

# XXX SALÓN TECNOLÓGICO DE LA CONSTRUCCIÓN EXCO 2016

## SALÓN INTERNACIONAL CEVISAMA 2016


### MEJORA DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN UTILIZANDO NUEVOS MATERIALES

### SEISMIC BEHAVIOUR IMPROVEMENT OF CONCRETE STRUCTURES USING NEW MATERIALS

**Javier Peireó Barceló**  
 ICITECH / Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil / UPV


**José Luis Bonet Senach**  
 ICITECH / Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil / UPV

**PROBLEMA DE LA SOCIEDAD / SOCIETY PROBLEM**  
 Vulnerabilidad de las estructuras frente a terremotos / Vulnerability of structures against earthquakes




**SOLUCIÓN:**  
 Crear uniones soporte-cimentación dúctiles, que mejoren la capacidad resistente de los elementos y que recuperen su forma original utilizando nuevos materiales.  
 SOLUTION:  
 Create ductile column-foundation joints, which improve the load capacity of the elements and recover their initial shape using new materials.

**FASE A: UNIÓN PREFABRICADA SOPORTE-CIMENTACIÓN / PHASE A: PRECAST COLUMN-FOUNDATION JOINT**  
 Introducción de nuevos materiales (VHPC y SMA) / Introduction of new materials (VHPC and SMA)

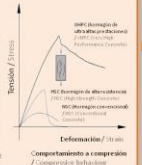


**NUEVO MATERIAL 1 / NEW MATERIAL 1:**  
 VHPC = Heterogeneidad de Muy Altas Resistencias / VHPC = Very High Performance Concrete

- Alto contenido en cemento y en fibras metálicas / High amount of cement and metallic fibers
- Hace una gran ductilidad y muy alta resistencia tanto en compresión como en tracción / High ductility and very high strength in compression and tension
- Resistencia a compresión simple de 130 MPa / Compression strength of 130 MPa
- Fisuración distribuida / Distributed cracking



Prueba a compresión para las fibras metálicas / Tensile test for metallic fibers




Comportamiento a compresión / Compression behaviour

**COMBINAR AMBOS MATERIALES / COMBINING BOTH MATERIALS**

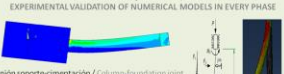
- Bajo estado de ductilidad del SMA → se necesita un plasticación previa que la ductilidad del VHPC le permite llegar a esas deformaciones / Low ductility modulus of SMA → an yielding is needed thanks to VHPC ductility
- Impermeabilidad del SMA = Bajo deterioro del VHPC a deformaciones altas = Estructura Resiliente tras el sismo / Impermeability of SMA = low degradation of VHPC. Lower high stress are reached = Resilient structure after earthquake

**SOLUCIÓN:**  
 Crear uniones soporte-cimentación dúctiles, que mejoren la capacidad resistente de los elementos y que recuperen su forma original utilizando nuevos materiales.  
 SOLUTION:  
 Create ductile column-foundation joints, which improve the load capacity of the elements and recover their initial shape using new materials.

**FASE B: UNIÓN VIGA-SOPORTE / PHASE B: BEAM-COLUMN JOINT**  
 Caracterización del VHPC a cortante y su comportamiento plástico / Shear and plastic behaviour of VHPC




**CREACIÓN, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE MODELOS NUMÉRICOS EN CADA FASE / CREATION, CALIBRATION AND EXPERIMENTAL VALIDATION OF NUMERICAL MODELS IN EVERY PHASE**



Unión soporte-cimentación / Column-foundation joint

Análisis inverso de probetas de flexo-tracción / Inverse analysis of flexural samples





Análisis unidimensionales de todo tipo / One-dimensional analysis of all sorts

Pandeo de barras aisladas e insertas en una sección de hormigón armado / Reinforcements buckling inserted into a concrete section

**NUEVO MATERIAL 2 / NEW MATERIAL 2:**  
 SMA o aleaciones con memoria de forma / SMA = Shape Memory Alloys


- Crean una gran ductilidad tanto en tracción como en compresión / High ductility in tension and compression
- Poseen superelasticidad en determinadas condiciones. Tras un evento sísmico ayudan a recuperar la forma original de la estructura / They have superelasticity in certain conditions. They would help to recover the initial shape of structures after an earthquake/after an earthquake
- Módulo de elasticidad bajo (60000 MPa) / Low elasticity modulus (60000 MPa)


Memoria de forma / Shape memory

Superelasticidad / Superelasticity

**FASE C: UNIÓN VIGA-SOPORTE / PHASE C: BEAM-COLUMN JOINT**  
 Caracterización de propiedades termo-elásticas del SMA / PHASE C: Characterization of general and thermoelastic properties of SMA




**FASE C: SOPORTES / PHASE C: COLUMNS**  
 Estudio del pandeo de los armados con 3 tipos de hormigones (incluido el VHPC) y armados de acero SMA / Study of column buckling behaviour with 3 types of concrete including VHPC and steel with SMA reinforcement



Herramienta antes de un ensayo / Instrument before testing

Armadura pandeada tras el ensayo / Buckled reinforcement after testing

**FASE D.1: Caracterización de propiedades termo-elásticas del SMA / PHASE D.1: Characterization of general and thermoelastic properties of SMA**




Caracterización térmica a tracción / Thermal characterization in tension

Caracterización térmica a compresión / Thermal characterization in compression

Caracterización térmica mediante calorimetría / Thermal characterization using calorimetry


**ANTECEDENTE / PRECEDENT:**  
 El ICITECH ya investigó uniones soporte-cimentación en el pasado. Se estudió su comportamiento (capacidad resistente y ductilidad) bajo las siguientes variables: ICITECH investigated column-foundation joint previously. Their behaviour (load capacity and ductility) was studied under the following variables:

- Análisis de la probeta / Sample description
- Tipo de unión / Type of connection
- Inyección de fibras de acero / Addition of steel fibers




**ANTECEDENTE / PRECEDENT:**  
 La unión viga-pilar ya se estudió en los laboratorios de la UPV. En aquel entonces se estudió el comportamiento de uniones viga-sopORTE bajo las siguientes variables: Before, column joints were studied at UPV. Laboratories under the following variables:

- Análisis de la probeta / Sample description
- Resistencia del hormigón (30-80 MPa) / Concrete strength (30-80 MPa)
- Adición de fibra de acero / Addition of steel fibers



Para utilizar los nuevos materiales en los experimentos desde la FASE A hasta la FASE C, se debe caracterizar estos con numerosos estudios previos. New materials must be characterized with high amount of preliminary studies in order to use them from PHASE A to PHASE C.

**FASE D.2: Caracterización de propiedades mecánicas y de puesta en obra del VHPC / PHASE D.2: Cast in place and mechanical characterization of VHPC**



Armadura con éxito control / Buck control of casting

Experimento de los hormigones / Concrete flexibility

Ensayo de compresión simple / Compression tests

Ensayo de flexotracción / Flexural tests

## **Pandeo de armaduras de acero en elementos de hormigón reforzado con fibras.**

### **Buckling of steel reinforcements in fiber reinforced concrete elements.**

#### **Javier Pereiro Barceló**

*Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil. Universitat Politècnica de València.*

*Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH). Investigador, Becario Formación Profesorado Universitario (FPU) del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Correo: japebar@cam.upv.es*

#### **José Luis Bonet Senach**

*Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil. Universitat Politècnica de València.*

*Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH). Profesor Titular de Universidad. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Correo: jlbonet@cst.upv.es*

#### **Abstract**

The research of buckling of passive reinforcements subject to compression requires numerical models and experimental campaigns that allow its understanding and quantifying. However, in scientific literature, there is a lack of experimental campaigns specifically focused on the study of reinforcements' buckling, inserted into a concrete section. Some aspects as the rigorous detection when buckling is produced and the measure of cover spalling are not measured. In contrast, these aspects are hugely important to study this phenomenon. In addition, the lack of experimentation centered on reinforcements buckling also appears in cases where reinforcements are placed into fiber reinforced concrete (FRC) sections. For all of these reasons, there is insufficient data at one's disposal to be able to evaluate numerical models or to draw conclusions about reinforcements buckling.

In this communication it will be presented the experimental model and the obtained results after carrying out a first experimental phase, where buckling of compressed passive reinforcements in FRC is studied. Analyzed variables are the following: stirrup's separation, strength and inclusion of steel fibers in concrete.

#### **Keywords**

Buckling of compressed reinforcements, fiber reinforced concrete.

## **Introducción**

En elementos de hormigón armado que estén sometidos a solicitaciones de flexión y axil, se puede producir el pandeo de las armaduras pasivas comprimidas. Esto puede ser debido a una insuficiente cantidad o incorrecta disposición del armado transversal o a la degradación del recubrimiento del hormigón, entre otras causas. Las consecuencias que puede ocasionar el pandeo de las armaduras es una disminución drástica de la carga máxima, así como de la ductilidad esperada.

Para determinar cuándo se produce el pandeo de las armaduras comprimidas, existen modelos teóricos en la literatura científica: de elementos finitos, de análisis tipo fibra, de análisis basados en la minimización de la energía del sistema, de análisis plásticos de las barras y basados en la rigidez del sistema. Todos los anteriores tipos de modelos no tienen en cuenta el efecto del recubrimiento del hormigón de forma continua y el de la armadura transversal de forma discreta como ocurre en la realidad.

Entre aquellos que utilizan la minimización de la energía se encuentra Dhakal y Maekawa (2002c), el cual modeliza los estribos de forma discreta y no tienen en cuenta el recubrimiento de hormigón frente al pandeo; Dhakal (2006) indica cómo incorporar el efecto del recubrimiento de hormigón aunque de forma discreta; Campione (2011), el cual asume la rigidez de los estribos y del recubrimiento de forma continua; Talaat (2007), el cual asume la rigidez de los estribos de forma continua y no modeliza el efecto del recubrimiento. Por otra parte, Papia et al. (1988), utilizando un método basado en la rigidez del sistema, modeliza los estribos de forma discreta.

Aquellos que utilizan los elementos finitos son Dhakal and Maekawa (2002b); Gil-Martín et al. (2006); Mau and El-Mabsout (1989) y aquellos que utilizan los modelos tipo fibra son Massone Moroder (2009); Urmson and Mander (2012), aunque sólo tienen en cuenta el pandeo de las barras como elementos aislados, sin interacción con los estribos o pandeando entre dos estribos infinitamente rígidos. Son computacionalmente exigentes, por lo que no son válidos para el diseño.

Pese a la existencia de modelos que predicen el pandeo de las armaduras, no existen campañas experimentales con las que se halle de forma exhaustiva la deformación y tensión crítica de pandeo, sino que simplemente se existen datos basados en observaciones.

## **Objetivos e importancia de la investigación**

En esta comunicación se presentan los resultados de una campaña experimental llevada a cabo con el objetivo de hallar de forma exhaustiva la deformación de pandeo de las armaduras pasivas comprimidas en elementos de hormigón reforzado con fibras. Esto permitirá saber los giros máximos que se pueden producir en rótulas plásticas previamente al pandeo de las armaduras.

## **PANDEO DE ARMADURAS DE ACERO EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS**

### **Introduction**

Buckling of the compressed passive reinforcements can happen in reinforced concrete elements subjected to bending and axial stresses. This may occur because either insufficient or incorrect arrangement of transverse reinforcement, or concrete cover degradation, among other causes. The consequences of buckling of the reinforcement are a drastic decrease of the maximum load and the expected ductility.

Theoretical models exist in the literature to determine when the buckling of the compressed reinforcements occurs: finite element analysis fibre type, based on the minimization of system energy, plastic bars analysis and analytical analysis equilibrium of the deformed bar. All above types of models do not take into account the effect of the concrete cover continuously and the transverse reinforcement discretely as it happens in reality.

Among those who use the energy minimization are Dhakal and Maekawa (2002c), who model stirrups discretely and do not consider concrete cover effect against buckling; Dhakal (2006) shows how to incorporate the effect of concrete cover in a discrete way; Campione (2011), who assumes the stiffness of the stirrups and the cover continuously; Talaat (2007), who assumes the stiffness of the stirrups continuously and does not model the effect of the cover. Moreover, Papia et al. (1988) use a model based on stiffness of the system and model stirrups discretely.

Full finite elements are used by Dhakal and Maekawa (2002b); Gil-Martin et al. (2006); Mau and El-Mabsout (1989) and fibre models are used by Massone Moroder (2009); Urmson and Mander (2012). They all only consider the bars as isolated elements, without interaction with the stirrups or buckling between two infinitely stiff ones. They are computationally demanding, so it is not valid for design.

Despite the existence of models that predict the buckling of the reinforcements, there are not accurate experimental campaigns focused exhaustively on study of buckling to get critical stresses and strains, they are only based on observation data.

### **Objectives and importance of research**

The results of an experimental campaign carried out with the aim of finding accurately buckling strains and stresses of the passive reinforcements inside a fibre reinforced concrete section are presented. This will let know the maximum rotation that can be reached in plastic hinges prior to buckling of reinforcements.

## Campaña experimental

Se ha llevado a cabo una campaña experimental de soportes de sección rectangular sometidos a carga monotónica excéntrica. Los soportes ensayados son de de 1.35 m de altura y una sección de 20\*20 cm (Figura 1). La resistencia de los hormigones utilizados se muestra en la tabla 1. Se han utilizado diversos volúmenes de fibras metálicas: 0, 40, 80 kg/m<sup>3</sup>. La esbeltez de éstas es de 80, longitud 30 mm y módulo de elasticidad  $E_f = 200000$  MPa. Las armaduras longitudinales dispuestas son de calidad B 500 SR, diámetro 12 mm para las de la cara comprimida y de 16 mm para la cara traccionada. Esto asegura que ambas armaduras estén plastificadas, acorde con los criterios de diseño actuales, cuando se produce el pandeo para la excentricidad de carga adoptada ( $e=b/2$ ). Los estribos varían su separación en función del elementos (5, 10, ó 30 cm).

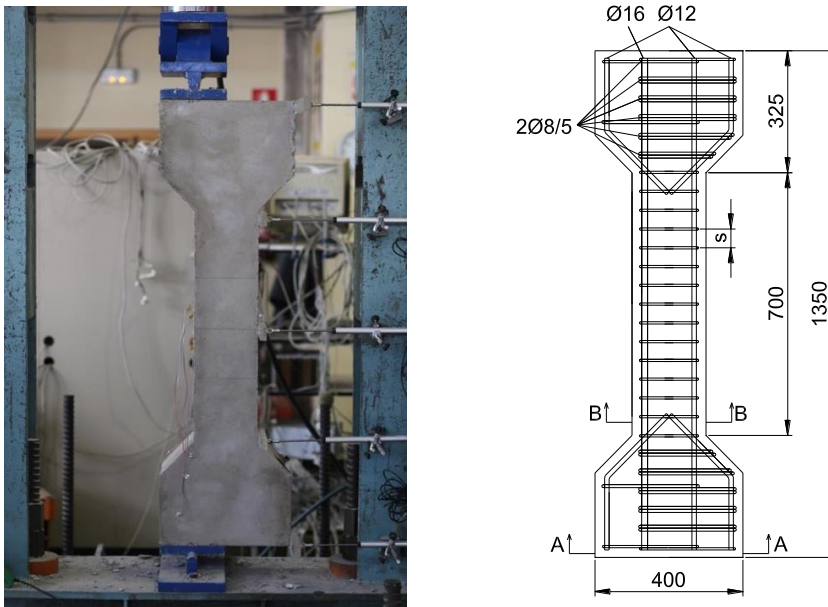


Figura 1: Izquierda: Morfología exterior de los ensayos; derecha: Dimensiones y armado de los especímenes.

Figure 1: Left: External morphology of tests; right: Dimension and reinforcing setup of specimens.

La instrumentación empleada para poder captar la deformación de pandeo fueron galgas de acero situadas a lo largo de las armaduras longitudinales de tal forma que cuando se registrase una caída acusada de la deformación, estando la carga aplicada aumentando, significaría que la barra está empezando a pandear. Para ello, la galga se coloca de tal forma que quede en la cara convexa una vez se produzca el pandeo (Figura 3).

También se ha empleado galgas de hormigón para medir la deformación en la fibra más comprimida, así como galgas de acero en las armaduras longitudinales traccionadas (Figure 4). Con esta instrumentación se tiene definido el plano de deformaciones hasta la rotura del recubrimiento o el pandeo de las armaduras comprimidas.

### Experimental campaign

An experimental campaign of rectangular supports under eccentric monotonic loading has been performed. Tested supports were 1.35 m long and had a section of 20 \* 20 cm (Figure 1). The concrete strength is shown in table 1 for each element. Several amounts of metal fibers were used: 0, 40, 80 kg/m<sup>3</sup>. Slenderness of fibers is of 80, 30 mm long and elastic modulus  $E_f = 200\ 000$  MPa. The longitudinal reinforcements are made of B 500 SR steel, 12 mm diameter for the compressed bars and 16 mm for the tensioned ones. This fact, and a load eccentricity of 10 cm (half of the side), ensures that both reinforcements are yielded when buckling occurs, according to current design criterion. Stirrups vary its separation depending on the specimens (5, 10, or 30 cm).



Figura 2: Izquierda: Vista frontal de un espécimen ensayado; derecha: Estado de la cara comprimida tras el ensayo.

Figure 2: Left: Frontal side of a tested specimen; right: State of compressed side after testing.

Instrumentation used for capturing the buckling strain was steel gauges positioned along longitudinal reinforcements. When a sharp drop in strain was registered, while applied load is increasing, it would mean that the bar is beginning to buckle. Consequently, the gauge is placed in the convex face (Figure 3).

It has also been utilised concrete gauges for measuring the deformation in the compressed side and steel gauges in tensioned longitudinal reinforcements (Figure 4). This instrumentation defines the strain plane up to either concrete cover failure or the buckling of the compressed reinforcements.

Tras la rotura del recubrimiento, el daño se localiza en una zona concreta, formándose una rótula plástica (Figura 2). Si el hormigón posee fibras, comenzará la degradación de la rigidez del recubrimiento en ese instante; si no posee, el recubrimiento deja de actuar inmediatamente cuando rompe.

Para obtener el plano de deformaciones tras la rotura del recubrimiento se utilizó la fotogrametría, la cual permitió conocer la posición de la fibra neutra. Todo ello hizo posible conocer la deformación de pandeo de la barra en el centro de ésta, ya que las galgas que estaban dispuestas de forma que se pudiera captar el pandeo y no la deformación media en su directriz.

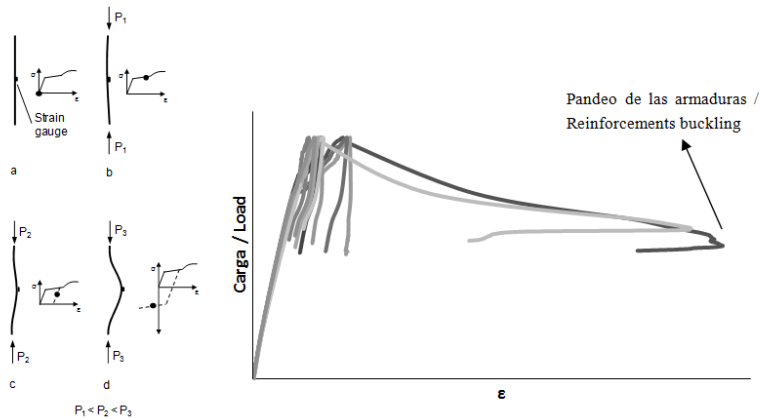


Figura 3: Izquierda: Evolución del pandeo local de la armadura y deformaciones registradas por la galga; derecha: Gráfica típica de un ensayo que muestra la carga a la que está sometida el elemento con respecto a la deformación de las armaduras de compresión.

Figure 3: Left: Evolution of reinforcement buckling and strains registered by strain gauge; right: Typical graphic of a test which shows load of the element versus compressive strain of reinforcements.

## Resultados obtenidos

Una vez ensayados los nueve especímenes, los principales resultados se recogen en la tabla 1. Se puede observar como existe la tendencia directa que a más contenido de fibras, mayor deformación crítica de pandeo de las armaduras. Además, sólo se observa un efecto positivo de la armadura transversal cuando la separación entre estribos es de 5 cm (Tabla 1).

Probeta	s (cm)	f <sub>c</sub> (MPa)	f <sub>r,max</sub> (MPa)	ε <sub>crit</sub>	σ <sub>crit</sub> (MPa)
H30f00s30	30	25.92	-	3.15	548.3
H30f00s10	10	23.34	-	3.38	548.6
H30f00s05	5	28	-	10.33	557.6
H30f40s30	30	24.05	2.98	9.15	556.0
H30f40s10	10	23.32	2.9	8.05	554.6
H30f40s05	5	25.26	3.1	14.65	563.2
H30f80s30	30	30.85	5.83	11.18	558.7
H30f80s10	10	23.5	5.7	10.84	558.2
H30f80s05	5	20.89	6	14.30	562.7

Tabla 1: Principales resultados de la campaña experimental.

Table 1: Main results of experimental campaign.

## PANDEO DE ARMADURAS DE ACERO EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS

After the failure of concrete cover, the damage is located in a particular area, forming a plastic hinge (Figure 2). When buckling occurs, if concrete has fibres, degradation of concrete cover begins; if it has not, cover stops acting immediately.

Photogrammetry is used for getting the strain plane after rupture of the cover. This lets know the position of the neutral fibre. All this make it possible to know the buckling strain of the bar in the centre of it, since gauges were arranged to capture buckling and not to measure the average strain in the directrix.

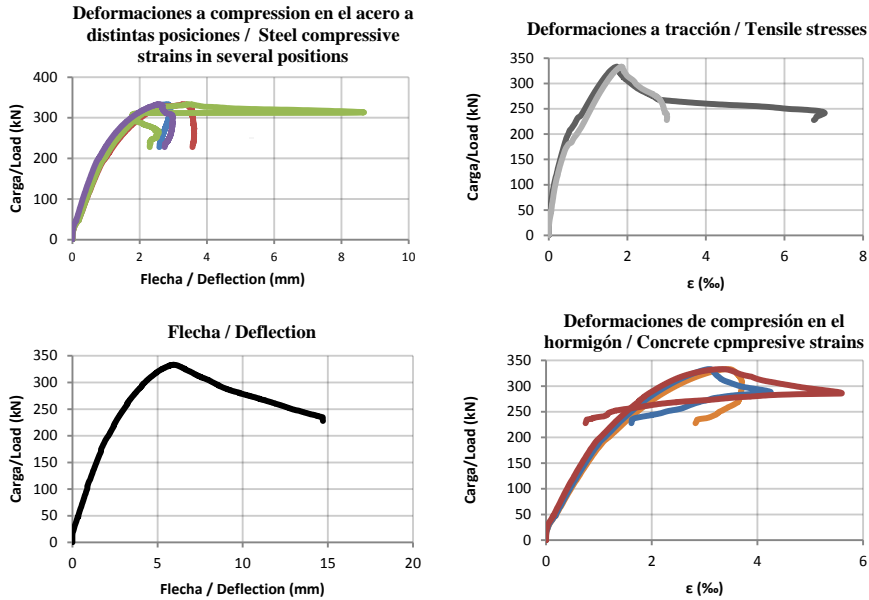


Figura 4: Muestra de los datos recogidos de cada ensayo (ejemplar H30f40s10).  
Figure 4: Sample of collected data of each test (specimen H30f40s10).

## Results

Once the nine specimens were tested, the main results are shown in Table 1. It can be seen that the higher amount of fibres, the more critical buckling strain of reinforcements. Furthermore, it is only observed a positive effect of the transverse reinforcement when the spacing between stirrups is 5 cm (Table 1).

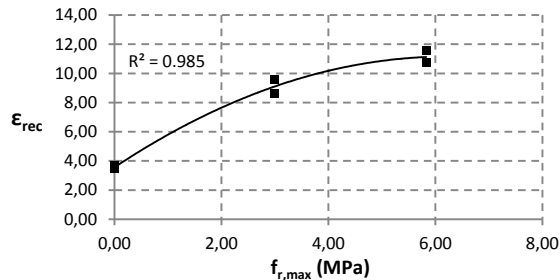


Figura 5: Efecto del contenido de fibras en el retraso del pandeo de las armaduras.  
Figure 5: Fiber content effect on reinforcements buckling delay.



En la Figura 5 se puede apreciar que, en aquellos especímenes en los que la separación de estribos no influye ( $s > 5\text{cm}$ ), cuanto más resistencia máxima a flexotracción ( $f_{r,\text{max}}$ ) posee el recubrimiento, la deformación crítica de pandeo aumenta.

### **Conclusiones**

Los resultados obtenidos de la campaña experimental llevada a cabo ofrecen diversas conclusiones que a continuación se enuncian:

- El aumento de las fibras metálicas en la matriz de hormigón eleva en gran medida la deformación a la que se produce el pandeo de las armaduras pasivas comprimidas.
- El efecto de la separación de estribos sólo se muestra efectivo en el caso de las separaciones de 5 cm, en el resto de casos esta variable se muestra irrelevante, siendo la cantidad de fibras metálicas en la matriz de hormigón la predominante.
- En el caso de hormigón sin fibras, cuando salta el recubrimiento de hormigón se produce de forma instantánea el pandeo de la armadura excepto en el caso de separación de estribos de 5 cm, donde la influencia de la armadura transversal retrasa este efecto.

### **BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY**

- R. P. Dhakal y K. Maekawa, «Reinforcement stability and fracture of cover concrete in reinforced concrete members», J. Struct. Eng., vol. 128, n.o 10, pp. 1253–1262, 2002.
- R. P. Dhakal, «Post-peak response analysis of SFRC columns including spalling and buckling», Struct. Eng. Mech., vol. 22, n.o 3, pp. 311-330, feb. 2006.
- G. Campione, «Compressive behavior of short fibrous reinforced concrete members with square cross-section», Struct. Eng. Mech., vol. 37, n.o 6, pp. 649-669, mar. 2011.
- M. M. Talaat, Computational modeling of progressive collapse in reinforced concrete frame structures. ProQuest, 2007.
- M. Papia, G. Russo, y G. Zingone, «Instability of longitudinal bars in RC columns», J. Struct. Eng., vol. 114, n.o 2, pp. 445–461, 1988.
- R. P. Dhakal y K. Maekawa, «Modeling for postyield buckling of reinforcement», J. Struct. Eng.-Asce, vol. 128, n.o 9, pp. 1139-1147, sep. 2002.

## PANDEO DE ARMADURAS DE ACERO EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS

In Figure 5 it can be seen that in those specimens in which stirrups spacing has not influence ( $s > 5\text{cm}$ ), the higher flexural strength ( $f_{r,\text{max}}$ ) has the concrete cover, the higher is critical buckling strain.

### Conclusions

The results of the experimental campaign conducted provide several conclusions set out below:

- Buckling strain of compressed reinforcements is raised by increasing the amount of metallic fibers in the concrete matrix.
- The effect of stirrups spacing is effective only when separation is 5 cm, in other cases this variable is irrelevant due the fact that amount of metal fibers in the concrete matrix is the predominant one.
- For concrete without fibers, when concrete cover spalls, buckling occurs instantaneously except for stirrups separation of 5 cm, in which the influence of the transverse reinforcement delays it.

### BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- L. M. Gil-Martín, E. Hernández-Montes, M. Aschheim, y S. J. Pantazopoulou, «Slenderness effects on the simulated response of longitudinal reinforcement in monotonic compression», *Struct. Eng. Mech.*, vol. 23, n.o 4, pp. 369–386, 2006.
- S. T. Mau y M. El-Mabsout, «Inelastic buckling of reinforcing bars», *J. Eng. Mech.*, vol. 115, n.o 1, pp. 1–17, 1989.
- L. M. Massone y D. Moroder, «Buckling modeling of reinforcing bars with imperfections», *Eng. Struct.*, vol. 31, n.o 3, pp. 758-767, mar. 2009.
- [C. R. Urmson y J. B. Mander, «Local Buckling Analysis of Longitudinal Reinforcing Bars», *J. Struct. Eng.*, vol. 138, n.o 1, pp. 62-71, ene. 2012.