

Correlación entre la microestructura y la respuesta a fatiga de hormigones reforzados con fibras bajo esfuerzos de flexión, mediante el uso de tomografía computerizada

Correlation between microstructure and fatigue behaviour of fiber-reinforced concrete under bending forces, using computerized tomography

Dorys Carmen González Cabrera^{*, a}, Jesús Mínguez Algarra^b, Álvaro Mena Alonso^c y

Miguel Ángel Vicente Cabrera^d

^a Dr. ICCP. Profesor Contratado Doctor. Universidad de Burgos. dgonzalez@ubu.es

^b Dr. ICCP. Profesor Ayudante Doctor. Universidad de Burgos. jminguez@ubu.es

^c ICCP. Estudiante de Doctorado. Universidad de Burgos. Ama0104@alu.ubu.es

^d Dr. ICCP. Profesor Titular de Universidad. Universidad de Burgos. mvicente@ubu.es

RESUMEN

Este trabajo muestra la evolución de la resistencia residual a tracción del hormigón reforzado con fibras previamente sometido a cargas cíclicas, generadoras de daño estructural. Todas las probetas ensayadas son posteriormente escaneadas utilizando un equipo de tomografía computerizada, al objeto de explorar las fisuras, la posición y orientación de las fibras. Los ensayos mecánicos muestran la evolución de la resistencia residual a tracción en función del daño a fatiga.

ABSTRACT

This paper shows the evolution of the residual tensile strength of fiber reinforced concrete elements, previously subjected to cyclic loads resulting in structural damage. All test specimens are subsequently scanned using computerized tomography equipment, in order to explore the cracks and the position and orientation of the fibers. Mechanical tests show the evolution of residual tensile strength as a function of the fatigue damage.

PALABRAS CLAVE: fatiga, hormigón reforzado con fibras, tensiones residuales, tomografía computerizada.

KEYWORDS: fatigue, fiber-reinforced concrete, residual stresses, computerized tomography.

1. Introducción

El hormigón reforzado con fibras (HRF) es una solución tecnológica cada vez más utilizada en ingeniería civil, por la reducción de coste de mano de obra que ofrece, especialmente en combinación con hormigón autocompacto. En la mayoría de los casos, la presencia de fibras mejora las propiedades mecánicas: menor

fisuración [1 a 3], mejor respuesta a fatiga [4 a 7], incremento de la resistencia a tracción [8, 9], etc.

La fatiga del hormigón se puede entender como un proceso de degradación estructural que conduce al colapso. Las cargas cíclicas provocan el nacimiento y desarrollo de fisuras. La consecuencia macroscópica es un cambio

gradual en los parámetros mecánicos del hormigón.

La mayor parte de los trabajos de investigación en fatiga se han centrado en la vida a fatiga, definida ésta como el número de ciclos de carga que un elemento de hormigón puede soportar hasta la rotura, y en las curvas S-N, que correlacionan la tensión aplicada con la vida a fatiga [10 a 15]. Sin embargo, han sido pocos los trabajos de investigación centrados en los parámetros mecánicos del hormigón y su evolución con el tiempo [4, 6, 16 a 22].

En el caso de los HRF, el debilitamiento estructural se muestra en una variación, con el número de ciclos, de la resistencia residual a tracción $f_{R,j}$.

Tanto la vida a fatiga como la reducción de la resistencia residual a tracción dependen fuertemente de la geometría y las características mecánicas de las fibras (forma, longitud, esbeltez, etc.), así como de la cantidad, distribución y orientación de las mismas.

En relación con esto último, la tomografía computerizada (TC) es una herramienta poderosa para estudiar la distribución y la orientación de las fibras, en el caso de HRF. La TC es una técnica no destructiva para visualizar la microestructura de los materiales, utilizando para ello las propiedades de los rayos X. Un equipo de TC está compuesto por un emisor de rayos X, que emite un haz cónico cuyo valor de intensidad es conocido, y una matriz de receptores, que mide la pérdida de energía del haz. Mediante rotación de las probetas, se hace pasar los rayos según todas las direcciones, evaluando la pérdida de energía de los rayos según las diferentes trayectorias. El software de postprocesado determina la densidad que presenta la probeta en cada punto compatible con la pérdida de energía de todos los rayos registrada por los sensores.

El resultado final es una imagen tridimensional en escala de grises en el que cada vóxel tiene asignado un nivel de gris en función de su densidad. Los tonos más claros

corresponden con densidades más altas y los tonos más bajos, con densidades menores.

El uso de la TC en hormigones reforzados está siendo muy intensa en los últimos años [23 a 29]. La gran ventaja de la TC es que permite evaluar la posición y la orientación de cada fibra individual dentro de la probeta, sin dañarla, lo que sirve de base para correlacionar la microestructura y la respuesta macroscópica. Una explicación detallada de la tecnología de TC y su uso en diferentes campos de la ciencia (más allá de su uso bien conocido en medicina) se puede encontrar en [30].

El objetivo de este trabajo de investigación es analizar cómo el contenido en fibras y su orientación influyen, por un lado, en la vida a fatiga y, por otro, en la resistencia residual a tracción de HRF previamente sometidos a ensayos cíclicos de flexión en tres puntos sin alcanzar la rotura. El procedimiento de ensayo utilizado en este trabajo es el mostrado por González y sus colaboradores [4, 6].

2. Programa experimental

A continuación se describen los materiales utilizados en este trabajo, el procedimiento de ensayo y el de escaneo.

2.1 Materiales

La campaña de ensayos constó de 65 probetas prismática, pertenecientes a dos series, denominadas A y B. En ambos casos, la pasta de cemento es la misma y la única diferencia es el contenido de fibras, que fue del 1% en volumen para la serie A y del 2% en volumen para la serie B (Tabla 1).

Se ha utilizado cemento portland ordinario, árido calizo de machaqueo, tanto grueso ($T_{max}=15mm$) como fino. Las fibras utilizadas fueron de tipo hooked-end, de 50 mm de longitud y 1 mm de diámetro. Además, se ha utilizado superplastificante Glenium 52 (BASF) y nanosílice MEYCO MS685 (BASF). Las

muestras se curaron durante 180 días en cámara húmeda (20°C y 100% de humedad). A continuación se sacaron de la cámara húmeda y se mantuvieron en el laboratorio hasta el momento del ensayo. Todas las probetas tenían más de 300 días cuando se ensayaron a fatiga, lo que garantiza que la resistencia del hormigón ya se ha estabilizado. El valor medio de resistencia a compresión a los 28 días fue de 81.5 MPa para la serie A y de 78.1 MPa para la serie B.

Tabla 1. Dosificación.

Materiales	Serie A	Serie B
Cemento (kg/m ³)	400	
Agua (kg/m ³)	125	
Superplastificante (kg/m ³)	14	
Nanosílice (kg/m ³)	6	
Árido Fino (kg/m ³)	800	
Árido Grueso (kg/m ³)	1080	
Fibra (% en volumen)	1%	2%

Se prepararon 40 prismas de la serie A y 25 de la serie B. Todos ellos eran de 600 mm de longitud y sección cuadrada de 150 mm de lado. Además, se fabricaron dos series de cilindros de 150x300 mm para su caracterización a compresión.

2.2 Procedimiento de ensayo

Tal y como se ha indicado anteriormente, se ha seguido el protocolo de ensayo desarrollado por Gonzalez y colaboradores [4, 6]. De forma resumida, el programa de ensayos consta de 4 fases, las cuales se describen a continuación.

1. Fase 1. Fisuración inicial. Durante esta primera fase, todos los prismas son sometidos a un ensayo estático de flexión en 3 puntos, hasta la aparición de la primera fisura (las probetas no fueron entalladas).
2. Fase 2. Ensayos de fatiga. En esta segunda fase, doce prismas de la serie A y nueve prismas de la serie B fueron sometidos a

carga cíclica hasta rotura, al objeto de estimar la vida a fatiga.

3. Fase 3. Ensayos cíclicos. En esta tercera fase, veintiún prismas de la serie A y doce prismas de la serie B fueron sometidos a carga cíclica hasta un número de ciclos predefinido.
4. Fase 4. Ensayos estáticos. En esta última fase, todos los prismas sometidos a cargas cíclicas como aquellos no sometidos a cargas cíclicas (siete prismas de la serie A y cuatro prismas de la serie B), fueron sometidos a un ensayo estático de flexión en tres puntos hasta rotura, para evaluar cómo se modifica la resistencia residual a tracción con el nivel de daño previamente infligido por las cargas cíclicas.

2.3 Ensayos de TC

Adicionalmente, todos los prismas de la fase 4 fueron escaneados después de rotos, al objeto de medir la posición y la orientación de las fibras en el entorno de la fisura. Para ello, se extrajo una pequeña muestra del entorno de la fisura (Figura 1). Esta región proporciona información muy útil, en la medida en que las fibras que controlan el proceso de fallo son las que cosen la fisura.

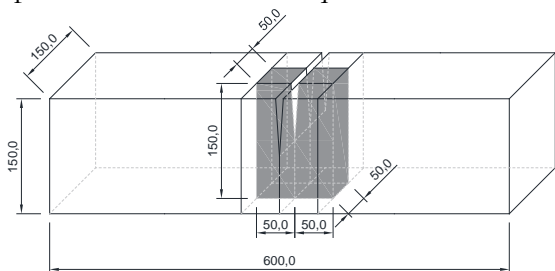


Figura 1. Ubicación de la muestra extraída de la probeta para su estudio con el equipo de TC.

Para el escaneo se ha utilizado un equipo GE Phoenix v|tome|x equipado con un tubo de 300 kV/500W. Utilizando el software de postprocesado de datos VGSTUDIO MAX, se obtuvieron un total de 2.500 imágenes bidimensionales de 2048x2048 píxeles, a partir de los cuales se conforma la imagen tridimensional. El tamaño de vóxel fue de

60x60x60 μm^3 . El software asigna un tono de gris, entre 0 y 255 en función de su densidad, siendo 0 la menor densidad y 255 la mayor. El resultado final de este proceso es un fichero que incluye las coordenadas X, Y, Z del centro de cada vóxel y un número entero entre 0 y 255 que corresponde con su densidad. El número total de vóxeles de cada muestra fue de, aproximadamente, $3.5 \cdot 10^9$.

A continuación se procede a la identificación de las fibras. Para ello se utilizó el software de tratamiento de imágenes AVIZO. En primer lugar, se extraen aquellos vóxeles pertenecientes a las fibras, que son aquellos con un nivel de gris superior a un cierto umbral. En este trabajo, este umbral se fijó en 200. A continuación, se agregan todos los vóxeles que se encuentran en contacto, puesto que pertenecen a la misma fibra. De este modo, el programa aísla e identifica cada fibra.

A partir de estos datos, es posible calcular los parámetros geométricos básicos de cada fibra, como es su centro de gravedad o su orientación.

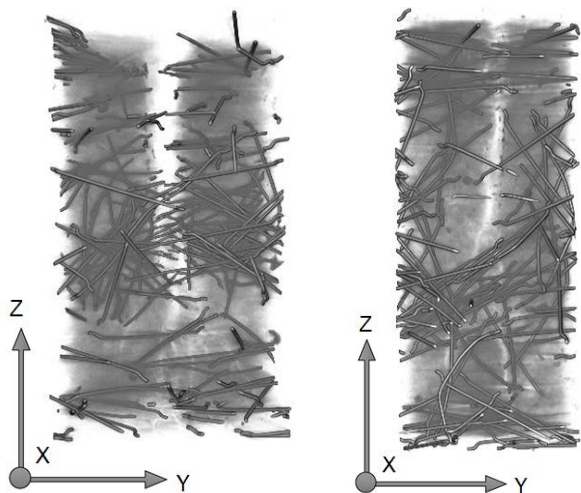


Figura 2. Vistas 3D de algunas muestras. A la izquierda, la serie A y a la derecha, la B.

En este caso, el ángulo que forma la fibra con el eje Y es el más interesante, pues es el eje perpendicular a la fisura (Figura 3).

Para poder comprender mejor la información obtenida del TC, los autores han desarrollado subrutinas propias que permiten agregar los datos, evaluar tendencias, etc.

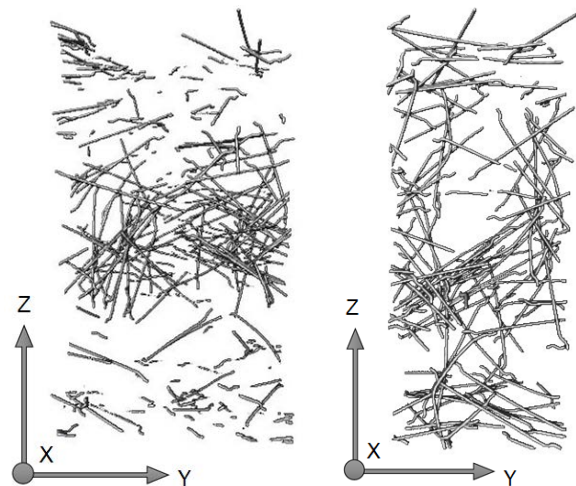


Figura 3. Vistas 3D de las fibras. A la izquierda, la serie A y a la derecha, la B.

3. Resultados experimentales

En este apartado se muestran tanto los resultados del TC como los de los ensayos mecánicos realizados, tanto estáticos como de fatiga.

3.1 Análisis de los resultados de TC

A partir de la información proporcionada por el equipo de TC, una vez postprocesada por los dos programas anteriormente descritos, es posible obtener más información de interés. A continuación se muestra el más interesante de todos ellos, como es la orientación de las fibras.

3.1.1. Orientación de las fibras

El software AVIZO anteriormente mencionada proporciona la orientación de la fibra en términos de los ángulos θ (teta) y φ (fi) (Figura 4).

A partir de ellos es posible obtener los ángulos en coordenadas cartesianas (eq. 1).

$$\begin{aligned} \alpha_x &= \text{acos}[\text{sen}(\theta) \cdot \text{cos}(\varphi)] \\ \alpha_y &= \text{acos}[\text{sen}(\theta) \cdot \text{sen}(\varphi)] \\ \alpha_z &= \theta \end{aligned} \quad (1)$$

En las figuras 5 a 7 se muestran los histogramas de distribución angular de las fibras, para ambas series

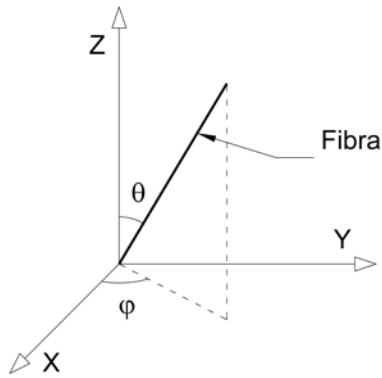


Figura 4. Identificación de los ángulos θ y φ

Se observa cómo, para ambas series, la orientación de las fibras es sensiblemente horizontal, es decir, perpendicular al eje Z. En relación a los ejes X e Y, para la serie A no se observa ninguna tendencia, es decir, se puede decir que muestran una distribución aleatoria en el plano horizontal. Para la serie B, parece que las fibras tienen una orientación ligeramente preferente respecto al eje Y, dado que la mayor parte de las fibras muestran un ángulo con el eje Y inferior a 45° .

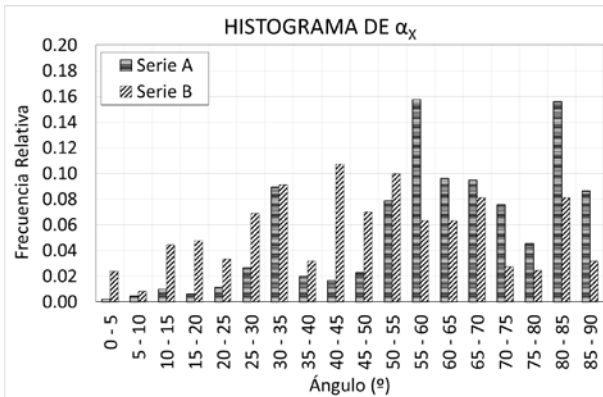


Figura 5. Histograma de distribución según el eje X.

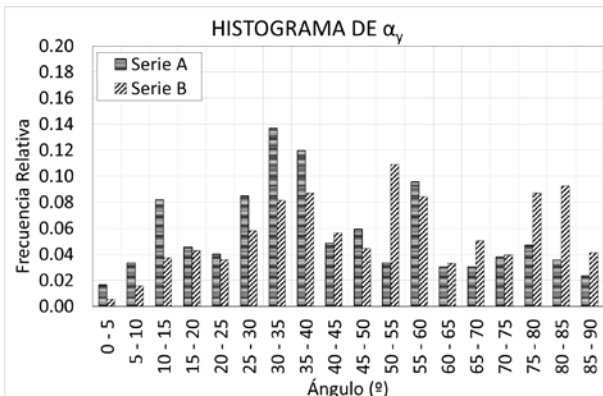


Figura 6. Histograma de distribución según el eje Y.

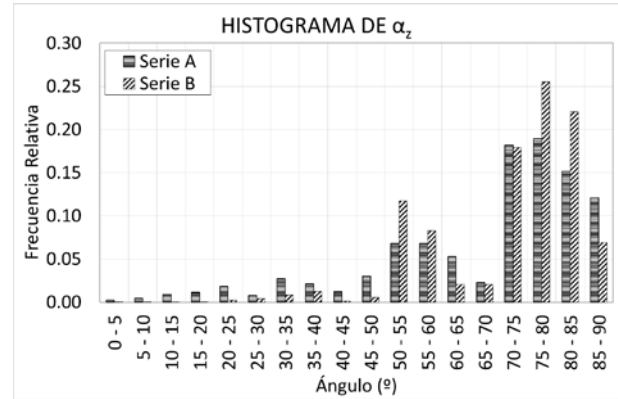


Figura 7. Histograma de distribución según el eje Z.

A continuación se define el índice de eficiencia (ie), de acuerdo con la siguiente expresión (eq. 2):

$$ie_j = \sum_{i=1}^n f_{j,i} \cdot \cos(\bar{\alpha}_{j,i}) \quad j := x, y, z \quad (2)$$

siendo $f_{j,i}$, las frecuencias relativas de cada histograma, y $\bar{\alpha}_{j,i}$, los valores angulares medios de cada barra del histograma. El índice de eficiencia puede variar entre 0 y 1. El valor de 0 significa que todas las fibras están orientadas perpendicularmente al eje de estudio, y 1 significa que todas las fibras están orientadas paralelamente al eje de estudio.

La Tabla 2 muestra los valores medios de índice de eficiencia de todas las series.

Tabla 2. Índice de eficiencia.

Series	ie_x	ie_y	ie_z
Seire A	0.44	0.70	0.35
Serie B	0.62	0.58	0.30

Tal y como se ha indicado anteriormente, el índice de eficiencia respecto al eje Y (ie_y) es el más interesante, en la medida en que el eje Y es el perpendicular a la fisura. En este caso se observa cómo la serie A muestra una mejor ie_y que la serie B, lo cual conduce a afirmar que la serie A muestra una mejor orientación de las fibras que la serie B.

3.2 Ensayos de fatiga

Un total de 12 probetas prismáticas de la serie A y 9 de la serie B fueron ensayadas a carga cíclica hasta rotura, al objeto de evaluar la vida a fatiga de ambas series. En este caso, no se practicó una entalla en las probetas, sino que previamente habían sido prefisuradas (fase 1 de protocolo de ensayo). Una fisura es más agresiva para la probeta que una entalla y la vida a fatiga se ve reducida [6].

En el caso de la serie A, la carga cíclica osciló entre el 65% y el 5% de la resistencia residual, obtenida durante la fase 1. En el caso de la serie B, la carga osciló entre el 60% y el 15% de su resistencia residual.

Los resultados son ajustados considerando una distribución de Weibull. En ambos casos, la vida a fatiga característica N_{cr} se define como el número de ciclos asociado a una probabilidad de fallo del 20% (Figura 8, Tabla 3).

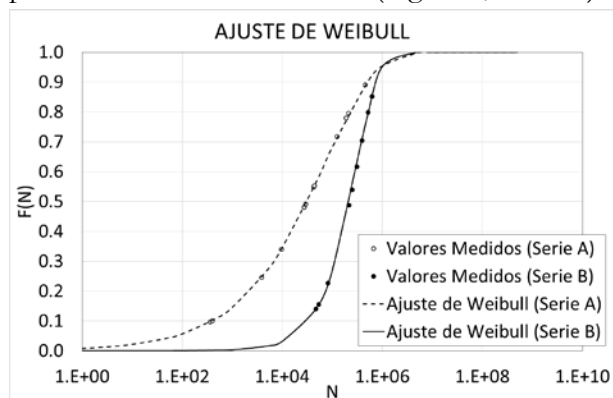


Figura 8. Ajuste de Weibull de la vida a fatiga para ambas series.

Tomando como base estos datos, es posible definir una curva S-N- P_f , que correlacione el nivel de tensión, el número de ciclos y la probabilidad de fallo. En este caso, se propone la siguiente expresión [31 a 34] (eq. 3).

$$S = 1 - \beta \cdot (1 - R) \cdot \log_{10} N \quad (3)$$

siendo S la tensión relativa máxima, R el cociente entre la tensión mínima y la máxima y β un coeficiente que depende de la probabilidad de fallo. La tabla 3 muestra los valores de vida a

fatiga característica N_{cr} y su coeficiente β asociado.

Tabla 3. Vida a fatiga y coeficiente β .

Series	N_{cr}	β
Serie A	2260	0.113
Serie B	71094	0.110

La tabla 3 muestra que β es prácticamente idéntica en ambos casos, lo que significa que ni el contenido de fibras ni su orientación tienen influencia en este parámetro; que solo depende de la matriz de hormigón. Este resultado concuerda con lo obtenido en otros trabajos de investigación [10, 16 y 17].

3.2 Ensayos estáticos posteriores a las cargas cíclicas

Tal y como se ha indicado anteriormente, algunos prismas fueron sometidos a cargas cíclicas hasta un determinado nivel de daño. De acuerdo con el criterio de Palmgren-Miner, el daño se define como el cociente entre el número de ciclos aplicado y el número de ciclos característico del fallo por fatiga (dato recogido en la tabla 3).

Para el caso de la serie A, se ensayaron 3 series de 7 probetas cada una a otros tantos niveles de daño, a saber, 0.20, 0.80 y 0.90 respectivamente. Además, otra serie de 7 probetas se mantuvo sin someter a cargas cíclicas (equivalente a considerar un nivel de daño de 0.00). Para el caso de la serie B, se ensayaron 3 series de 4 probetas cada una a otros tantos niveles de daño: 0.03, 0.28 y 2.81 respectivamente, y también se mantuvo otra serie de 4 probetas sin dañar.

Las figuras 9 a 12 muestran los valores de resistencia residual relativa a tracción ($f_{R,i,rel}$), para ambas series y para los diferentes valores de daño. Además, se incluyen las líneas de tendencia, para observar mejor la variación de la resistencia residual relativa a tracción con el daño.

En todos los casos, la resistencia residual relativa a tracción disminuye con el daño. Además, se observa que las líneas de tendencia de la serie A siempre se encuentran por debajo de las de la serie B y que aquéllas tienen una pendiente más pronunciada que éstas. Esto está directamente relacionado con el contenido de fibras, de tal modo que cuanto mayor es el contenido de fibras, mayor es la tensión residual relativa a tracción.

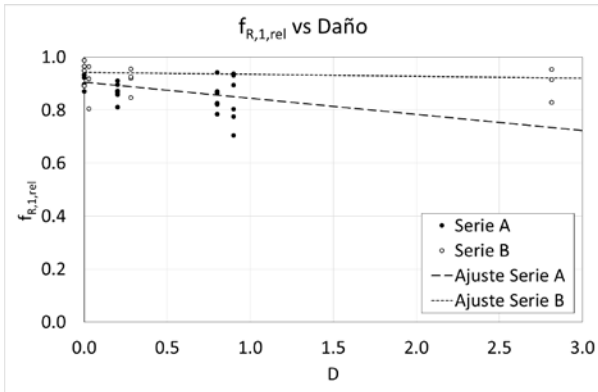


Figura 9. Variación de $f_{R,1,rel}$ con el nivel de daño, para ambas series.

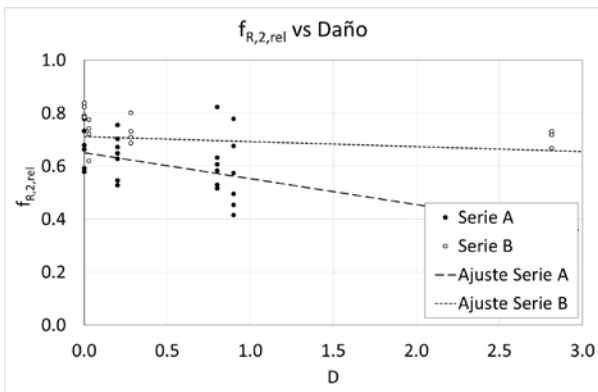


Figura 10. Variación de $f_{R,2,rel}$ con el nivel de daño, para ambas series.

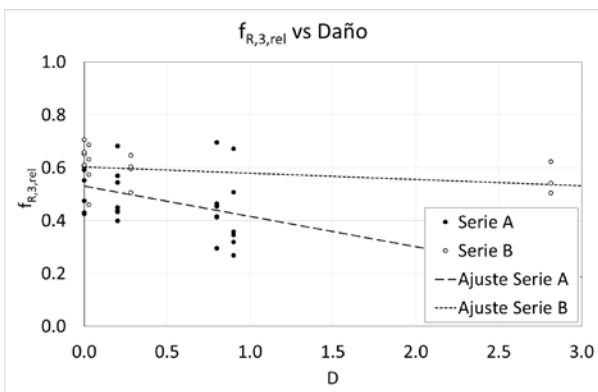


Figura 11. Variación de $f_{R,3,rel}$ con el nivel de daño, para ambas series.

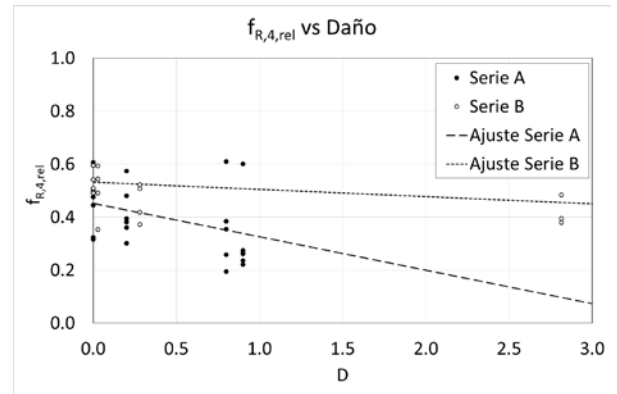


Figura 12. Variación de $f_{R,4,rel}$ con el nivel de daño, para ambas series.

Por otra parte se puede correlacionar la resistencia residual relativa con el ancho de fisura (w) para los diferentes niveles de daño. Las figuras 13 y 14 muestran esta relación.

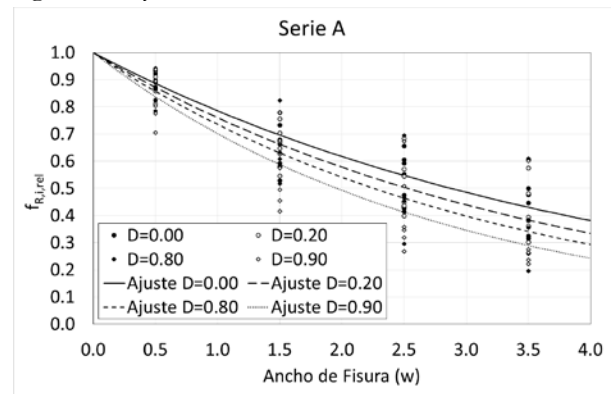


Figura 13. Correlación entre la resistencia residual relativa a tracción y el ancho de fisura en función del daño, para la serie A.

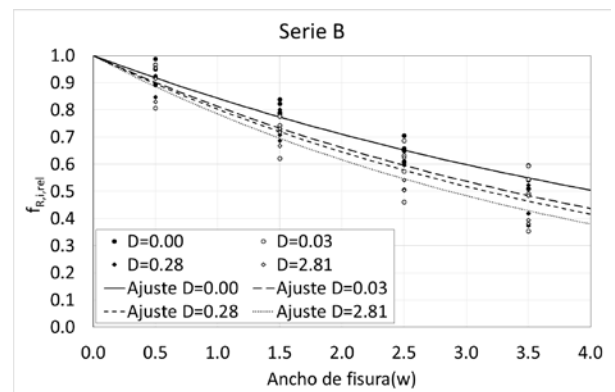


Figura 14. Correlación entre la resistencia residual relativa a tracción y el ancho de fisura en función del daño, para la serie B.

Para ambas series, la resistencia residual relativa a tracción decrece con el ancho de fisura y también con el nivel de daño. Si se comparan ambas series se observa cómo la serie A muestra

un decrecimiento menos acusado que la serie B, lo cual está directamente relacionado con el contenido de fibras.

Se propone un ajuste exponencial entre la resistencia residual relativa a tracción y el ancho de fisura, del siguiente modo (eq. 4).

$$f_{R,i,rel} = \exp\{-a_D \cdot w\} \quad i := 1 \text{ to } 4 \quad (4)$$

siendo a_D el coeficiente de ajuste. La tabla 4 muestra los valores de a_D para las diferentes series en función del nivel de daño, así como los coeficientes de correlación R^2 .

Tabla 4. Valores de a_D y R^2 para los diferentes niveles de daño y ambas series.

Serie A			Serie B		
D	a_D	R^2	D	a_D	R^2
0.00	0.241	0.940	0.00	0.171	0.990
0.20	0.274	0.945	0.03	0.207	0.994
0.80	0.307	0.954	0.28	0.219	0.971
0.90	0.354	0.965	2.81	0.242	0.997

La tabla 4 muestra cómo la serie A presenta valores de a_D más altos que los de la serie B para todos los niveles de daño. Además, los valores de a_D crecen más rápidamente en la serie A que en la serie B. Este parámetro está influenciado por la orientación de las fibras.

A continuación se propone una curva de ajuste del parámetro a_D que sea físicamente coherente. En este sentido, el a_D debe tender a infinito cuando el contenido en fibras sea del 0% (hormigón en masa) o su orientación sea paralela al plano de la fisura ($i e_y = 0$) (eq. 5).

$$a_D = \frac{\lambda_1}{i e_y} \cdot \left(\frac{1-f}{f}\right)^{0.7} \cdot \exp\left\{\lambda_2 \cdot \left(\frac{1-f}{f}\right)^{2.1} \cdot D\right\} \quad (5)$$

siendo f el contenido en fibras (en tanto por uno) y λ_1 y λ_2 dos coeficientes de ajuste. Esta expresión es compatible con los criterios anteriormente descritos. Para este caso particular el mejor ajuste se consigue para $\lambda_1 = 6.90 \cdot 10^{-3}$ y $\lambda_2 = 2.27 \cdot 10^{-5}$.

4. Conclusiones

Este trabajo muestra la evolución de la resistencia residual a tracción de dos hormigones de alta resistencia, con diferentes contenidos de fibra, en función del daño y su correlación con la cuantía y orientación de las fibras, utilizando para ello un equipo de tomografía computerizada.

Mediante el uso de TC y de diverso software de postprocesado de datos es posible identificar la posición y la orientación de todas las fibras. Esta información sirve de base para correlacionar la microestructura del hormigón con la respuesta macroscópica.

Los resultados muestran cómo la presencia previa de un daño en la probeta, provocado por la aplicación de un determinado número de ciclos de carga cíclica tiene un impacto en la resistencia residual a tracción, de tal forma que cuanto mayor es el daño, menor es la resistencia residual a tracción. Se trata de una conclusión interesante, con una aplicación clara en el diseño. Aquellas estructuras de HRF que estén sometidas a cargas cíclicas, éstas van reduciendo, progresivamente, la resistencia residual a tracción y, en consecuencia, el esfuerzo último resistido.

El contenido de fibras tiene un efecto beneficioso sobre la resistencia residual a tracción, de tal modo que cuanto mayor es el contenido de fibras, menor es la pérdida de la resistencia residual a tracción con el daño.

Por su parte, la orientación de las fibras también tiene un impacto positivo en la respuesta post-pico de los HRF. Se observa como una mejor orientación de las fibras colabora en una menor pérdida de resistencia residual a tracción.

El trabajo propone una formulación empírica para la estimación de la resistencia residual relativa a tracción, en función del nivel de daño y de la cuantía y orientación de las fibras.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al Ministerio de Economía y Competitividad (BIA2015-68678-C2-R) por la financiación de este trabajo.

Referencias

- [1] Zia, A.; Ali, M. “Behavior of fiber reinforced concrete for controlling the rate of cracking in canal-lining. *Construction and Building Materials*, v 155, (2017), pp. 726-739.
- [2] Mazzoli, A.; Monosi, S.; Plescia, E.S. “Evaluation of the early-age-shrinkage of Fiber Reinforced Concrete (FRC) using image analysis methods”. *Construction and Building Materials*, v 101, (2015), pp: 596-601.
- [3] Ferrara, L.; Park, Y-D.; Shah, S.P. “A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete”. *Cement and Concrete Research*, v 37, (2007), pp. 957-971.
- [4] Gonzalez, D.C.; Moradillo, R.; Mínguez, J.; Martínez, J.A.; Vicente, M.A. “Postcracking residual strengths of fiber-reinforced high-performance concrete after cyclic loading”. *Structural Concrete*, v 19(2), (2018), pp. 340-351.
- [5] Parvez, A.; Foster, S.J. “Fatigue Behavior of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Beams”. *Journal of Structural Engineering*, v 141(4), (2015), 04014117: 1 to 8.
- [6] González, D.C.; Vicente, M.A.; Ahmad, S. “Effect of cyclic loading on the residual tensile strength of steel fiber-reinforced high-strength concrete”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v 27(9), (2015), 04014241: 1 to 8.
- [7] Zhang, J.; Stang, H.; Li, V.C. “Fatigue life prediction of fiber reinforced concrete under flexural load”. *International Journal of Fatigue*, v 21, (1999), pp. 1033-1049.
- [8] Mínguez, J.; González, D.C.; Vicente, M.A. “Fiber geometrical parameters of fiber-reinforced high strength concrete and their influence on the residual post-peak flexural tensile strength”. *Construction and Building Materials*, v 168, (2018), pp. 906-922.
- [9] Bischoff, P.H. “Tension stiffening and cracking of steel fiber-reinforced concrete”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v 15(2), (2003), pp. 174-182.
- [10] Goel, S.; Singh, S.P.; Singh, P. “Flexural fatigue strength and failure probability of Self Compacting Fibre Reinforced Concrete beams”. *Engineering Structures*, v 40, (2012), pp. 131-140.
- [11] Singh, S.P.; Sharma, U.K. “Flexural fatigue strength of steel fibrous concrete beams”. *Advances in Structural Engineering*, v 40(2), (2007), pp. 197-207.
- [12] Singh, S.P., Mohammadi, Y.; Kaushik, S.K. “Flexural fatigue analysis of steel fibrous concrete containing mixed fibers”. *ACI Materials Journal*, v 102(6), (2005), pp. 438-444.
- [13] Bajaj, V.; Singh, S.P.; Singh, A.P. et al. “Flexural fatigue analysis of hybrid fibre-reinforced concrete”. *Magazine of Concrete Research*, v 64(4), (2012), pp. 361-373.
- [14] Mohammadi, Y.; Kaushik, S.K. “Flexural fatigue-life distributions of plain and fibrous concrete at various stress levels”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v 17(6), (2005), pp. 650-658.
- [15] Singh, S.P.; Kaushik, S.K. “Flexural fatigue analysis of steel fiber-reinforced concrete”. *ACI Materials Journal*, v 98(4), (2001), pp 306-312.
- [16] Banjara, N.K.; Ramanjaneyulu, K. “Experimental Investigations and Numerical Simulations on the Flexural Fatigue Behavior of Plain and Fiber-Reinforced Concrete”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30(8), (2018), 04018151, 1 to 15.
- [17] Johnston, C.D.; Zemp, R.W. “Flexural Fatigue Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete – Influence of Fiber Content, Aspect Ratio and Type”. *ACI*

- Materials Journal, n° 88-M44, (1991), pp. 374-383.
- [18] Bernardo, H.; Vicente, M.A.; González, D.C.; Martínez, J.F. “Efecto de las cargas cíclicas sobre la adherencia hormigón-acero en hormigones sumergidos”. *Hormigón y Acero*, v 66(276), (2015), pp. 225-236.
- [19] Vicente, M.A.; González, D.C.; Mínguez, J.; Martínez, J.A. “Residual modulus of elasticity and maximum compressive strain in HSC and FRHSC after high-stress-level cyclic loading”. *Structural Concrete*, v. 15(2), (2014), pp. 210-218.
- [20] Bernardo, H.; Vicente, M.A.; González, D.C.; Martínez, J.F. “Cyclic bond testing of steel bars in high-performance underwater concrete”. *Structural Engineering International*, v 24(1), (2014), pp. 37-44.
- [21] Vicente, M.A.; González, D.C.; Martínez, J.A. "Mechanical Response of Partially Prestressed Precast Concrete I-Beams after High-Range Cyclic Loading." *Pract. Period. Struct. Des. Constr.*, 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000225, (2014), 04014022.
- [22] Zanuy, C.; Albajar, L.; De la Fuente P. “The fatigue process of concrete and its structural influence," *Materiales de Construcción*, v 61(303), (2011), pp. 385-399.
- [23] Vicente, M.A.; Ruiz, G.; González, D.C.; Mínguez, J.; Tarifa, M.; Zhang, X. “CT-Scan study of crack patterns of fiber-reinforced concrete loaded monotonically and under low-cycle fatigue”. *International Journal of Fatigue*, v. 114, (2018), pp. 138-147.
- [24] Balazs, G.L.; Czoboly, O.; Lubloy, E.; Kapitany, K.; Barsi, A. “Observation of steel fibers in concrete with computed tomography”. *Construction and Building Materials*, v. 140, (2017), pp. 534-541.
- [25] Pastorelli, E.; Herrmann, H. “Time-efficient automated analysis for fibre orientations in steel fibre reinforced concrete”. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, v 65 (1), (2016), pp. 28-36.
- [26] Herrmann, H.; Pastorelli, E.; Kallonen, A.; Suuronen, J.P. “Methods for fibre orientation analysis of X-ray tomography images of steel fibre reinforced concrete (SFRC)”. *Journal of Materials Science*, v 51(8), (2016), pp. 3772-3783.
- [27] Ponikiewski, T.; Katzer, J. “X-ray computed tomography of fibre reinforced self-compacting concrete as a tool of assessing its flexural behaviour”. *Materials and Structures*, v. 49, (2016), pp. 2131-2140.
- [28] Ponikiewski, T.; Katzer, J.; Bugdol, M.; Rudzki, M. “Determination of 3D porosity in steel fibre reinforced SCC beams using X-ray computed tomography”. *Construction and Building Materials*, v 68, (2014), pp. 333-340.
- [29] Vicente, M.A.; González, D.C.; Mínguez, J. “Determination of dominant fibre orientations in fibre-reinforced high strength concrete elements based on computed tomography scans”. *Nondestructive Testing and Evaluation*, v 29(2), (2014), pp. 164–182.
- [30] Vicente, M.A.; Mínguez, J.; González, D.C. “The use of computed tomography to explore the microstructure of materials in civil engineering: from rocks to concrete”. (2017). In: Halefoglu Ahmet Mesrur, editor. *Computed tomography - advanced applications*. InTech.
- [31] Aas-Jakobsen, K. “Fatigue of concrete beams and columns.” *Institutt for betonkonstruksjoner, NTH Trondheim, Trondheim, Norway*, 148, (1970).
- [32] Hsu, T.T.C. “Fatigue of plain concrete.” *ACI Journal of Materials*, v. 78, (1981), pp. 292–305.
- [33] Tepfers, R. “Tensile fatigue strength of plain concrete.” *ACI Journal*, v. 76, (1979), pp. 919–933.
- [34] Oh, B.H. “Fatigue analysis of plain concrete in flexure”. *Journal of Structural Engineering*, v. 112:2, (1986), pp. 306–312.