

Impacto de la disposición de las fibras en el comportamiento a fatiga por flexión del hormigón reforzado con fibras de altas prestaciones

Impact of fiber arrangement on the flexural fatigue behavior of high-performance fiber-reinforced concrete

Álvaro Mena Alonso^a, Miguel A. Vicente Cabrera^b, Jesús Mínguez Algarra^c y Dorys C. González Cabrera^d

^a PhD Civil Engineer. University of Burgos. Research Associate. amena@ubu.es

^b PhD Civil Engineer. University of Burgos. Associate Professor. mvicente@ubu.es

^c PhD Civil Engineer. University of Burgos. Associate Professor. jminguez@ubu.es

^d PhD Civil Engineer. University of Burgos. Professor. dgonzalez@ubu.es

RESUMEN

En este trabajo se estudia el impacto del tamaño de elemento y contenido de fibras en la respuesta a fatiga por flexión del hormigón reforzado con fibras. El objetivo principal es establecer correlaciones entre la respuesta a fatiga y la distribución de las fibras. Los resultados revelan que el parámetro que más afecta a la resistencia a fatiga es la orientación de las fibras con respecto al eje longitudinal. En concreto, el factor de orientación η_x estima con precisión, tanto la vida a fatiga característica, como la velocidad de apertura de la entalla (dCMOD/dn). Se concluye que una disposición de fibras más perpendicular al plano teórico de fallo ralentiza el daño por fatiga.

ABSTRACT

In this work, the impact of element size and fiber content on the flexural fatigue response of fiber-reinforced concrete is studied. The main objective is to establish correlations between fatigue response and fiber distribution. The results reveal that the parameter that most affects fatigue strength is the fiber orientation with respect to the longitudinal axis. Specifically, the orientation factor η_x accurately estimates both the characteristic fatigue life and the crack opening rate (dCMOD/dn). It is concluded that a fiber arrangement more perpendicular to the theoretical failure plane slows down fatigue damage.

PALABRAS CLAVE: hormigón reforzado con fibras, fatiga, flexión, orientación de fibras, micro-CT.

KEYWORDS: fiber-reinforced concrete, fatigue, bending, fiber orientation, micro-CT.

1. Introducción

La fatiga en hormigón reforzado con fibras (FRC) suscita un importante interés científico en la actualidad. Esto viene motivado por varios aspectos. Uno de ellos es el desarrollo tecnológico del material. En la actualidad, los

novedosos hormigones reforzados con fibras de ultra-altas prestaciones (UHPFRC) pueden alcanzar resistencias a primera fisura superiores a 20 MPa [1]. Otra razón es que, debido al empleo de hormigones cada vez más resistentes,

las estructuras son más ligeras y por ello más susceptibles a las acciones variables de naturaleza cíclica. En consecuencia, la optimización del diseño en fatiga es una prioridad de la ingeniería estructural.

Existen diversos factores que afectan al comportamiento en fatiga del hormigón. Uno de los más importantes en relación con el diseño estructural es el tamaño de elemento. Se observa que la resistencia a fatiga en probetas homotéticas disminuye a medida que aumenta su tamaño, lo que se conoce como efecto tamaño [2,3]. Este fenómeno afecta a la respuesta mecánica del hormigón en general. En fatiga de hormigón reforzado con fibras, algunos autores han observado diferencias de la vida a fatiga de más de 10 veces entre probetas con una relación de volumen 1:8 [4]. Desde el punto de vista de la mecánica de fractura, esto se explica porque el tamaño de la zona de proceso de fractura (FPZ) no depende del tamaño del elemento. Por ello, es proporcionalmente mayor en las probetas pequeñas, que tienen un comportamiento más dúctil y menos sensible a las variaciones de tamaño [4,5].

Además, el contenido de fibras afecta a la respuesta en fatiga. Mientras que la resistencia estática a flexión aumenta linealmente con el contenido de fibras, en fatiga no ocurre lo mismo. Algunas investigaciones concluyen que un incremento del volumen de fibras mejora la vida a fatiga, pero hasta un cierto límite [6,7].

Las variaciones del comportamiento en fatiga del FRC en función del tamaño de elemento y contenido de fibras pueden deberse a diferencias en la mesoestructura del material. En FRC sometido a flexión, es probable que el componente que tenga una mayor influencia en el desarrollo del daño por fatiga sean las fibras. Cuando la matriz de hormigón se fractura, el mecanismo resistente que interviene son las fuerzas de adherencia entre las fibras y la matriz [8]. La distribución de las fibras determina la magnitud de dichas fuerzas y por tanto afecta al número de ciclos de fatiga que la probeta puede

soportar. No obstante, los trabajos que estudian la influencia de la distribución de las fibras en la respuesta a fatiga del hormigón son escasos [9,10].

Existen diferentes métodos para determinar la orientación y distribución de fibras a una muestra de FRC, como el análisis de imágenes de cortes transversales o el método inductivo. Sin embargo, en la actualidad la técnica más robusta es la microtomografía computarizada (micro-CT). Esta tecnología se fundamenta en la atenuación que experimentan los rayos X al atravesar la materia, que depende de su densidad. El resultado del escaneo de una probeta es un tomograma: un conjunto de imágenes en escala de grises que contiene las secciones transversales de la muestra a cada cota, y donde el nivel de gris de cada píxel se corresponde con su densidad relativa.

El potencial de la micro-CT reside en el postprocesado de los tomogramas. Aplicando técnicas de segmentación, se pueden aislar los diferentes componentes de la mesoestructura del hormigón (fibras, áridos, poros), obteniendo sus propiedades individuales (posición, volumen, superficie, orientaciones, etc.). Existe una amplia bibliografía de artículos que utilizan la micro-CT para estudiar la disposición de fibras en FRC, así como analizar poros y patrones de fisura [11–13].

El objetivo de este trabajo es estudiar la respuesta a fatiga por flexión del FRC, considerando diferentes tamaños de probeta (prismáticas de 75×75×300 mm y 150×150×600 mm) y volúmenes de fibras (0.3%, 0.6% y 1%). En particular, se establecen correlaciones entre la disposición de las fibras, obtenida mediante micro-CT, y la resistencia a fatiga.

2. Metodología experimental

2.1 Materiales y muestras

En esta investigación se han fabricado 3 tipos de hormigón reforzado con fibras. La Tabla 1

contiene las dosificaciones. Se observa que las cantidades de los componentes son iguales, salvo por el volumen de fibras, que es del 0.3%, 0.6% y 1% para los FRC denominados A1, A2 y A3, respectivamente. Las fibras que se han utilizado son de acero con extremos conformados en gancho, de 30 mm de longitud y 0.38 mm de diámetro. En concreto, el modelo empleado es Dramix RC-80/30-CP, producidas por Bekaert (Zwevegem, Bélgica).

Tabla 1. Dosificaciones de los hormigones (en kg/m³).

Componente	A1	A2	A3
Cemento CEM I 52.5 R	400.0		
Árido grueso síliceo	538.2		
Árido fino síliceo	847.1		
Filler calizo	448.8		
Agua	160.0		
Superplastificante	16.0		
Nanosílice	20.0		
Fibras de acero	23.6	47.1	78.5

Los tres hormigones fabricados son autocompactantes, con diámetros finales de escurrimiento de entre 77 cm (tipo A1) y 65 cm (tipo A3). Los ensayos de resistencia a compresión y de módulo de elasticidad revelan que la influencia del contenido de fibras es estadísticamente despreciable. El valor medio de f_c es 106.8 (± 2.1) MPa, mientras que el valor medio de E_c es 45.1 (± 1.5) GPa.

Para cada tipo de FRC, se han fabricado 16 probetas prismáticas de 75×75×300 mm (tamaño S) y 16 de 150×150×600 mm (tamaño L). Los tamaños son homotéticos, con un factor de escala en volumen de 1:8. En todas las probetas se ha practicado una entalla central con profundidad de $h/6$, siendo h el canto. Las probetas se han almacenado en una cámara de curado a 20 °C y 95% de humedad durante un año.

Por tanto, la campaña experimental consta en total de 6 series de probetas, combinando 3 tipos de FRC y 2 tamaños. Las series se

denominan A1-S, A2-S, A3-S, A1-L, A2-L y A3-L.



(a)



(b)

Figura 1. Ensayo de resistencia estática a flexión: (a) probeta de tamaño L, (b) probeta de tamaño S.

2.2 Resistencia estática a flexión

Antes de los ensayos de fatiga, 3 probetas de cada serie se han ensayado a flexión en tres puntos según EN 14651 [14] (Figura 1). La Tabla 2 contiene los valores promedio de la tensión en el límite de proporcionalidad (f_{LOP}), que es una aproximación de la resistencia a primera fisura, y de la tensión última a flexión (σ_{ult}), que es la mayor tensión alcanzada a lo largo de todo el ensayo, incluyendo la fase post-fisuración.

Se observa que en todas las series se cumple que $\sigma_{ult} > f_{LOP}$, lo que indica que se produce endurecimiento por deformación. Es decir, cuando la matriz de hormigón rompe por tensiones de tracción excesivas, el mecanismo de adherencia fibras-matriz es capaz de soportar más tensión. Por otro lado, se aprecia que, a medida que aumenta el volumen de fibras,

también lo hace σ_{ult} , y en menor medida f_{LOP} . Finalmente, la resistencia a flexión es mayor en las probetas pequeñas que en las grandes, lo que demuestra un claro efecto tamaño.

Tabla 2. Resistencia estática a flexión. Niveles de tensión en ensayos de fatiga por flexión.

Serie	f_{LOP}	σ_{ult}	$\sigma_{fat,max}$	$\sigma_{fat,min}$
A1-S	7.36	8.78	7.02	1.40
A1-L	5.22	5.93	4.74	0.95
A2-S	8.35	11.78	9.42	1.88
A2-L	6.67	11.37	9.10	1.82
A3-S	10.45	19.65	15.72	3.14
A3-L	7.74	16.41	13.13	2.63

2.3 Ensayos de fatiga

Las probetas prismáticas de todas las series se sometieron a ensayos de fatiga por flexión con la misma configuración que la de los ensayos estáticos (Figura 1). Los ensayos consistieron en aplicar ciclos entre niveles de tensión constantes hasta el fallo de la probeta. En cada serie, los niveles de tensión se mantuvieron constantes, oscilando entre el 16% y el 80% de la resistencia última a flexión. Por tanto, en todas las series los ratios $\sigma_{fat,max}/\sigma_{ult}$ y $\sigma_{fat,min}/\sigma_{ult}$ se permanecieron constantes. La Tabla 2 contiene los valores de los niveles de tensión.

La frecuencia de los ciclos de fatiga se fijó en 5 Hz. Se ensayaron 12 probetas por serie, haciendo un total de 72 ensayos de fatiga. Los parámetros que se registraron fueron la carga, el desplazamiento relativo, el CMOD o apertura de la entalla y el número de ciclos.

2.4 Estudio de la distribución de fibras

Para conocer la distribución de las fibras, las probetas se analizaron con microtomografía computarizada. Se utilizó un equipo de micro-CT CoreTOM, fabricado por Tescan (Brno, República Checa), perteneciente al Centro

Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana, ubicado en Burgos (España).

Todas las probetas de tamaño S se escanearon antes de los ensayos. En cuanto a las probetas L, su tamaño era excesivo como para obtener tomogramas con suficiente calidad. Por este motivo, después de los ensayos, se cortaron subprismas de 75×75×150 mm, extraídos tan cerca como fue posible de la zona central de las probetas L, pero fuera de la región dañada. Estos subprismas se obtuvieron de 12 probetas de tamaño L (4 de las series A1-L, A2-L y A3-L, respectivamente). La resolución alcanzada fue de 65 μm .

Después de los escaneos, las imágenes de micro-CT se postprocesaron utilizando el software de análisis de imagen Dragonfly, de ORS (Montréal, Canadá). Aplicando técnicas de segmentación avanzadas basadas en redes neuronales convolucionales (CNN), se aislaron y obtuvieron las propiedades de las fibras de todas las muestras escaneadas (Figura 2).

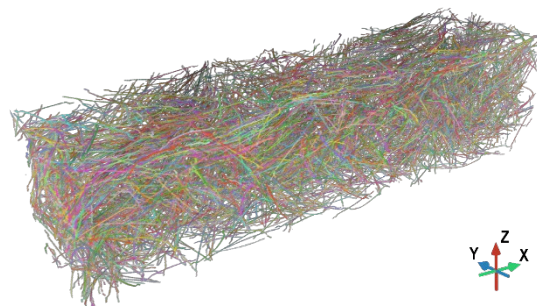


Figura 2. Identificación de fibras en una probeta de la serie A3-S.

3. Resultados y análisis

3.1 Distribución de fibras

En primer lugar, se compara la distribución de fibras en las diferentes series. Cabe mencionar que en este trabajo solo se han considerado las fibras de la región central de las probetas, ya que el fallo por flexión está localizado en el entorno de la entalla. En concreto, en los subprismas L se ha analizado todo el volumen, mientras que en los prismas S se han estudiado las fibras

ubicadas solamente en los 75 mm centrales en dirección longitudinal.

Se han estudiado dos tipos de parámetros: relacionados con el volumen de fibras y relacionados con la orientación.

Los parámetros del volumen de fibras que se han determinado son el volumen de fibras relativo (V_{fib}) y el índice de volumen (v_i). El primero se calcula como el cociente entre el volumen de fibras y el volumen de probeta considerado. Si se tiene en cuenta la probeta completa, es esperable que V_{fib} coincida con el volumen de fibras teórico (0.3%, 0.6% o 1%, según la serie). En cambio, al considerar solo la parte central de las probetas, V_{fib} podría variar, indicando heterogeneidades en la distribución. En cuanto al índice de volumen, se calcula como el ratio entre el volumen de fibras relativo y el volumen de fibras teórico. La Tabla 3 recoge los valores medios por serie.

Tabla 3. Valores promedio del volumen de fibras relativo y el índice de volumen.

Serie	V_{fib} (%)	v_i
A1-S	0.26	0.88
A1-L	0.30	1.00
A2-S	0.65	1.08
A2-L	0.51	0.85
A3-S	1.36	1.36
A3-L	0.78	0.78

La Tabla 3 revela que el volumen de fibras en la parte central es mayor en las probetas pequeñas que en las grandes. Esto se explica por el efecto pared, que es más agresivo en las probetas pequeñas (mayor ratio longitud de fibra/dimensión mínima de molde). Las paredes laterales actúan como barrera e inducen a las fibras a posicionarse preferentemente en el centro. Esto se aprecia en las series de FRC de los tipos A2 y A3, donde el volumen de fibras en las probetas S está por encima del teórico ($v_i > 1$), mientras que en las probetas L ocurre lo contrario. Además, se observa que, cuanto mayor es el contenido teórico de fibras, mayor

es la diferencia de volumen de fibras entre las probetas pequeñas y grandes.

Por otro lado, los parámetros relacionados con la orientación de las fibras que se han calculado en cada probeta son el ángulo medio y el factor de orientación. Este último se define como la proyección media de los vectores unitarios de las fibras en una cierta dirección (Ec. (1)) [15]:

$$\eta_{\theta} = \frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} \cos \alpha_{\theta}^i \quad (1)$$

donde N_f es el número de fibras en el volumen de probeta considerado, α_{θ}^i es el ángulo entre la fibra i y el eje θ , y θ es el eje de coordenadas (X, Y o Z). Por tanto, η_{θ} toma valores entre 0 y 1, donde 1 indicaría que todas las fibras son paralelas al eje θ , y viceversa.

La Tabla 4 contiene los valores promedio del índice de orientación y el ángulo medio según los tres ejes de coordenadas. El eje X indica la dirección longitudinal, el eje Y la transversal y el eje Z la vertical (Figura 2).

Tabla 4. Valores promedio del ángulo medio de fibras y del índice de orientación, según los tres ejes de coordenadas.

Serie	$\alpha_{m,X}$	η_X	$\alpha_{m,Y}$	η_Y	$\alpha_{m,Z}$	η_Z
A1-S	37	0.74	71	0.31	66	0.38
A1-L	48	0.62	62	0.44	63	0.42
A2-S	32	0.79	75	0.25	68	0.35
A2-L	44	0.67	69	0.35	60	0.47
A3-S	34	0.77	74	0.27	66	0.37
A3-L	44	0.66	69	0.34	59	0.47

En la Tabla 4 se observa que en todas las series η_X es mayor que η_Y y η_Z , indicando que las fibras están preferentemente alineadas en dirección longitudinal. Además, mientras que en las probetas pequeñas η_X oscila entre 0.74 y 0.79, en las probetas grandes lo hace entre 0.62 y 0.66. Por ello, se concluye que el alineamiento con el eje X es mayor en las probetas S, lo que se explica por un efecto pared más pronunciado [16].

Finalmente, se aprecia que, dentro de cada tamaño de probeta, las series con el menor contenido de fibras (A1-S y A1-L) presentan el menor η_x , permaneciendo su valor casi constante para las series con 0.6% y 1% de fibras. Esto apunta a que el aumento de la cantidad de fibras mejora la orientación de las mismas, posiblemente debido a una cierta interacción entre ellas. No obstante, este efecto se contrarresta con la reducción de fluidez, estabilizándose con una dosificación de en torno al 0.6%.

3.2 Relación entre la distribución de fibras y la resistencia estática a flexión

Como se menciona en el apartado 2.2, el comportamiento en flexión estática de todas las series es de endurecimiento por deformación. Esto significa que las fuerzas de adherencia entre las fibras y la matriz determinan la resistencia a flexión del FRC. Como la magnitud de dichas fuerzas depende de la distribución de las fibras, es esperable que exista cierta correlación entre algunos parámetros de la distribución de fibras y la resistencia a flexión.

En la Figura 3 se representan las regresiones lineales de V_{fib} con σ_{ult} y f_{LOP} , respectivamente. Se han considerado los valores promedio de cada serie.

La Figura 3a muestra que, a medida que aumenta el volumen de fibras relativo en la zona central de las probetas, también lo hace la resistencia última a flexión. La correlación es muy buena, con un R^2 de 0.89. Esto demuestra que el parámetro V_{fib} explica el aumento de σ_{ult} con la dosificación teórica de fibras y, lo que es más sorprendente, el aumento de σ_{ult} con la disminución del tamaño de elemento. En otras palabras, el hecho de que la tensión última a flexión sea mayor en las probetas S se debe en buena medida a que en ellas hay más fibras en la zona central, aunque el contenido teórico sea el mismo.

Por otro lado, en la Figura 3b se observa que la correlación entre V_{fib} y f_{LOP} es buena. Sin

embargo, se aprecia que V_{fib} es un mejor parámetro predictor de σ_{ult} que de f_{LOP} . Esto tiene sentido, ya que la tensión en el LOP depende no solo de las fuerzas de adherencia de las fibras, sino también de la resistencia de la propia matriz.

Finalmente, cabe mencionar que los parámetros de orientación de las fibras no presentan una buena correlación con la resistencia a flexión. En concreto, el factor de orientación en el eje longitudinal η_x no estima con precisión σ_{ult} . En consecuencia, se concluye que el parámetro de las fibras que más afecta a la resistencia a flexión es el volumen de fibras en la parte central, teniendo la orientación un papel secundario.

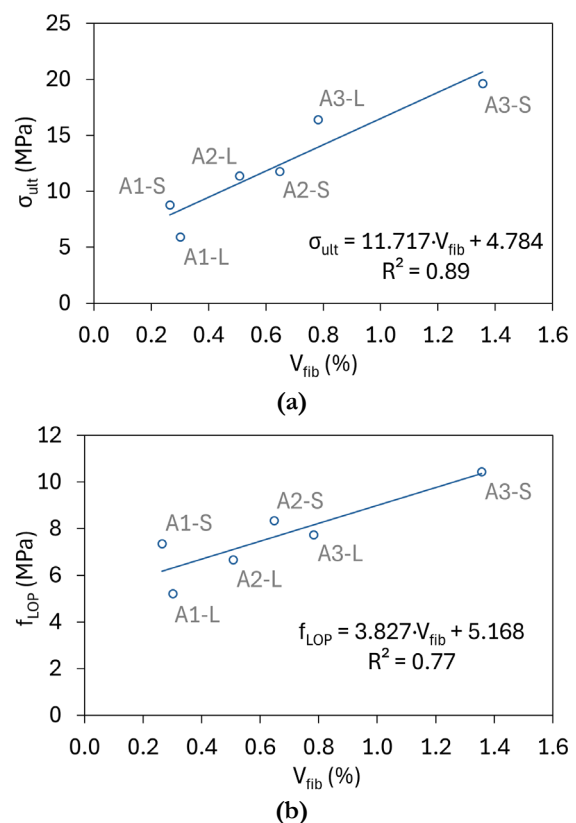


Figura 3. Regresión lineal del volumen de fibras relativo con la resistencia última a flexión (a) y la tensión en el LOP (b).

3.3 Respuesta a fatiga por flexión

En este apartado se presentan los resultados de los ensayos de fatiga. La Tabla 5 contiene el número de ciclos hasta el fallo de todas las probetas. Cabe mencionar que en algunos

ensayos de las series A1-S, A1-L y A2-S se ha observado una fase inicial de fatiga, de extensión variable, en la que la matriz de hormigón no había roto y por tanto no se había generado una macrofisura a partir de la entalla. Los ciclos asociados a esta fase se han descartado, ya que se asume que la intervención de las fibras en este periodo es mínima.

La Tabla 5 revela que en todas las series hay una gran variabilidad de la vida a fatiga, alcanzando los dos órdenes de magnitud. Para facilitar la interpretación de los resultados, éstos se pueden ajustar a la función de distribución de Weibull de dos parámetros. Este modelo de probabilidad se adapta bien a la distribución estadística de N en fatiga de hormigón [17]. Dicha función se expresa como (Ec. (2)):

$$F(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^{\beta}\right\} \quad (2)$$

donde x es $\log N$, λ es el parámetro de escala y β es el parámetro de forma. El primero está relacionado con la vida a fatiga característica (a mayor λ , mayor N), mientras que el segundo está relacionado con la dispersión (a mayor β , menor variabilidad de N).

Tabla 5. Vidas a fatiga en los 12 ensayos de cada serie.

A1-S	A1-L	A2-S	A2-L	A3-S	A3-L
5,775	2,325	3,463	25,926	18,889	15
2,914	703	9,812	37	918	23,308
3,665	1,570	40,808	-	30	13
43	17	19,344	3,476	3,176	3,335
694	21,892	22,428	2,004	12,888	15
2,742	1,117	0*	6,597	7,195	5,747
7,108	52	26,252	32	15,225	9,604
3,629	126	20,746	8,851	12	3,498
1,495	4	5,156	46	31	5,634
4,329	13	5,068	84	3,090	102
1,710	18,876	14,233	2,415	3,743	1,618
48	42,491	5,024	4,264	2,219	12,964

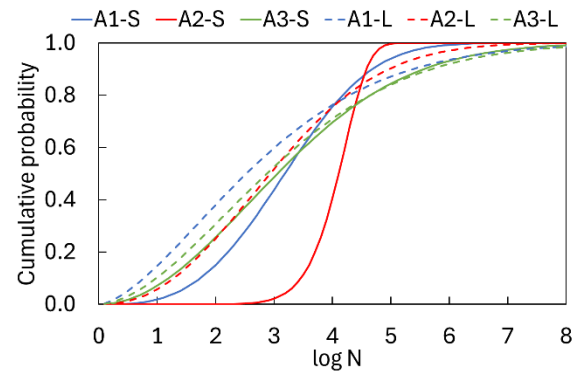


Figura 4. Ajustes de Weibull de la vida a fatiga.

Tabla 6. Parámetros de ajuste de Weibull y N para una probabilidad acumulada de 0.5.

Serie	λ	β	$N_{p=0.5}$
A1-S	3.58	3.11	1,528
A1-L	3.18	1.59	334
A2-S	4.25	10.97	12,764
A2-L	3.44	2.28	851
A3-S	3.67	2.01	1,135
A3-L	3.54	1.76	750

En la Figura 4 se representan los ajustes de Weibull de las vidas a fatiga de cada serie. La Tabla 6 recoge los valores de los parámetros de ajuste, así como N para una probabilidad $p = 0.5$.

Se extraen varias conclusiones interesantes de la Figura 4 y la Tabla 6. En primer lugar, en cada tipo de FRC, las probetas pequeñas soportan más ciclos que las grandes. En segundo lugar, no hay una tendencia clara del impacto del contenido de fibras en la vida a fatiga; es decir, un mayor volumen de fibras no incrementa necesariamente la resistencia a fatiga. Por último, la serie A2-S tiene un comportamiento estadístico diferente al del resto de series, ya que es la única en la que todas las probetas superan los 10^3 ciclos.

Por otra parte, además de N, también se han analizado las curvas de fluencia por fatiga, que representan el CMOD máximo en cada ciclo frente al número de ciclos (Figura 5). Estas curvas proporcionan información sobre la evolución del daño por fatiga. En particular, se ha calculado la velocidad de apertura de entalla

($dCMOD/dn$), que se define como la pendiente del tramo central. Se trata de un parámetro muy interesante, ya que diversos trabajos señalan que tiene muy buena correlación con N [6,18].

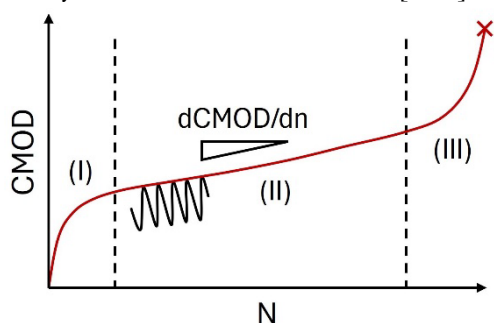


Figura 5. Curva de fluencia por fatiga.

3.4 Relación entre la distribución de fibras y la respuesta a fatiga

En el apartado 3.2 se concluye que el parámetro que tiene más impacto en la resistencia última a flexión es el volumen de fibras en la zona central de las probetas. Como los niveles de tensión de los ensayos de fatiga de cada serie se han calculado en función de σ_{ult} , no es esperable que V_{fib} tenga una buena correlación con N .

En cambio, otros parámetros de la distribución de fibras, como los relacionados con la orientación, sí pueden tener relación con la vida a fatiga. La Figura 6a muestra la regresión lineal entre el parámetro λ de Weibull y el factor de orientación en el eje longitudinal η_x . El valor de η_x que se representa es el promedio por serie.

De la Figura 6a se concluye que, cuanto mayor es el factor de orientación en X (fibras más perpendiculares al plano teórico de fallo), mayor es la vida a fatiga característica. En consecuencia, se puede afirmar que η_x es un parámetro fiable para predecir la vida a fatiga del FRC con diferentes dosificaciones de fibras y tamaños de probeta.

Por otro lado, en la Figura 6b se representa la regresión lineal entre la velocidad de apertura de entalla y el factor de orientación en el eje X. Los valores que se muestran son los promedios por serie.

Se aprecia que la correlación entre η_x y $dCMOD/dn$ es muy fuerte, con coeficientes R^2 que superan 0.9. Se concluye que una disposición de fibras más perpendicular al plano de fallo ralentiza el daño por fatiga. Además, se observa que esta relación depende del tamaño de probeta. En otras palabras, hay un factor de escala, de forma que el valor de η_x que provoca una cierta $dCMOD/dn$ cambia en función del tamaño de elemento. Finalmente, comparando las Figuras 6a y 6b, se puede afirmar que el factor de orientación en X predice con mayor precisión la velocidad de apertura de entalla que la vida a fatiga.

En conclusión, se demuestra que la orientación de fibras explica las diferencias en el comportamiento en fatiga del FRC con diferentes contenidos de fibras y tamaños de probeta.

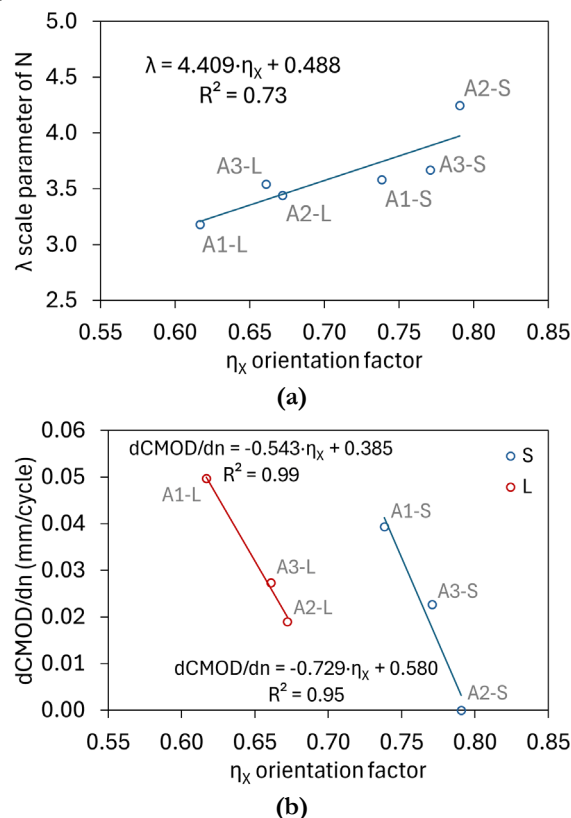


Figura 6. Regresión lineal del factor de orientación en X con el parámetro λ de Weibull (a) y la velocidad de apertura de entalla (b).

5. Conclusiones

En este trabajo se estudia el comportamiento en fatiga por flexión el FRC en función del contenido de fibras y tamaño de elemento. Se asume que las variaciones observadas en la resistencia a fatiga se deben a variaciones en la mesoestructura del hormigón; en particular, a las fibras, que determinan en buena medida el proceso de fractura. Por tanto, el objetivo principal es establecer correlaciones sólidas entre la distribución de las fibras y la vida a fatiga.

A continuación, se describen las principales conclusiones de este artículo.

En primer lugar, se aprecia que el volumen de fibras en la zona central de las probetas difiere del volumen teórico, siendo mayor en las probetas pequeñas.

En segundo lugar, con respecto a la orientación, se observa que en las probetas S las fibras están mejor alineadas con el eje longitudinal. En cambio, se concluye que la influencia del contenido teórico de fibras en la orientación es mucho menor.

En tercer lugar, hay una clara correlación entre el volumen de fibras en la zona central y la resistencia última a flexión.

En cuarto lugar, en lo referente al comportamiento en fatiga, el parámetro que más afecta a la vida a fatiga del FRC con diferentes contenidos de fibras y tamaños de probeta es el factor de orientación en el eje longitudinal. Se aprecia que, cuanto mayor es η_x , mayor es el parámetro λ de Weibull, representativo de la vida a fatiga.

Finalmente, η_x también estima con precisión la velocidad de apertura de entalla, que representa la rapidez a la que progresa el daño por fatiga en la macrofisura principal. No obstante, se aprecia que esta relación depende del tamaño de elemento.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación recibida por el Ministerio de Ciencia, Innovación y

Universidades (código de proyecto PID2023-147971OB-C33).

Referencias

- [1] S.H. Chu, J.Q. Wang, A.K.H. Kwan, Flexural strength and toughness of self-leveling UHPFRC, *Compos Struct* 315 (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116921>.
- [2] J.L. Le, Z.P. Bažant, Unified nano-mechanics based probabilistic theory of quasibrittle and brittle structures: II. Fatigue crack growth, lifetime and scaling, *J Mech Phys Solids* 59 (2011) 1322–1337.
<https://doi.org/10.1016/j.jmps.2011.03.007>.
- [3] Z.P. Bažant, K. Xu, Size effect in fatigue fracture of concrete, *ACI Mater J* 88 (1991) 390–399.
- [4] B. Kumar, A. Sharma, S. Ray, Characterization of crack-bridging and size effect on ultra-high performance fibre reinforced concrete under fatigue loading, *Int J Fatigue* 182 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108158>.
- [5] V.C. Li, Z.L. Lin, T. Matsumoto, Influence of fiber bridging on structural size-effect, *Int J Solids Struct* 35 (1998) 4223–4238.
[https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(97\)00311-9](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(97)00311-9).
- [6] F. Germano, G. Tiberti, G. Plizzari, Post-peak fatigue performance of steel fiber reinforced concrete under flexure, *Mater Struct* 49 (2016) 4229–4245.
<https://doi.org/10.1617/s11527-015-0783-3>.
- [7] D. Gao, Z. Gu, J. Tang, C. Zhang, Fatigue performance and stress range modeling of SFRC beams with high-strength steel bars, *Eng Struct* 216 (2020).

- <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110706>.
- [8] J. Zhang, H. Stang, V.C. Li, Fatigue life prediction of fiber reinforced concrete under flexural load, *Int J Fatigue* 21 (1999) 1033–1049. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(99\)00093-6](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(99)00093-6).
- [9] J. Zhan, A. Nussbaumer, E. Brühwiler, Influence of fiber orientation on the high cycle tensile fatigue resistance of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (UHPFRC), *Int J Fatigue* 180 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.108103>.
- [10] D.C. González, Á. Mena-Alonso, J. Mínguez, J.A. Martínez, M.A. Vicente, Effect of Fiber Orientation on the Fatigue Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Specimens by Performing Wedge Splitting Tests and Computed Tomography Scanning, *Int J Concr Struct Mater* 18 (2024) 4. <https://doi.org/10.1186/s40069-023-00639-8>.
- [11] Ł. Skarżyński, J. Suchorzewski, Mechanical and fracture properties of concrete reinforced with recycled and industrial steel fibers using Digital Image Correlation technique and X-ray micro computed tomography, *Constr Build Mater* 183 (2018) 283–299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.182>.
- [12] Z. Yang, W. Ren, R. Sharma, S. McDonald, M. Mostafavi, Y. Vertyagina, T.J. Marrow, In-situ X-ray computed tomography characterisation of 3D fracture evolution and image-based numerical homogenisation of concrete, *Cem Concr Compos* 75 (2017) 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.10.001>.
- [13] D.C. González, Á. Mena, J. Mínguez, M.A. Vicente, Influence of air-entraining agent and freeze-thaw action on pore structure in high-strength concrete by using CT-Scan technology, *Cold Reg Sci Technol* 192 (2021) 103397. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103397>.
- [14] European Committee for Standardisation (CEN), UNE-EN 14651. Test method for metallic fibre concrete. Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual), 2008.
- [15] F. Laranjeira, S. Grünwald, J. Walraven, C. Blom, C. Molins, A. Aguado, Characterization of the orientation profile of steel fiber reinforced concrete, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 44 (2011) 1093–1111. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9686-5>.
- [16] D.C. González, Á. Mena, G. Ruiz, J.J. Ortega, E. Poveda, J. Mínguez, R. Yu, Á. De La Rosa, M.Á. Vicente, Size effect of steel fiber-reinforced concrete cylinders under compressive fatigue loading: Influence of the mesostructure, *Int J Fatigue* 167 (2023) 107353. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107353>.
- [17] E. Poveda, G. Ruiz, H. Cifuentes, R.C. Yu, X. Zhang, Influence of the fiber content on the compressive low-cycle fatigue behavior of self-compacting SFRC, *Int J Fatigue* 101 (2017) 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.04.005>.
- [18] D.M. Carlesso, A. de la Fuente, S.H.P. Cavalero, Fatigue of cracked high performance fiber reinforced concrete subjected to bending, *Constr Build Mater* 220 (2019) 444–455. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.038>.