

## Comportamiento diferido en estado fisurado de elementos de UHPFRC a flexotracción

Aitor Llano-Torre <sup>(1)</sup>, Juan Á. López <sup>(2)</sup>, José R. Martí-Vargas <sup>(1)</sup> y Pedro Serna <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> ICITECH Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón, Universitat Politècnica de València, España.

<sup>(2)</sup> PhD. Structural Engineer, Research & Development Concretes SL.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.6144>

### RESUMEN

En este trabajo se analiza el comportamiento a largo plazo de elementos de Hormigón de Ultra Alta Resistencia Reforzados con Fibras (en inglés UHPFRC) mediante una campaña experimental con tres tipos de probetas: cilíndricas ( $\text{Ø}100 \times 200 \text{mm}$ ), prismáticas “R” ( $150 \times 150 \times 600 \text{mm}$ ) y prismáticas “S” ( $150 \times 40 \times 600 \text{mm}$ ). Se realizaron ensayos de retracción y de fluencia a flexión en estado fisurado, así como de caracterización tanto a resistencia a compresión como flexotracción. Las probetas cilíndricas se destinaron a retracción, fluencia en compresión y resistencia a compresión simple, en tanto que las prismáticas se destinaron a fluencia en flexión y resistencia a flexotracción. En las probetas R se realizó una entalla de 50 mm de profundidad y fueron prefisuradas hasta alcanzar un Crack Mouth Opening Displacement (CMOD) de 0,65mm. Las probetas S fueron prefisuradas sin entalla hasta alcanzar una pérdida de rigidez del 50%. Se montaron las probetas en los bastidores de fluencia en donde se mantuvo un nivel de carga del 50% de la resistencia residual obtenida del ensayo de prefisura para las probetas R y un nivel de carga entre el 68% y el 86% para las probetas S. Los ensayos de fluencia en flexión abarcaron 270 días, apreciándose una estabilizando más temprana para las probetas tipo S. De los resultados del ensayo de fluencia se calcularon los coeficientes y se compararon con los propuestos por distintos autores para el UHPFRC, dando como resultado que los valores de fluencia obtenidos de manera experimental son ligeramente menores que los propuestos quedando estos del lado de la seguridad.

**PALABRAS CLAVE:** UHPFRC, comportamiento diferido, fluencia, fibras.

### 1.- INTRODUCCIÓN

El Hormigón de Ultra Alta Resistencia Reforzados con Fibras (UHPFRC) es un avanzado tipo de hormigón caracterizado por una alta resistencia a compresión y una especial selección de finos, ultra-finos y fibras que conducen a la adquisición de propiedades muy ventajosas para la durabilidad, como una baja porosidad y permeabilidad y una gran protección para la corrosión de las armaduras. A pesar de que ya se han realizado

aplicaciones de UHPFRC con éxito en campo [1], sus propiedades hacen de él un material de especial interés para la industria del prefabricados dado que conseguir una alta resistencia a corto plazo requiere de una producción de alta calidad. La construcción de puentes/pasarelas prefabricados con hormigón pretensado constituye uno de los principales sectores que se pueden beneficiar del empleo del UHPFRC [2-5].

El pretensado de elementos de UHPFRC a corta edad, junto con la elevada retracción del material, requiere que el diseño estructural de dichos elementos deba tener en cuenta las deformaciones diferidas. La edad de puesta en carga, la duración del período bajo tensión y el proceso de curado constituyen los principales parámetros a considerar en el comportamiento a fluencia del UHPFRC. De acuerdo con AFGC [6], tras un curado térmico a 90°C, la fluencia no depende de la edad de puesta en carga. Ahora bien, no resulta fácil aplicar este tipo de curado a elementos de gran tamaño, por lo que en la mayoría de aplicaciones con UHPFRC se emplean procesos de curado estándar, de modo que sí tiene repercusión en la fluencia la edad de puesta en carga. En la Tabla 1 se muestran los coeficientes de fluencia propuestos por diferentes normativas y autores [6-9], en función del régimen de curado para una edad de puesta en carga de 28 días.

**Tabla 1.** Coeficientes de fluencia propuestos según autores con puesta en carga a 28 días

<i>Normativa</i>	<i>Tipo de Curado</i>	
	<i>Normal</i>	<i>Tratamiento de calor</i>
AFGC (2013)	1,08	0,3
BJSCE (2006)	1,2	0,4
Graybeal (2006)	0,78	-
Australia (2000)	1,2	0,3

Las elevadas prestaciones del UHPFRC permiten prescindir de la armadura transversal, cuya ausencia determina que resulte primordial conocer el comportamiento diferido en estado fisurado. Sin embargo, la literatura científica no recoge recomendaciones a tal respecto. Algunos estudios realizados en probetas tipo “hueso” [10] confirman que el UHPFRC tiene una elevada fluencia a tracción a edades tempranas, en tanto que el desarrollo de estudios experimentales sobre fluencia en los que se comparan los diferentes modos de carga [11] concluyen que resulta necesario profundizar en la comprensión del fenómeno de fluencia.

En consecuencia, en este trabajo se analiza la fluencia en compresión y en flexión mediante probetas de UHPFRC sometidas a un curado térmico estándar; los resultados obtenidos se analizan y contextualizan en el ámbito de diferentes normativas.

## **2.- PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Se ha planteado una campaña experimental que recoge los aspectos involucrados en el comportamiento diferido de elementos de UHPFRC. Además de los ensayos de

caracterización, se realizaron los siguientes ensayos a largo plazo: retracción, fluencia en compresión y fluencia en flexión en estado fisurado. A tal fin, se diseñó una matriz de UHPFRC a partir de la cual se elaboraron distintos tipos de probetas en geometría y dimensiones para evaluar el comportamiento diferido tanto a compresión como a flexión en elementos de UHPFRC de sección normal y elementos esbeltos con una sección reducida.

### 2.1.- Matriz de hormigón

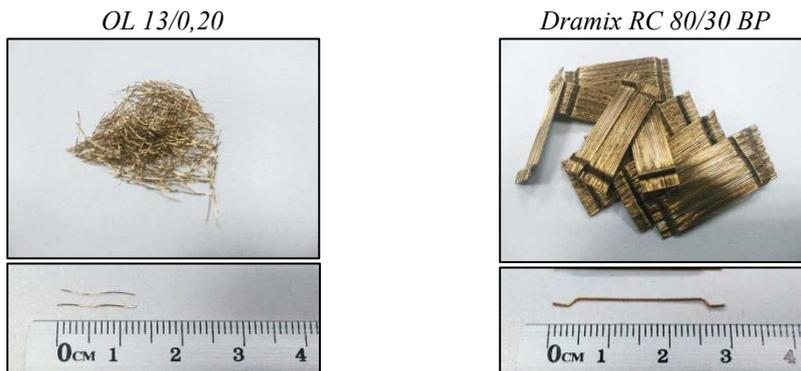
Para la matriz se empleó un cemento CEM I 42.5-SR 5 [12], una relación agua/cemento de 0,22, y dos tamaños de arena silíceo como áridos. La Tabla 2 muestra la proporción de cada componente referida al contenido en cemento.

**Tabla 2.** Composición de la matriz referida al contenido de cemento

<i>Componente</i>	<i>Relación</i>
CEM I 42.5-SR 5	1,00
Agua	0,22
Arena fina (0.13-0.80 mm)	0,34
Arena media (0.6-1.2 mm)	0,64
Humo de Sílice	0,25
Superplastificante	0,03

### 2.2.- Fibras

Como es habitual en este tipo de hormigones, se usó un refuerzo mixto con dos tipos de fibras de acero. Las fibras más cortas (OL 13/0,20) controlan la microfisuración, en tanto que las fibras largas (Dramix RC 80/30 BP) se encargan de controlar la propagación de la macrofisura. La Figura 1 recoge la forma y el aspecto de ambas fibras empleadas. La dosificación total de fibras es de  $160 \text{ kg/m}^3$ , repartidos a partes iguales entre ambos tipos de fibras:  $80 \text{ kg/m}^3$  de OL 13/0,20 y  $80 \text{ kg/m}^3$  de Dramix RC 80/30 BP.

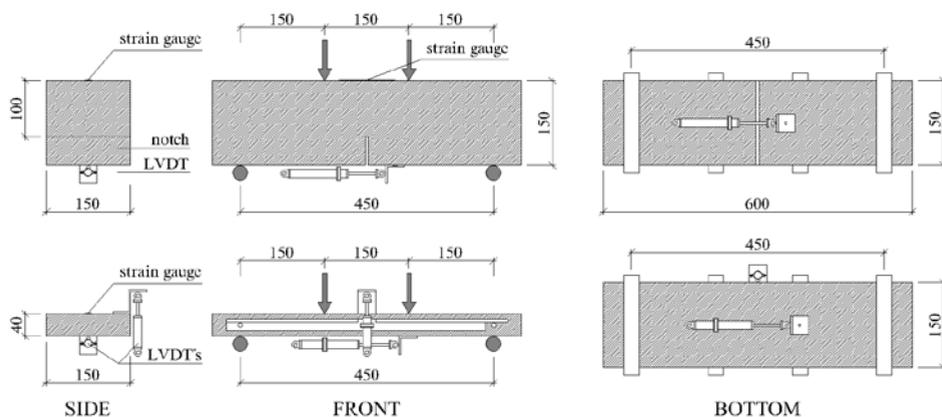


**Figura 1.** Forma y aspecto de ambas fibras utilizadas en el UHPFRC

### 2.3.- Probetas de ensayo

Las probetas cilíndricas se destinaron a ensayos de retracción libre y ensayos de caracterización a resistencia a compresión simple.

Las probetas prismáticas se destinaron a ensayos de fluencia en flexión y resistencia a flexotracción. Se contemplaron dos geometrías diferentes de probeta: probetas prismáticas: las probetas “Regular” o “R” de 150x150x600mm (tal y como están definidas en [13]) y probetas “Slim” o “S” de 150x40x600mm (para verificar el comportamiento en fluencia en elementos esbeltos de UHPFRC). Se emplearon 3 probetas de cada tamaño para los ensayos de caracterización, y también 3 de cada tamaño para el estudio de fluencia en flexión. En todos los casos se dispuso una banda extensométrica centrada en la cara superior de cada probeta, así como un dispositivo LVDT en la cara inferior. La Figura 2 muestra las dimensiones y posición de los dispositivos de instrumentación en las probetas prismáticas para ensayo de fluencia.



**Figura 2.** Geometría, dimensiones e instrumentación de las probetas destinadas a ensayos de fluencia a flexotracción

Dado que el UHPFRC tiene un alto contenido en fibras, la propagación de las fisuras resulta diferente respecto del caso de hormigón de fibras convencional (FRC), ya que en lugar de una única fisura localizada, los elementos de UHPFRC desarrollan de forma distribuida múltiples microfisuras en la zona solicitada. En consecuencia, la abertura de fisura registrada durante los ensayos se interpreta como la suma total de las aberturas de todas las microfisuras. En este trabajo, el Crack Mouth Opening Displacement se ha obtenido de acuerdo con EN14651 [13] (si bien las probetas S no responden al tamaño estándar, también en ellas se determinó CMOD como un parámetro de referencia).

En las probetas R se conformó mediante corte por serrado una entalla de 50 mm de profundidad (en lugar de 25 mm que es el valor que indica la norma) con la finalidad de debilitar aún más la sección de centro-luz con el fin de evitar la aparición de microfisuras fuera de la zona instrumentada.

## 2.4.- Variables de ensayo

Las principales variables consideradas para los ensayos de fluencia a flexotracción fueron: CMOD inicial (a modo de nivel de daño inicial) y nivel de tensión aplicada durante la duración del ensayo. La definición de estas variables dependió de la geometría de la probeta a ensayar. Para probetas R, el nivel de tensiones (o Índice de Fluencia,  $I_c$ ) adoptado fue del 50% de la resistencia residual alcanzada en el proceso de prefisuración hasta CMOD de 0,65 mm. Para probetas S, el nivel de prefisuración se estableció en correspondencia con una pérdida de rigidez seccional del 50%, si bien en la práctica resultó un rango de nivel de prefisuración de 0,14 a 0,22 mm y un rango de  $I_c$  desde 68% hasta 86%.

## 3.- METODOLOGÍA

El ensayo de fluencia en flexión en estado fisurado comprende las siguientes fases: prefisuración (curva negra), fluencia (curva roja) y rotura (curva gris). La Figura 3 muestra una idealización de la curva “tensión – abertura de fisura” a lo largo de las 3 fases del ensayo de una probeta. En la fase de prefisuración se fisura la probeta hasta la abertura de fisura o nivel de daño deseado. Durante la fase de fluencia, las probetas son sometidas a carga sostenida durante un determinado tiempo, en el que se desarrollan deformaciones diferidas. La fase de rotura es opcional, y permite evaluar la resistencia residual de las probetas tras el ensayo de fluencia.

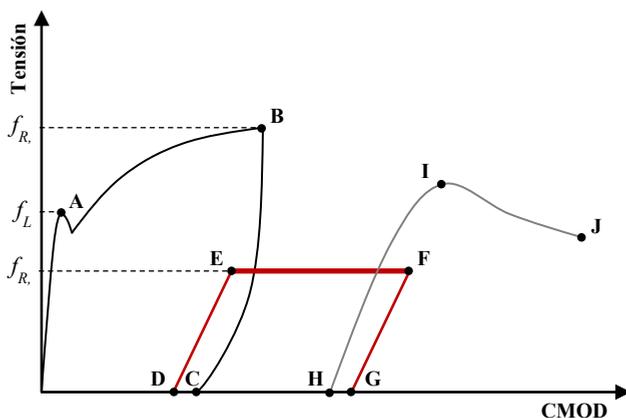


Figura 3. Esquema Tensión-CMOD durante las distintas fases de ensayo

Los parámetros de ensayo más significativos a considerar en el análisis del comportamiento en fluencia por flexión se obtienen a partir de la abertura de fisura (CMOD) o de las deformaciones en compresión ( $\epsilon$ ) y son los siguientes:

$$\varphi^j = \text{CMOD}_j / \text{CMOD}_i \quad (1)$$

$$\text{COR}^{j-k} = (\text{CMOD}_k - \text{CMOD}_j) / (k - j) \quad (2)$$

donde  $\varphi^j$  es el coeficiente de fluencia a edad  $j$  y  $COR^{j-k}$  es el ratio de abertura de fisura (*Crack Opening Rate*) o velocidad de abertura diferida de fisura desarrollada entre las edades  $j$  y  $k$ . De manera análoga, con la deformación por compresión diferidas podemos obtener los siguientes parámetros:

$$\varphi_c^j = \varepsilon_j / \varepsilon_i \quad (3)$$

$$CR^{j-k} = (\varepsilon_k - \varepsilon_j) / (k - j) \quad (4)$$

donde  $\varphi_c^j$  es el coeficiente de fluencia a edad  $j$  obtenido a partir de las deformaciones y  $CR^{j-k}$  es el ratio de fluencia (*Creep Rate*) o velocidad de deformación diferida desarrollada en la fibra más comprimida entre las edades  $j$  y  $k$ .

La metodología adoptada es similar a la propuesta en [14]. El diseño y esquema del bastidor de fluencia puede observarse en la Figura 4a. Las probetas de UHPFRC se dispusieron en columna de tres niveles en del bastidor de fluencia. La configuración del esquema de carga a cuatro puntos aporta estabilidad al conjunto de probetas, como se puede observar en la Figura 4b. Las condiciones ambientales durante el ensayo estaban controladas asegurando una temperatura media de 20,8°C y humedad relativa de 52,7%.

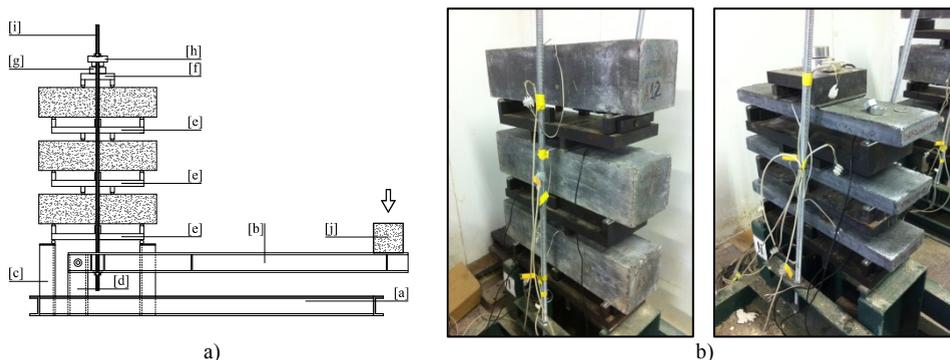


Figura 4. a) Esquema del bastidor de fluencia a flexión; b) Probetas “R” y “S” dispuestas en columna.

## 4.- RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1.- Caracterización

La resistencia a compresión simple se obtuvo a 28 días a partir de 4 probetas cilíndricas y el valor medio obtenido fue de 117,6 MPa, con un coeficiente de variación (CV) de 3%. Una vez finalizados los ensayos de fluencia, se ensayaron a compresión 4 probetas más a la edad de 441 días, resultando una media 135,64 MPa con CV de 6.7%.

Para caracterizar el comportamiento en flexión, las probetas prismáticas se ensayaron según EN14651 [13], aun cuando la forma y condiciones de carga de las probetas fueron

diferentes a las contempladas en [7]. Todas las probetas presentaron similares límites de proporcionalidad (LOP) y  $f_{R1}$ . Se puede observar una ligera variabilidad de resultados (probeta R1 respecto del resto de probetas), que corresponde a un CV de 12,9%. La Tabla 3 presenta los resultados de los ensayos de caracterización a flexión.

**Tabla 3.** Composición de la matriz referida al contenido de cemento

Probeta	$f_L$	$f_{R1}$	$f_{R2}$	$f_{R3}$	$f_{R4}$	$f_{R3}/f_{R1}$	MC Class
R1	9,48	25,84	38,46	40,61	38,85	1,57	25e
R3	9,42	24,79	33,38	33,80	30,56	1,36	24e
R5	9,42	25,26	32,29	33,23	32,26	1,32	25e
<i>Promedio</i>	<i>9,44</i>	<i>25,30</i>	<i>34,71</i>	<i>35,88</i>	<i>33,89</i>	<i>1,42</i>	<i>25e</i>
CoV (%)	0,4	2,1	9,5	11,4	12,9	9,6	

Siguiendo la clasificación del Código Modelo [16] relativa a comportamiento postfisura del FRC, el UHPFRC ensayado puede tipificarse como “25e” con un  $f_{R1}$  medio mayor que 25 MPa y un ratio de resistencia residual  $f_{R3}/f_{R1}$  mayor que 1,3.

Durante los ensayos de caracterización también se llevaron a cabo los ensayos correspondientes a la fase de pre-fisuración de las diferentes probetas para alcanzar el estado fisurado y los niveles de daño deseados. En el caso de probetas R, se alcanzan CMOD situados entre los 0,67 y 0,72mm con tensiones residuales entre 27,4 a 28,3 MPa, valores refuerzan los obtenidos en caracterización. En las probetas S en las que el criterio de pre-fisura se define con la pérdida del 50% de rigidez existe más variabilidad, ya que el CMOD alcanzado varía desde los 0,14 a 0,22mm, que traducido a tensiones varía entre los 12,3 a 15,8 MPa. Parece pues relevante para este tipo de probetas esbeltas o de reducida sección, que el hormigón así como su contenido en fibras sean homogéneos para un correcto funcionamiento de la pieza a nivel estructural. Las deformaciones diferidas

#### 4.2.- Resultados de fluencia en flexión

Tras 270 bajo carga, se procedió a la descarga de los bastidores de fluencia. Una vez retirada la carga se registró la recuperación elástica de CMOD que se produce de manera instantánea. Con el fin de registrar la posible recuperación diferida tras la descarga, se mantuvieron las probetas sin mover durante 7 días registrando dichas lecturas.

La evolución de las deformaciones diferidas de CMOD se ha representado en la Figura 5a tanto para las probetas R como para las S durante los 270 días de ensayo de fluencia. Lo primero que se aprecia en las probetas tipo R que desarrollan una mayor deformación elástica instantánea durante el proceso inicial de carga que las probetas S. En cuanto valores de deformación diferida, en las probetas S se observa una tendencia a estabilización a partir de los 120 días de ensayo, mientras que para las probetas R, esta tendencia no se observa hasta los 180 días. En probetas R, las deformaciones diferidas son de 2 a 3 veces mayores que en las probetas delgadas. La evolución de los coeficientes de fluencia en abertura de fisura  $\varphi^j$ , obtenidos según la ecuación (1) a diferentes edades ( $j = 14, 30, 90, 180$  y 270

días) se ilustran en la Figura 5b. Se puede observar cómo para los coeficientes de fluencia, las probetas S presentan mayores valores que las R. Esto se debe a que las probetas R presentaban mayor deformación elástica. Por otra parte, cabe destacar que esa tendencia a la estabilización que se podía apreciar en la Figura 5a no resulta tan evidente en la Figura 5b, lo cual puede indicarnos que el coeficiente de fluencia no es un buen indicador para el estudio del proceso de fluencia, si bien es un buen parámetro de referencia.

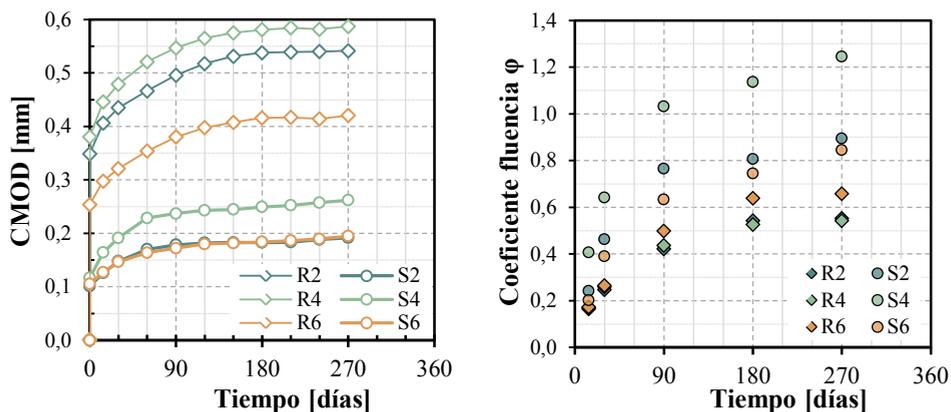


Figura 5. CMOD diferidos durante el ensayo y coeficientes de fluencia.

De manera análoga al CMOD, se han representado en la Figura 6a las deformaciones diferidas desarrolladas en la fibra más comprimida y registradas por las bandas extensiométricas situadas en la cara comprimida de las probetas. Con estos valores y utilizando la ecuación (3), se han obtenido los distintos coeficientes de fluencia en compresión y se han representado en la Figura 6b.

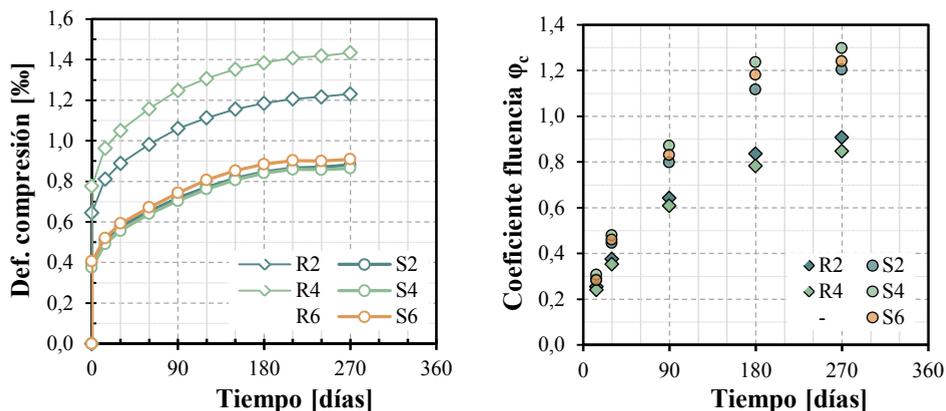


Figura 6. Deformaciones por compresión diferidas y coeficientes de fluencia.

No se aprecia una tendencia clara de estabilización, dentro de la duración del ensayo, en los valores diferidos de la Figura 6a y las curvas de ambas tipologías de probetas siguen pendientes similares. Cabe destacar que en cuanto a valores de deformaciones diferidas por compresión, no se produce una diferencia tan alta entre los dos tipos de probetas, siendo las deformaciones de las probetas R del orden de 1,5 veces las deformaciones de las probetas tipo S. Al igual que en el caso del CMOD, los coeficientes de fluencia en compresión de las probetas esbeltas S resulta mayor que el de las probetas estándar R, debido a la mayor deformación elástica inicial de las probetas R.

Si estudiamos las Figuras 5a y 6a de manera conjunta, podemos aproximarnos a interpretar el comportamiento de la sección completa de la probeta con su zona traccionada y su zona comprimida. El hecho de que se aprecie una estabilización en la zona traccionada mientras siguen aumentando las deformaciones por compresión puede ser indicador de que se está produciendo una redistribución de tensiones dentro de la sección. Dicha redistribución conlleva más tensiones en la cara comprimida, y por lo tanto mayor deformación diferida por compresión.

Con el fin de analizar la velocidad de deformación en ambas situaciones de sollicitación, se presentan en la Figura 7, para ambos tipos de probetas y en intervalos de tiempo de 30 días, tanto los valores de COR, calculados mediante la ecuación (2), como los de CR, obtenidos por medio de la ecuación (4).

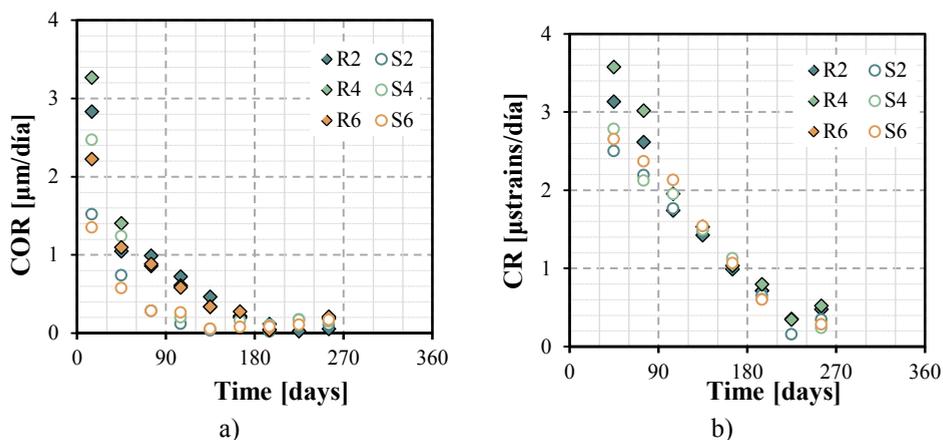


Figura 7. a) COR cada 30 días obtenidos a partir de CMOD diferido; b) CR obtenido de deformaciones diferidas por compresión

Si observamos las gráficas de velocidad de deformación COR y CR, se aprecia una relación entre la evolución de las deformaciones diferidas y su correspondiente velocidad. Para la Figura 7a, en el caso de las probetas R donde se aprecia la estabilización de CMOD diferido sobre los 180 días, la velocidad va decreciendo de manera progresiva hasta alcanzar valores próximos a cero a la edad de 180 días. Sin embargo, la velocidad de deformación diferida

de abertura de fisura de las probetas S no alcanza valores próximos a cero hasta los 120 días, edad en la que se aprecia la tendencia a estabilización de la probeta. Hay que destacar que una velocidad constante, por muy próxima a cero que sea, no deja de representar un aumento constante de la deformación diferida, lo que indica que estamos dentro de la etapa de fluencia secundaria. No se alcanzaría un estado de estabilización real hasta que la velocidad sea cero y por tanto cesara el aumento de deformaciones.

La misma comparación puede realizarse con la Figura 7b donde se podría decir que en los últimos días de ensayo se estaba alcanzando velocidades bajas de deformación próximas a una situación de estabilización de deformaciones por compresión. Al igual que en la figura 6a, la tendencia de ambas tipologías de probetas siguen pendientes similares lo que confirma que se deformaban a velocidades similares a pesar de tener secciones y niveles de carga diferentes.

### 5.- CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado el comportamiento diferido en estado fisurado de distintos elementos de UHPFRC a flexotracción mediante una campaña experimental. Las principales conclusiones derivadas de este estudio son:

- Las probetas R presentan una estabilización aparente de deformaciones CMOD diferidas a los 180 días de ensayo de fluencia, mientras que las probetas S experimentan dicha estabilización a los 120 días. Dichas deformaciones diferidas son de 2 a 3 veces mayores en las probetas R que en las probetas S.
- Los coeficientes de fluencia obtenidos de CMOD para las probetas esbeltas S es superior a los obtenidos para las probetas prismáticas R. Esto se debe a la mayor deformación elástica inicial que presentan las probetas R durante la puesta en carga.
- El parámetro coeficiente de fluencia  $\varphi^j$  no es un buen indicador para el análisis de la evolución del proceso de fluencia ya que no es sensible a la estabilización de las deformaciones, si bien es un buen parámetro de referencia.
- Las deformaciones diferidas por compresión no presentan una tendencia clara de estabilización dentro de la duración del ensayo para ninguno de los tipos de probetas, si bien las deformaciones de las probetas R son del orden de 1,5 veces las deformaciones diferidas por compresión de las probetas esbeltas S.
- En fluencia en flexión, y para los dos tipos de probeta (R y S), CMOD tiende a un valor estable a los 180 días, mientras que las deformaciones de compresión siguen aumentando más allá de los 270 días. Ello puede deberse a una redistribución de tensiones en la sección fisurada, de modo que la fluencia en la zona comprimida puede ser mayor que en la zona traccionada.
- El coeficiente de fluencia en abertura de fisura obtenido a 270 días para las probetas del tipo R es 0,58 mientras que para las probetas S resulta de 0,99. En el caso de las deformaciones por compresión, los coeficientes obtenidos a 270 días para las probetas tipo R es de 0,87 mientras que para las probetas esbeltas se ha obtenido 1,24. Si tomamos como referencia los coeficientes de fluencia por compresión de las probetas prismáticas R, obtenemos valores similares a los propuestos en [9] y algo inferiores que los propuestos en [6-8]. Como no se aprecia tendencia a estabilización de

deformaciones por compresión, es de suponer el coeficiente de fluencia siga aumentando con el tiempo, aproximándose a los valores de [6-8].

- En ambos estados de sollicitación, los coeficientes de fluencia han resultado también ser mayores para las probetas esbeltas, incluso a pesar de desarrollar deformaciones en sensiblemente menores que las probetas R. La mayor rigidez del elemento y su menor deformación elástica pueden ser determinantes
- El COR es un parámetro sensible a la estabilización que ayuda a entender la evolución de la fluencia. Cuando el CMOD diferido de las probetas S presentan estabilización a 120 días, el valor del COR se aproxima a cero. Una velocidad de deformación constante, no deja de representar un aumento constante de la deformación diferida, lo que indica que estamos dentro de la etapa de fluencia secundaria. No se alcanzaría un estado de estabilización real hasta que la velocidad sea cero y cese el aumento de deformaciones.
- Los valores del CR presentan velocidades similares independientemente de la forma de la probeta y de tener distintos niveles de carga. Durante el ensayo no se aprecia una tendencia a la estabilización de las deformaciones por compresión.
- El coeficiente de fluencia en abertura de fisura obtenido a 270 días para las probetas del tipo R es de 0,58

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación recibida desde el Ministerio de Economía y Competitividad a través de los Proyectos "BIA2012-35776 (FISNE)" y "BIA2016-78460-C3-1-R (BESHO/DEHMAR)".

## REFERENCIAS

- [1] Denarié, E.; Brühwiler, E. 'Cast-on site UHPFRC for improvement of existing structures – achievements over the last 10 years in practice and research'. Proceedings of the 7<sup>th</sup> RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites. 2015. 473-480.
- [2] Adeline, R.; Lachemi, M.; Blais, P.Y. 'Design and behaviour of the Sherbrooke footbridge'. Proceedings of the International Symposium on High Performance and Reactive Powder Concretes. Sherbrooke University. 1998. 59-63.
- [3] Moore, B., and Bierwagen, D., "Ultra-High Performance Concrete Highway Bridge", PCA, 2006.
- [4] Reichel, M.; Freytag, B.; Sparowitz, L. 'Road Bridge WILD-UHPFRC for a segmental arch structure'. BFUP 2009/UHPFRC 2009 Proceedings.
- [5] Serna, P.; López, J.A.; Camacho, E.; Coll, H.; Navarro-Gregori, J. 'Footbridge over the Ovejas ravine in Alicante: an economical alternative made only of Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC)'. 2<sup>nd</sup> FRC International workshop (1<sup>st</sup> ACI-FIB Joint Workshop) 24-25 July. Montreal. 2014.

- [6] AFGC. Association Française de Genie Civil, 2013. Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concretes. Recommendations.
- [7] Japanese Society of Civil Engineers (JSCE). Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures (Draft). Subcommittee on Research of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete. 2006. Tokyo, Japan.
- [8] Gowripalan N. and Gilbert R. I., School of Civil and Environmental Engineering. University of New South Wales (UNSW). 'Design Guidelines for RPC Prestressed Concrete Beams'. VSL (Aust) Pty Ltd.
- [9] Graybeal, B. 'Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete'. Federal Highway Administration, Office of Research, Development and Technology, Turner-Fairbank Highway Research Center. 2006.
- [10] Kamen, A.; Denarié, E.; Sadouki, H.; Brühwiler E. 'UHPFRC tensile creep at early age'. *Materials and Structures*. Vol 42, Issue 1, pp 113-122. March, 2008.
- [11] Ranaivomanana, N.; Multon, S.; Turatsinze A. 'Tensile, Compressive and flexural basic creep of concrete at different stress levels'. *Cement and Concrete Research*. 52 (2013) 1-10.
- [12] European Committee for Standardization. (2011) *EN179-1:201*, Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements, Brussels, Belgium.
- [13] European Committee for Standardization. (2005) *EN14651:2007* Test Method for Metallic Fibered Concrete - Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality (LOP), Residual). Brussels, Belgium.
- [14] Arango, S., Serna, P., Martí-Vargas J.R., & García-Taengua, E. (2012). A Test method to characterize flexural creep behaviour of pre-cracked FRC specimens. *Experimental Mechanics*, 52(8), 1067-1078.
- [15] ASTM C512 / C512M-15, Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, DOI: 10.1520/C0512\_C0512M-15, www.astm.org.
- [16] Fédération Internationale du Béton. (2013) *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Berlin, Germany. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, pp. 74-150.