

# Influencia de la orientación y la densidad de las fibras en la resistencia a tracción por flexión de hormigones

## *Influence of fibre volume fraction and fibre orientation on the residual flexural tensile strength of fibre-reinforced concrete*

Jesús Mínguez Algarra<sup>a,\*</sup>, Dorys González Cabrera<sup>b</sup>, y Miguel Ángel Vicente Cabrera<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Dr. por la Universidad de Burgos. Universidad de Burgos, Profesor Asociado, Burgos, España

<sup>b</sup> Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Burgos, Profesor Contratado Doctor Fijo, Burgos, España

<sup>c</sup> Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Burgos, Profesor Titular de Universidad, Burgos, España

Recibido el 14 de abril de 2017; aceptado el 23 de mayo de 2017

### RESUMEN

Esta investigación se centra en analizar la relación que existe entre la orientación de las fibras y su densidad, por un lado, y la resistencia residual a tracción del hormigón reforzado, por otro. Para ello se fabricó una viga pared de hormigón reforzado con fibras metálicas, del que se extrajeron una serie de probetas prismáticas, de diferentes zonas. En primer lugar, todas las probetas fueron sometidas a un ensayo de tomografía axial computarizada (CT-Scan) para obtener la posición y orientación de sus fibras. A continuación, dichas probetas fueron sometidas al ensayo de flexión en tres puntos, de acuerdo a la normativa vigente, y se obtuvieron los valores de resistencia residual a tracción del hormigón ( $f_{R,i}$ ).

© 2019 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L.L. Todos los derechos reservados.

PALABRAS CLAVE: Hormigón reforzado con fibras; Tomografía computarizada; Orientación de fibras; Densidad de fibras; Ensayo de flexión en tres puntos

### ABSTRACT

In this paper, a study is conducted on the relationship between fibre orientation and fibre volume fraction and residual flexural tensile strength. In order to do this, one steel fibre reinforced concrete deep beam was casted. A set of prismatic specimens were extracted from different parts of this deep beam and with different orientations. First, all these specimens were subjected to a computed tomography (CT-Scan) study in which the fibre orientation and fibre volume fraction was determined. These specimens were then subjected to 3-point bending testing, in accordance with current standards, and the residual flexural tensile strengths values were obtained ( $f_{R,i}$ ).

© 2019 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L.L. All rights reserved.

KEYWORDS: Fibre reinforced concrete; Computed tomography; Fibre orientation; Fibre volume fraction; 3-Point bending testing

## 1

### INTRODUCCIÓN

El modo de fallo de los hormigones reforzados con fibras sometidos a cargas de flexión, con o sin esfuerzo axial, está fuertemente condicionado por la resistencia residual posfi-

suración ( $f_{R,i}$ ). De acuerdo con el Model Code 2010 [1], el diseño estructural de estos hormigones se basa en la tensión residual proporcionada por el refuerzo de fibras. En particular, los valores de  $f_{R,1}$  y  $f_{R,3}$  son utilizados en la formulación, definidos estos como los valores de resistencia residual a tracción asociados a una apertura de fisura de 0,5 y 2,5 mm, respectivamente.

\* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: [jminguez@ubu.es](mailto:jminguez@ubu.es) (J. Mínguez Algarra).

Estos valores son empíricos para cada dosificación de hormigón, y se obtienen a través del correspondiente ensayo normalizado de flexión en tres puntos [2].

El resultado obtenido en este ensayo está fuertemente condicionado por la densidad de fibras y su orientación, además de por el tipo de fibra. Por un lado, cuanto mayor es la cantidad de fibras o, dicho de otro modo, su densidad, mayor es la resistencia residual. Por otra parte, cuando las fibras se encuentran orientadas paralelamente a la dirección de la tracción, su eficiencia estructural es más alta y el resultado macroscópico es una mayor resistencia residual. Por el contrario, si las fibras se encuentran orientadas perpendicularmente a la dirección de la tracción, su influencia es nula y, de facto, el material se comporta como si no tuviese fibras.

Hasta la fecha, la orientación de las fibras es un fenómeno que no es controlable durante la construcción, lo que introduce incertidumbre en el resultado final. La orientación de las fibras, como tantos otros fenómenos en el hormigón, muestra un claro efecto de escala. Esto hace que en probetas pequeñas, como las que habitualmente se utilizan en los ensayos de caracterización de los hormigones con fibras, la orientación de estas sea, fundamentalmente, a lo largo del eje de la misma, mientras que en elementos más grandes (vigas o losas) su orientación sea muy diferente. Este hecho afecta significativamente a la resistencia residual real del hormigón, puesto que en la probeta se obtienen, por norma general, valores de resistencia residual sustancialmente más altos que los que se obtienen en las piezas más grandes [3–5].

Existen numerosos trabajos de investigación que constatan cómo la densidad de fibras y su orientación modifican los valores de  $f_{R,i}$  [6–12]. Sin embargo, en todas ellas tanto la densidad de las fibras como su orientación son valores meramente estimativos. En el caso de la densidad se llevan a cabo diferentes dosificaciones con diferente contenido en fibras. Se asume que todas las probetas de una misma amasada tienen la misma densidad, sin tener en cuenta que la distribución de las fibras no es perfecta y que unas probetas pueden tener más fibras que otras.

De forma análoga, en los estudios que tratan de estimar la influencia de la orientación de las fibras se desarrolla un proceso de fabricación de las probetas que condiciona una orientación de las fibras dominante. Se asume la hipótesis de que las fibras de todas las probetas muestran dicha orientación, sin tener en cuenta que el proceso no es perfecto y que no todas las fibras presentan la orientación esperada.

Este trabajo de investigación tiene por objeto determinar la resistencia residual a tracción ( $f_{R,i}$ ) de probetas de hormigón de alta resistencia reforzado con fibras metálicas cuya distribución de fibras es previamente conocida, la cual ha sido obtenida utilizando un equipo de tomografía axial computarizada (CT-Scan). Esta técnica, no destructiva, permite conocer la orientación y la posición de cada una de las fibras individualmente. A partir de estos datos es posible conocer los histogramas de distribución de las fibras y su orientación dominante, y también la densidad de fibras en la probeta. Una explicación más detallada del proceso se puede encontrar en la referencia [13].

En este trabajo se analizan un total de 8 probetas prismáticas, de  $100 \times 100 \times 350$  mm, extraídas a partir de un muro de  $900 \times 350 \times 100$  mm. Cada probeta es extraída de una región

diferente del muro y, además, según una orientación diferente. En consecuencia, cada probeta presenta una densidad de fibras y una orientación diferentes. Previamente a la realización del ensayo de flexión en tres puntos, todas las probetas son escaneadas para obtener la orientación y la distribución de las fibras.

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

En este apartado se describe el material, el procedimiento de fabricación de las probetas y el proceso de escaneo y tratamiento de imágenes, así como los ensayos de caracterización realizados.

### 2.1. Materiales

El material utilizado en este trabajo es un hormigón de alta resistencia reforzado con fibras metálicas, realizado con árido silíceo de 12 mm de tamaño máximo, cemento tipo CEM I 52.5 R, humo de sílice y superplastificante. Las probetas fueron prismáticas de  $100 \times 100 \times 350$  mm, con una resistencia a compresión de 78,2 MPa. El hormigón fue reforzado con fibras metálicas (1% vol) tipo *hook-ended*, de 45 mm de longitud y 1,2 mm de diámetro. La resistencia a tracción de las fibras es de 1.200 MPa.

### 2.2. Proceso de fabricación de las probetas

Se construyó un muro vertical de dimensiones  $900 \times 350 \times 100$  mm para posteriormente extraer probetas en diferentes zonas. El hormigonado del mismo se realizó desde su cara superior. Para su compactación se utilizaron vibradores de aguja convencionales (fig. 1).

Las probetas fueron marcadas en el muro (fig. 2) para su posterior tallado con unas dimensiones  $100 \times 100 \times 350$  mm. El objetivo de la disposición de las probetas talladas es utilizar posiciones diferentes donde la densidad y orientación de fibras serán presumiblemente distintas. Una vez extraídas del muro, adicionalmente, a todas las probetas se les talló una entalla, de acuerdo a lo recogido en la



Figura 1. Fabricación del muro.

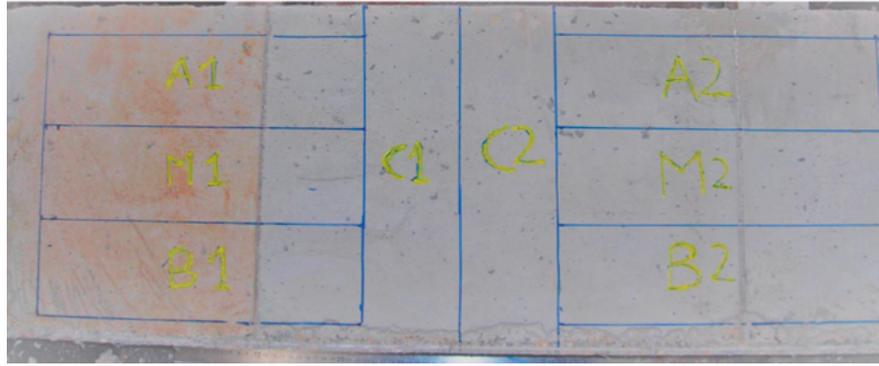


Figura 2. Muro con las probetas marcadas.

EN 14651:2005 [2] Las probetas se clasifican en 4 series. Cada una de ellas muestra características diferentes a priori:

- Serie A. Compuesta por dos probetas extraídas de la parte superior del muro y con orientación perpendicular a la dirección de hormigonado.
- Serie M. Compuesta por dos probetas extraídas de la parte central del muro y con orientación perpendicular a la dirección de hormigonado.
- Serie B. Compuesta por dos probetas extraídas de la parte inferior del muro y con orientación perpendicular a la dirección de hormigonado.
- Serie C. Compuesta por dos probetas extraídas de la parte central del muro y con orientación paralela a la dirección de hormigonado.

### 2.3. Determinación de la orientación y la densidad de las fibras

Una vez talladas las probetas, se escanearon utilizando un equipo de CT-Scan para la obtención de la orientación y la ubicación de cada una de las fibras de cada probeta (fig. 3).

El equipo de tomografía escanea la probeta y genera imágenes seccionales de la misma. La distancia entre imágenes es de  $200\mu\text{m}$ . El número total de imágenes es de 1.750. La resolución de cada imagen es de  $1.024 \times 1.024$  píxeles. El tamaño del píxel es de  $15 \times 150\mu\text{m}$ . Las imágenes generadas están en escala de grises en función de la densidad de cada punto. Los tonos más claros corresponden a puntos de más densidad y los tonos más oscuros, a los puntos de menos densidad.

Mediante un proceso de segmentación se identifican los píxeles pertenecientes a las fibras. A continuación, mediante un algoritmo matemático desarrollado por los autores, y descrito en [13], se agrupan, en primer lugar, los píxeles pertenecientes a la misma fibra dentro de una misma imagen y, a continuación, los grupos de píxeles pertenecientes a la misma fibra en diferentes imágenes.

Una vez identificadas todas las fibras, se obtiene, en primer lugar, su posición, definida como el centro de gravedad de la nube de puntos que conforma la fibra. En segundo lugar se obtiene la orientación de la fibra. Para ello se ajusta, mediante la técnica de mínimos cuadrados, una recta, que identifica su orientación. La orientación de la fibra se define a partir del ángulo que forma la recta con los planos principales de la probeta, a saber, XY, XZ e YZ. El eje Z es el eje longitudinal de la probeta, el eje Y es el eje vertical y el eje X es el eje transversal.

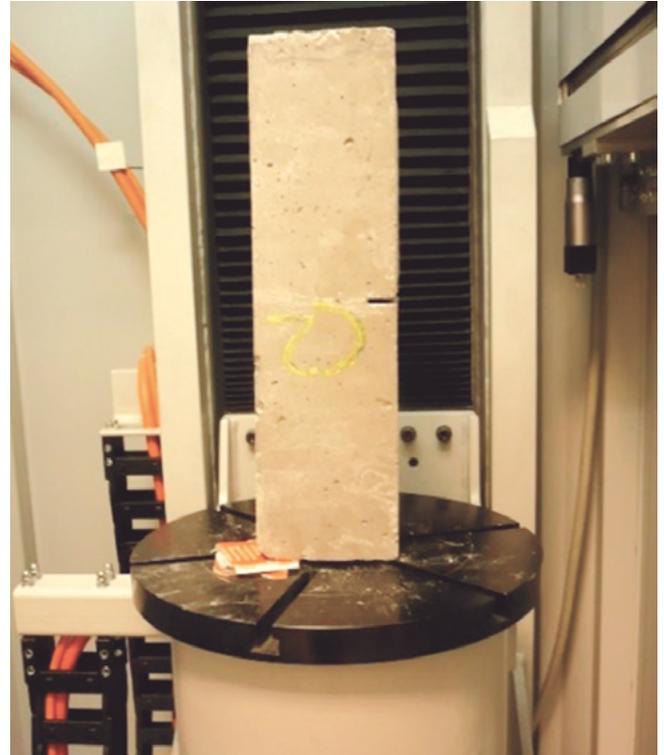


Figura 3. Imagen de la probeta dentro del equipo de tomografía.

La figura 4 muestra las orientaciones de cada una de las probetas, ubicadas en su posición dentro del muro.

### 2.4. Medida de la resistencia residual a tracción por flexión

Las 8 probetas prismáticas fueron sometidas a un ensayo de flexión en tres puntos para determinar la capacidad a flexotracción para diferentes valores de CMOD. La distancia entre puntos de apoyo en el ensayo fue de 300 mm (fig. 5).

Para la realización de los ensayos se utiliza un actuador dinámico de  $\pm 50$  kN de carga máxima, modelo MTS 244.41, dotado de una célula de carga modelo MTS 661.25 con un rango de  $\pm 50$  kN y una precisión de  $\pm 0,5$  kN, un extensómetro de clip modelo MTS 634.12F-24 con un rango máximo de 10 mm y 0,01 mm de precisión, y dos transductores de desplazamiento inductivos, modelo HBM, de 20 mm de rango y 0,01 mm de precisión.

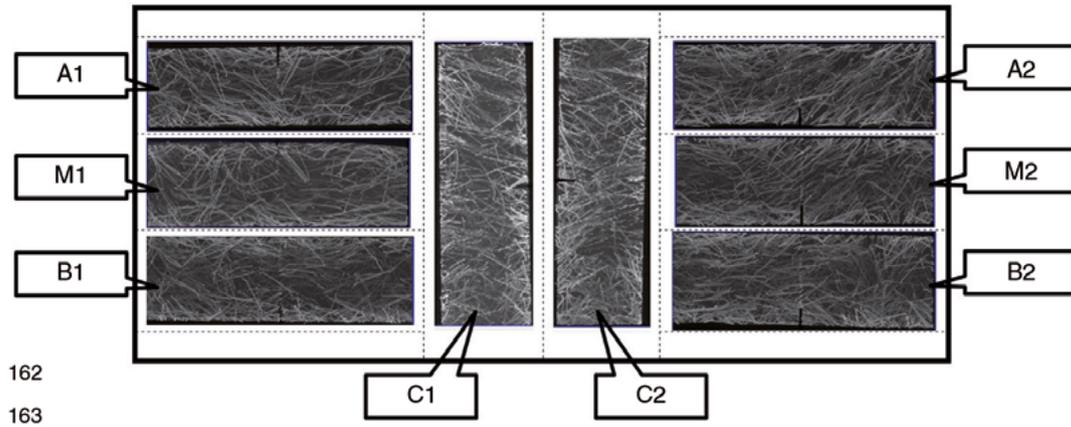


Figura 4. Orientación de las fibras de cada probeta.

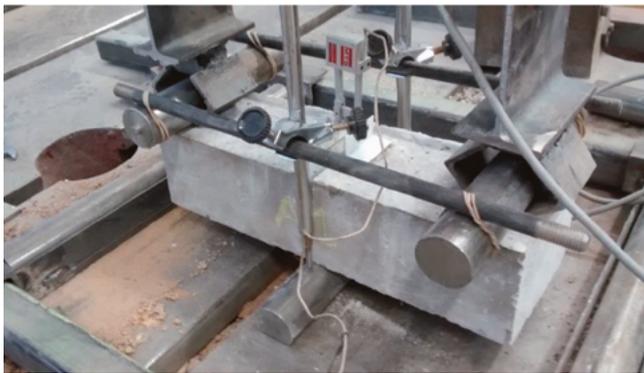


Figura 5. Probeta durante el ensayo.

### 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos. En primer lugar se muestran los resultados obtenidos a partir de análisis con CT-Scan, en términos de índice de eficiencia y densidad. En segundo lugar se muestran los resultados de los ensayos de flexión en tres puntos.

#### 3.1. Resultados del análisis de las fibras con CT-Scan

##### 3.1.1. Índice de eficiencia

En este caso particular, la dirección de interés es la ortogonal al plano XY, pues es en la que se producirán las tracciones en el ensayo de flexión en tres puntos. A partir de los ángulos que forman cada una de las fibras respecto a este plano es posible definir el «índice de eficiencia» según la siguiente expresión (ecuación 1):

$$e_{xy} = \sum f(\alpha_{xy}) \sin \alpha_{xy} \quad (1)$$

siendo  $f(\alpha_{xy})$  la frecuencia relativa con la que aparece el ángulo en cada una de las clases del histograma (cada clase está formada por  $10^\circ$ ) y  $\sin \alpha_{xy}$  es el seno del ángulo promedio de la clase del histograma considerada. El sumatorio de este producto para todas las clases del histograma da como resultado el índice de eficiencia global.

El índice de eficiencia varía entre 0 y 1, correspondiendo 0 al caso de que todas las fibras estén contenidas en el plano XY y 1 al caso de que todas las fibras sean ortogonales a dicho plano.

El análisis global de las probetas muestra que las fibras no están igualmente distribuidas en toda su masa, sino que existen regiones con un contenido en fibras mayor y otras con un contenido menor. Se propone entonces determinar un índice de eficiencia parcial, correspondiente a las fibras que se encuentran en el entorno de la sección central, que son las que más activamente intervienen en la respuesta a flexión de la probeta. Para ello se define una región central de 100 mm de longitud y centrada en torno a la sección a de la entalla.

La figura 6 muestra los histogramas globales de las diferentes familias de probetas.

La tabla 1 muestra los resultados del índice de eficiencia global y de la región central.

A partir de los datos recogidos se puede observar como las probetas de las series A, M y B (probetas ortogonales a la dirección de hormigonado) muestran un índice de eficiencia alrededor de 0,6. Se trata de un valor alejado de 1, que era lo inicialmente esperable. Por su parte, la serie C muestra índices de eficiencia menores, tal y como era de esperar, aunque lejos de 0, que era lo inicialmente esperado. Por su parte, cabe destacar que existe poca diferencia entre los índices de eficiencia de la región central y de la probeta completa.

TABLA 1  
Índices de eficiencia global y de la región central de las diferentes probetas

Probeta	Índice de eficiencia global	Índice de eficiencia región central
A1	0,67	0,69
A2	0,62	0,66
M1	0,65	0,56
M2	0,47	0,48
B1	0,52	0,70
B2	0,52	0,62
C1	0,31	0,26
C2	0,40	0,38

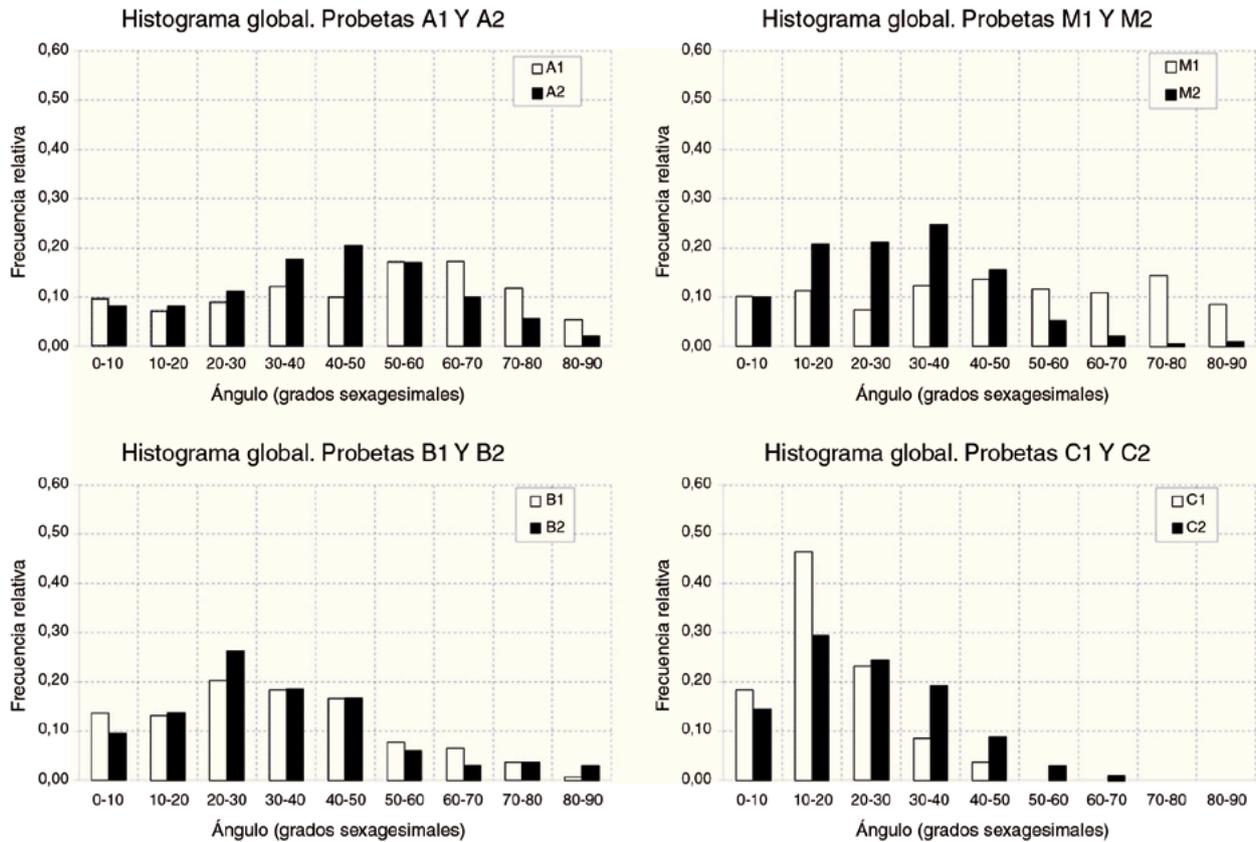


Figura 6. Histogramas globales.

### 3.1.2. Densidad de fibras

En relación a la densidad de las fibras, interesa igualmente el número de fibras que atraviesan la sección central, puesto que son las que influyen en la respuesta estructural del elemento. La densidad se define como el cociente entre el número de fibras que atraviesan la sección central y el área de esta.

La [tabla 2](#) muestra los resultados obtenidos en relación a la densidad.

Tal y como se puede apreciar en la [tabla 2](#), existen diferencias notables entre las diferentes probetas, es decir, el reparto de las fibras no es uniforme en todo el elemento estructural. La serie que muestra más densidad media es la B. Las series A y M muestran una densidad media similar, aunque esta última con una mayor dispersión. Por su parte,

la serie C muestra un valor de densidad media ligeramente inferior y una baja dispersión.

### 3.2. Resultados del ensayo de flexión en tres puntos

En la [figura 7](#) se muestran los diagramas tensión - CMOD de todas las probetas.

Estas gráficas muestran que existe un comportamiento muy diferente entre unas probetas y otras, aun cuando todas provienen del mismo muro y, en consecuencia, el material que las conforma es el mismo.

Llama la atención, en primer lugar, que las probetas que presentan una densidad más baja, fundamentalmente las probetas C1, C2 y M2, muestran un comportamiento

TABLA 2  
Densidad de fibras

Probeta	Número de fibras que atraviesan la sección central	Densidad (m <sup>-2</sup> )
A1	37	4.625
A2	53	6.625
M1	60	7.500
M2	27	3.375
B1	55	6.875
B2	57	7.125
C1	34	4.250
C2	44	5.500

TABLA 3  
Valores de límite de proporcionalidad y resistencia residual de las probetas

Probeta	f <sub>l</sub> (MPa)	f <sub>R,1</sub> (MPa)	f <sub>R,2</sub> (MPa)	f <sub>R,3</sub> (MPa)	f <sub>R,4</sub> (MPa)
A1	6,1	5,7	5,1	4,6	6,1
A2	8,4	8,9	7,2	4,5	8,4
M1	6,2	6,8	6,2	5,3	6,2
M2	3,6	3,8	3,5	3,4	3,6
B1	7,5	7,7	6,7	4,8	7,5
B2	9,3	9,0	8,3	7,7	9,3
C1	2,5	1,8	1,3	1,2	2,5
C2	3,3	2,8	2,5	2,4	3,3

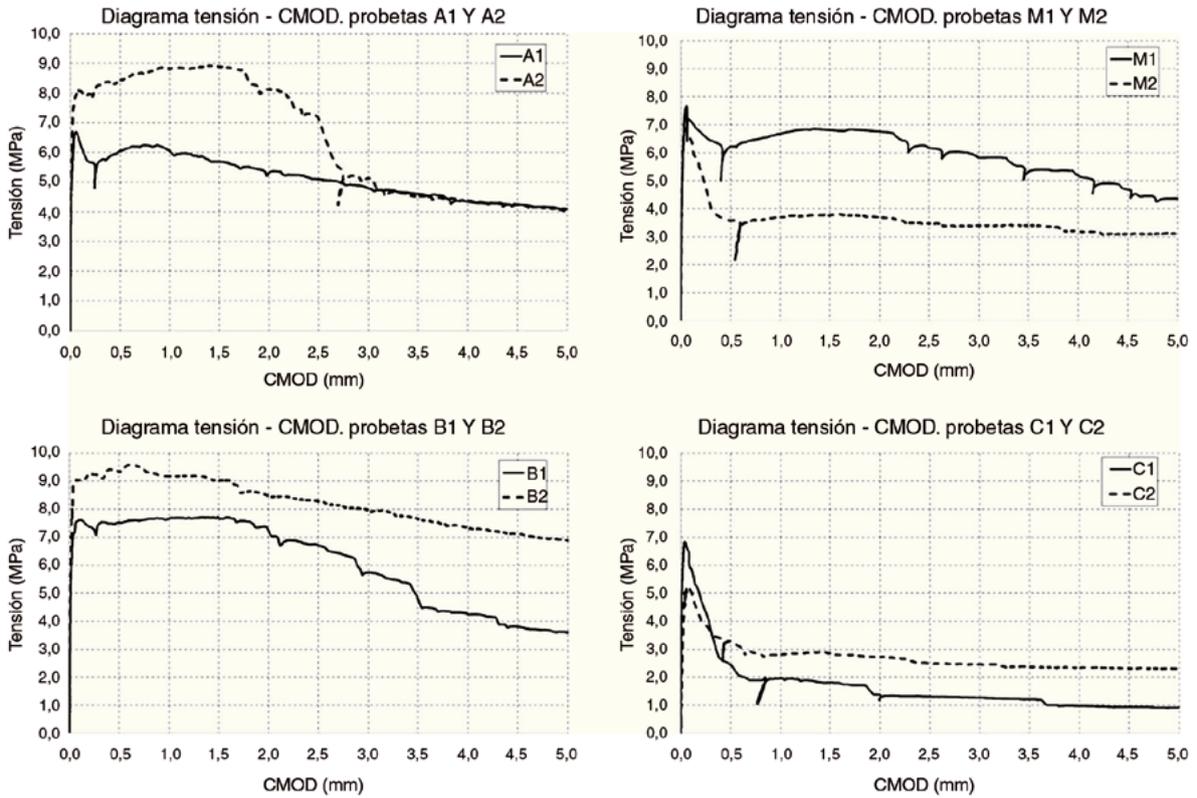


Figura 7. Diagramas tensión - CMOD obtenidos.

posfisuración más frágil, con una caída muy brusca de la resistencia residual. En el caso de las probetas C1 y C2, este fenómeno se ve amplificado por el hecho de que su índice de eficiencia es más bajo.

La tabla 3 muestra los valores del límite de proporcionalidad y la resistencia residual a la flexión en tracción obtenidos.

Las probetas que muestran una mayor resistencia residual media son las probetas dispuestas de forma horizontal en el muro (A, M y B). Esta mayor resistencia residual está relacionada con un índice de eficiencia y densidad de fibras mayores. En la figura 8 se muestra la correlación entre la

resistencia residual y el índice de eficiencia, por una parte, y la densidad, por otra.

La figura 8 muestra una fuerte correlación entre la resistencia residual y el índice de eficiencia y la densidad. En ambos casos la relación es proporcional, de tal modo que un incremento del índice de eficiencia y/o la densidad implican un incremento de la resistencia residual del hormigón.

Se trata de correlaciones muy interesantes, en la medida en que permiten entender cómo se comportan elementos más grandes de hormigón con fibras (losas o vigas, por ejemplo), que muestran una orientación de fibras muy distinta a la de las probetas prismáticas de control.

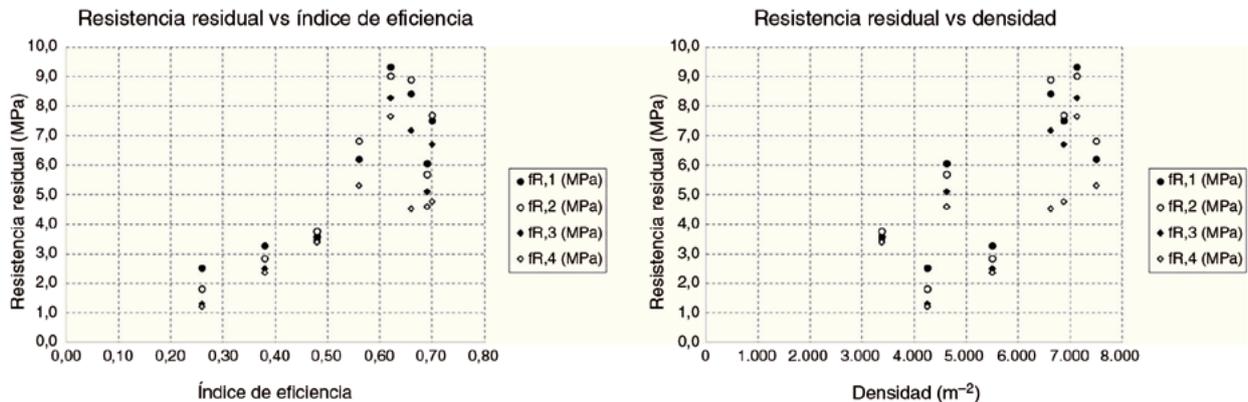


Figura 8. Correlación de la resistencia residual con el índice de eficiencia y la densidad.

#### 4. CONCLUSIONES

En este artículo se ha estudiado experimentalmente la relación existente entre la orientación y la densidad de las fibras y el comportamiento mecánico a tracción por flexión en el caso de hormigones de alta resistencia reforzados con fibras metálicas. Para la determinación de la orientación y la densidad de las fibras se ha utilizado la tecnología CT-Scan y un software de posproceso especialmente desarrollado por los autores. A continuación se exponen las conclusiones más significativas de este trabajo:

- La utilización de la tecnología CT-Scan en hormigón con fibras abre una vía de estudio muy interesante, ya que se trata de un ensayo no destructivo. Es posible determinar la orientación y la densidad exactas de cada probeta, sin hipótesis previas, y a continuación realizar el ensayo de la misma.
- Las probetas de las series A, M y B (probetas ortogonales a la dirección de hormigonado) muestran un índice de eficiencia alrededor de 0,6. Por su parte, la serie C muestra índices de eficiencia menores debido a que su disposición es diferente con respecto al muro y a la dirección de hormigonado. Sin embargo, en ambos casos se encuentran lejos de los valores esperados a priori.
- Las probetas que muestran una mayor resistencia residual media son las probetas dispuestas de forma horizontal en el muro (A, M y B).
- Existe una relación directa entre la resistencia residual y la densidad de fibras. Estas correlaciones son útiles para estimar la resistencia residual esperable en el caso de piezas de hormigón más grandes (como losas o vigas).

#### *Financiación*

Este trabajo ha sido financiado por la Junta de Castilla y León, dentro del «Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación para proyectos a realizar por grupos de investiga-

ción y grupos de investigación noveles, convocatoria 2007» (Orden EDU/1160/2008).

#### *Bibliografía*

- [1] International Federation for Structural Concrete (2010). Model Code for concrete structures. FIB Bulletin 65, Lausanne, Switzerland.
- [2] British Standards Institution (2008). Test method for metallic fiber concrete—Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality [LOP], residual). EN 14651:2005 + A1:2007, London.
- [3] R. Zerbino, J.M. Tobes, M.E. Bossio, G. Giaccio, On the orientation of fibres in structural members fabricated with self compacting fibre reinforced concrete, *Cement Concrete Comp.* 34 (2) (2012) 191–200.
- [4] L. Martinie, N. Roussel, Simple tools for fibre orientation prediction in industrial practice, *Cement Concrete Res.* 41 (10) (2011) 993–1000.
- [5] M.C. Torrijos, B.E. Barragán, R. Zerbino, Placing conditions, meso-structural characteristics and post-cracking response of fibre reinforced self-compacting concretes, *Constr. Build. Mater.* 24 (6) (2010) 1078–1085.
- [6] C. Lee, H. Kim, Orientation factor and number of fibers at failure plane in ring-type steel fiber reinforced concrete, *Cement Concrete Res.* 40 (5) (2010) 810–819.
- [7] S. Yacici, G. Inan, V. Tabak, Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC, *Constr. Build. Mater.* 21 (2007) 1250–1253.
- [8] Y. Ding, Investigations into the relationship between deflection and crack mouth opening displacement of SFRC beam, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 2432–2440.
- [9] M.N. Soutsos, T.T. Le, A.P. Lampropoulos, Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres, *Constr. Build. Mater.* 36 (2012) 704–710.
- [10] M. Pajak, T. Ponikiewski, Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 397–408.
- [11] D. Dupont, L. Vandewalle, Distribution of steel fibres in rectangular sections, *Cement Concrete Comp.* 27 (2005) 391–398.
- [12] D.C. González, M.A. Vicente, S. Ahmad, Effect of cyclic loading on the residual tensile strength of steel fiber-reinforced high-strength concrete, *J. Mater. Civil Eng.* 27 (9) (2015) 04014241-1–04014241-8.
- [13] M.A. Vicente, D.C. González, J. Mínguez, Determination of dominant fibre orientations in fibre-reinforced high-strength concrete elements based on computed tomography scans, *Nondestruct. Test. Eva.* 29 (2) (2014) 164–182.