlined that this flow is provided at staggered levels, connecting the living area with a bedroom on the upper floor, through the stairwell. In the night area, on the other hand, the corridor allows a longitudinal flow from the master bedroom to the other bedroom, improving ventilation within the flat. This means an important contribution to the thermo-hygrometric comfort of the outdoor installations, which allow the air flow through them to be modulated, either by opening the classic double leaf or by opening the upper windows, avoiding the discomfort caused by a flow at eye level.

Ventilation is useful not only to prevent the formation of mould, but also to prevent the spread of unpleasant odours from the rooms in which they originate to adjacent rooms. The flow of air in the kitchen comes from the entrance gallery, already filtered by the cobogò grille, and enters it through

the pair of vasistas, before being directed, through a ventilation duct, into the large cavity that runs the full height of the building, up to the terrace: in this way, without any mechanical support, but by exploiting the chimney effect of the cavaedium tower, the fumes and various waste products are expelled from the house without affecting the other rooms, together with the hot air, which has a lower density and tends to rise by convection.
As for the performance analysis of the state of the art, the calificación energética was carried out, established according to the current regulations, the Código Técnico de la Edificación de España, an analysis of the entire building carried out using the CE3X programme, developed by the company Efinovatic: on a scale ranging from class A (the most efficient) to G, it resulted in a class D, with a consumption of 17 kg CO2/m2.
Given the initial thermal conditions, intervention hypotheses were considered that would not clash with the stylistic-formal expression of the original project: considering the good condition of the envelope, the proposed energy requalification only involved the installation of a latest generation condensing boiler (associated with the arrangement of photovoltaic panels on the roof, taking advantage of the large terrace, to increase the amount of renewable energy) to meet winter air-conditioning and domestic hot water production needs, and the replacement of the anachronistic metal frames of the single-glazed windows without thermal break with triple-glazed low-e glass, without altering the design and surface area of the individual openings. It was decided not to provide any solution for summer air conditioning, consistent with Artal's bioclimatic design, focusing on ventilation between the two fronts: To favour it, it is proposed to create a second window frame outside the entrance door, a blind with adjustable flaps that would act as a filter towards the common area, while allowing air circulation when the door is open; this resource, accompanied by the possibility of independent manoeuvring of the skylight of the interior door (today fixed), would give an additional option to the ventilation advantage, while protecting privacy in the individual rooms.
The implementation of the interventions just proposed would allow for a clear improvement in the energy rating, placing the upgraded building in class C, with a production of 9.3 kg CO2/m2, almost halving what was calculated by analysing the current conditions.

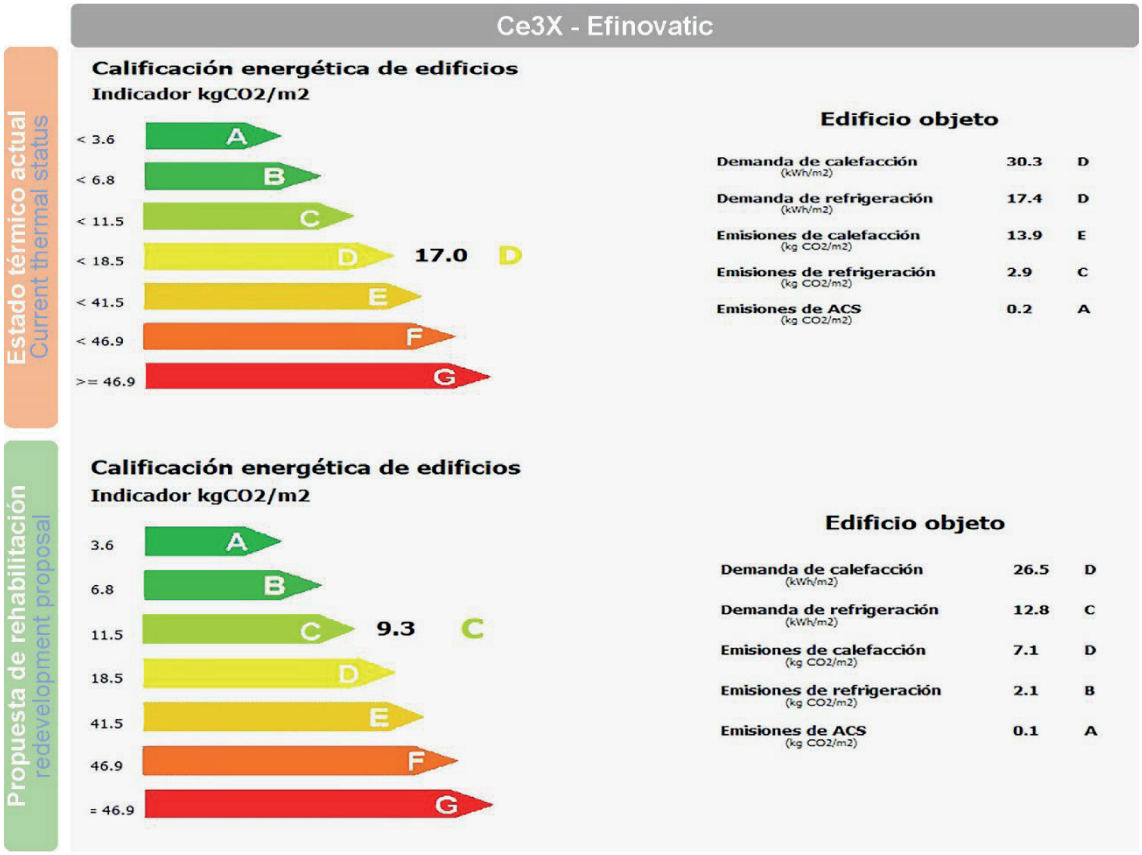


Imagen 2 Calificación energética realizada con el software CE3X, Efinovatic. Arriba, estado térmico actual . Abajo, propuesta de rehabilitación. Image 2 Main ventilation Energy classification carried out using CE3X software, Efinovatic. Top, current thermal status. Bottom, redevelopment proposal paths identified

Conclusiones

Los estudios de ventilación y las investigaciones de rendimiento demuestran cómo un edificio bien diseñado de los años sesenta puede ser hoy energéticamente eficiente con unas pocas medidas; los arquitectos del Movimiento Moderno supieron diseñar sabiamente utilizando estrategias como el *brise-soleil* y la celosía como el cobogó, elementos tomados de la arquitectura racionalista. Artal diseñó para el bienestar de los habitantes a través de recursos pasivos, proyectando ejemplos útiles y eficientes, según un enfoque que merece una atenta reflexión por su demostrada capacidad para implementar un diseño integrado, en el que el confort no es el resultado de sistemas vegetales añadidos a posteriori, sino el fruto maduro de una concepción en la que formas y funciones se apoyan mutuamente. Las intervenciones que hoy se proponen deben respetar este planteamiento: potenciando sin desvirtuar lo que los autores sabiamente han previsto y recurriendo, si es necesario, a soluciones con un impacto mínimo en el edificio existente.

Conclusions

Ventilation studies and performance research demonstrate how a well-designed building from the 1960s can be energy efficient today with a few measures; the architects of the Modern Movement knew how to design wisely using strategies such as the brise-soleil and the lattice such as the cobogó, elements borrowed from rationalist architecture. Artal designed for the well-being of the inhabitants through passive resources, projecting useful and efficient examples, according to an approach that deserves careful reflection due to its demonstrated ability to implement an integrated design, in which comfort is not the result of plant systems added a posteriori, but the ripe fruit of a conception in which forms and functions support each other. The interventions proposed today must respect this approach: enhancing without distorting what the authors have wisely foreseen and resorting, if necessary, to solutions with a minimum impact on the existing building.

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- Tomasello F. Il governo dell'igiene pubblica. Epidemia, questione sociale e forme dell'abitare nella città della Rivoluzione Industriale. Scienza & Politica. Per Una Storia Delle Dottrine. 2021, 33(65), 21–44.
- Barona J L. Génesis y dimensiones del higienismo. Lars, cultura y ciudad, 2009, (15), 9-14.
- Bernabeu Mestre J. La higiene de la habitación. Arquitectura y Salud Pública en la España de la Restauración. Lars, cultura y ciudad. 2009, (15), 15-20.
- Salvador Lujan N, Lizondo Sevilla, L.; Bosch Reig, I. El bloque residencial de la colonia obrera Lucas Urquijo. En Blanco. 2014, (14), 6-11.
- De Marco P. Il tema del colore bianco nel progetto dei pueblos de nueva fundación. INFOLIO. Architettura costruita e spazio abitato nelle città di nuova fondazione in Italia e Spagna. 2020, (35), 71-79.
- Bernardo G. Critical and typological analysis of the habitat in Spain after developmentalism. VITRUVIO - International Journal of Architectural Technology and Sustainability, 2022, 7(1), pp. 18-29.
- Mestre J, Tristan I. Extramuros. Geometría y Mestizaje. Valencia, Ed. Contras¬tes Culturales, 2009.
- Torres Cueco J. Imágenes de lo moderno. In: Historia de la ciudad. Recorrido histórico por la arquitectura y el urbanismo de la ciudad de Valencia. Valencia, ICARO, Colegio Territorial de Arquitectos de Valencia, vol. 1, 2000, 220-236.
- Torres Cueco J. In: Los años 50: La arquitectura española y su compromiso con la historia. Valencia: la arquitectura en los años cincuenta. Una revista y cuatro proyectos. Congreso Internacional, Pamplona. Escuela Técnica Superior de Arquitectura Universidad de Navarra, 2000, 303-309.

- Peñin, A. (1978). Valencia 1874-1959, Ciudad, Arquitectura y Arquitectos, Valencia, Es¬cuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Valencia.
- Testoni C. 6 architetture per spiegare cos'è il cobogò brasiliano. https://www.domusweb.it (accessed: July 2023)
- Artal Rios S. 138 viviendas de renta limitada. Conarquitectura. 2001, (2), 89-95.
- Torcellini P, Deru M, Griffith B, Benne K. DOE commercial building benchmark models. In: Proceedings of the ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings. Washington; 2008.
- IEE, Intelligent Energy Europe Programme. Typology Approach for Building Stock Energy Assessment. http://www.building-typology.eu (accessed: July 2023).
- Araujo R. El edificio como intercambiador de energia. Tectonica. 2009; 28; 4-27 pp.
- Le Corbusier. Epure du soleil. Buenos Aires, Argentina: Ediciones Infinito; 2000.
- Artal Ríos S. Grupo de viviendas en Valencia. Arquitectura. 1961; 34; 15-17 pp.
- Neila González FJ. Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible. Madrid, Spagna: Munilla-Lería; 2004.
- Weather Spark. Condizioni climatiche a Valencia. https://it.weatherspark.com/y/42614/Condizioni-meteorologiche-medie-a-Valencia-Spagna-tutto-l'anno#Figures-WindSpeed (accessed: July 2023).
- Araujo R. La arquitectura y el aire: ventilación natural. Tectonica. 2011; 35: 4-19 pp.
- Direttiva 93/76/CEE del Consiglio, del 13 settembre 1993. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/ALL/?uri=CELEX:31993L0076 (accessed: July 2023).
- Gobierno de España, Boletín Oficial del Estado. Real Decreto 235/2013. B.O.E. núm. 89, de 13 de abril de 2013. https://www.boe.es/eli/es/rd/2013/04/05/235/con (accessed: July 2023).
- IDAE. Calificación energética de edificios. https://www.idae.es/tecnologias/eficiencia-energetica/edificacion/calificacion-energetica-de-edificios (accessed: July 2023).
- Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana. LEGGE 3 agosto 2013, n. 90. https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2013/08/03/13G00133/sg (accessed: July 2023).

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

