

Propiedades mecánicas en fatiga de un hormigón de muy altas prestaciones mediante ensayos de flexión en tres puntos

Fatigue mechanical properties of ultra-high performance concrete by using three-point bend tests

José David RÍOS JIMÉNEZ

Ingeniero Industrial
Universidad de Sevilla
Doctorando
jdrios@us.es

Héctor CIFUENTES BULTÉ

Dr. Ingeniero Industrial
Universidad de Sevilla
Profesor Contratado Doctor
bulte@us.es

Fernando MEDINA ENCINA

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Universidad de Sevilla
Profesor Titular de Universidad
medinaencina@us.es

RESUMEN

En este trabajo, se ha estudiado el comportamiento a fatiga de un hormigón de muy alta resistencia. Para ello, se ha diseñado una campaña experimental con dos hormigones diferentes, pero con la misma matriz. Uno de ellos no estaba reforzado con fibras de acero, D1, y el otro reforzado, DF1. Los ensayos a fatiga se realizaron sobre probetas prismáticas con entalla, a flexión en tres puntos. A partir de los datos experimentales, se determinaron las correspondientes curvas S-N mediante una metodología estadística desarrollada por Castillo y Fernández-Canteli y aplicada a través del software ProFatigue desarrollado por sus correspondientes equipos de trabajo.

ABSTRACT

In this work, it has been studied the fatigue behaviour of an ultra-high performance concrete. On this purpose, an experimental programme has been designed for two different concrete materials. All of them with identical matrix. The former was plain concrete, D1, and the latter was fibre-reinforced concrete, DF1. Fatigue three-point bend tests were performed to beam notched specimens. S-N curves were determined from experimental fatigue data by using a statistical methodology developed by Castillo and Fernández-Canteli with the ProFatigue software created by their work groups respectively.

PALABRAS CLAVE: hormigón de muy altas prestaciones, fatiga, fatiga probabilística.

KEYWORDS: ultra-high performance concrete, fatigue, probabilistic fatigue.

1. Introducción

Los hormigones de muy alta resistencia (HMAR) se caracterizan por tener una capacidad mecánica significativamente mayor, tanto en tensiones de compresión como de tracción, no siendo despreciable la contribución de ésta última, como sí ocurre en los hormigones de resistencia normal. Además, están caracterizados por poseer una matriz fluida autocompactante, que asegure la

adaptación del hormigón a los encofrados de manera más eficiente (peso propio del hormigón fresco) [1] y por estar reforzados con fibras de acero en lugar de las armaduras tradicionales. La adición de fibras de acero mejora notablemente la resistencia a tracción y aumenta la capacidad de deformación del hormigón, especialmente en la zona post rotura [2].

La notable mejoría de las propiedades mecánicas permite poder producir elementos estructurales más esbeltos, llevando al desarrollo de nuevos diseños y alternativas en el ámbito de las estructuras civiles. Los hormigones autocompactantes tienen la ventaja de reducir el tiempo de ejecución en comparación con los hormigones vibrados, al no necesitar compactación, así como los costes derivados del proceso. Estas ventajas, unidas a la mencionada mejora de resistencia, hacen que la aplicación de HMAR en puentes de carretera, pasarelas, pavimentos, elementos prefabricados, rascacielos o estadios haya proliferado en los últimos años. Las estructuras civiles como puentes, pavimentos o estructuras off-shore están sometidas a millones de ciclos de carga durante su vida útil, y hacen que la determinación de parámetros que permitan el diseño de estructuras de HMAR mediante criterios de resistencia crítica en fatiga sea fuente de interés para los investigadores [3].

En este trabajo se ha llevado a cabo una campaña experimental en la que se han realizado ensayos de fatiga a flexión en tres puntos sobre probetas prismáticas con entalla de HMAR. Se fabricaron dos tipos de hormigones, uno sin refuerzo de fibras (D1), usado como hormigón de control, y el otro reforzado con fibras de acero (DF1). El comportamiento en fatiga, para cada uno de ellos, fue determinado mediante la obtención de las curvas de Wöhler para una relación de tensión dada $R=0.2$. Para la obtención de las curvas S-N se ha usado una metodología estadística unificada desarrollada por Castillo y Fernández-Canteli [4]. Esta metodología modela el daño a fatiga de manera probabilística, no determinista, a partir de un conjunto representativo de datos de fatiga experimentales. El modelo determina un conjunto de percentiles de las curvas S-N de manera que da información de la aleatoriedad propia del comportamiento a fatiga. Los criterios utilizados para el desarrollo de los modelos son físicos, estadísticos y de compatibilidad. Es decir, criterios objetivos, no tomados por conveniencia o facilidad de uso. Todo ello lleva a dos modelos de aplicación, uno que utiliza la función de distribución de Weibull y el otro la de Gumbel. Para hacer más sencilla la aplicación y resolución de los modelos fue desarrollado un software por Fernández-Canteli et al [5] llamado ProFatigue, que es el que se ha utilizado en este estudio.

El artículo se estructura de la siguiente manera: en la sección 2 se describe el programa experimental realizado. Se detallan las características de los hormigones utilizados, así como el desarrollo de los ensayos. La sección 3 expone los resultados obtenidos y presenta un análisis de los mismos. Finalmente, en la sección 4 se presentan las conclusiones extraídas.

2. Programa Experimental

2.1. Hormigones autocompactantes con fibras

Los hormigones estudiados en esta investigación han sido diseñados y fabricados para un estudio previo realizado de la influencia de dos tipos de fibras en las propiedades mecánicas de un HMAR, cuya principal diferencia radicaban en su longitud (13 mm y 35 mm). La matriz de hormigón se ha mantenido siempre constante, así como el contenido de fibras usado en un 2.5 % en volumen. La dosificación de la matriz de hormigón se muestra en la Tabla 1. En aquel estudio se fabricaron cuatro hormigones, el primero de ellos sin ningún tipo de refuerzo de fibras, usado como hormigón de control, el segundo, reforzado con fibras de 13 mm, un tercero reforzado con fibras de 35 mm y el último reforzado con fibras de 13 mm y 35 mm al 50%.

Componentes	Contenido (kg/m ³)
Cemento 52.5R/SR	544
Sika fume S-92-D (0.1 µm)	214
Escoria de alto horno	312
Arena silíceo (<315 µm)	470
Arena silíceo (<800 µm)	470
Master glemium ACE 325	42
Agua	188

Tabla 1. Componentes y contenido de la matriz de hormigón.

Las conclusiones extraídas de aquel estudio indicaron que el tipo de refuerzo que mejoraba las propiedades mecánicas analizadas (resistencia a compresión, módulo de Young, resistencia a flexotracción y tracción), de una manera más eficiente y equilibrada, es la adición conjunta de fibras de 13 mm y de 35 mm al 50%.

Para este trabajo se ha llevado a cabo una campaña experimental en la que se han realizado ensayos de fatiga a flexión en tres puntos. La dosificación del hormigón utilizada puede verse en la Tabla 1. Se han fabricado dos tipos de hormigones diferentes, sin refuerzo de fibras (D1), usado como hormigón de control, y reforzado con fibras de acero (DF1). El hormigón reforzado contenía fibras de acero modelo OL-13/0.16, de 13 mm de longitud, 0.16 mm de diámetro, 2000 MPa de límite elástico y anclaje liso (Figura 1.a) y RC-65/35 NB, de 35 mm de longitud, 0.54 mm de diámetro, 1200 MPa de límite elástico y anclaje en forma de gancho (Figura 1.b) de Bekaert Dramix® al 50% con un 2.5 % en volumen. La nomenclatura utilizada y el contenido de fibras se indican en la Tabla 2. Para cada tipo de hormigón, se fabricaron 16 probetas prismáticas de 440x100x100 mm, 8 cúbicas de 100 mm de lado y 4 cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura.

Nomenclatura	Cantidad de fibras (kg/m ³)	Longitud (mm)
D1	0	0
DF1	98 / 98	13 / 35

Tabla 2. Nomenclatura, tipo y cantidad de fibras.



(a)



(b)

Figura 1. (a) fibras OL-13/0.16, (b) fibras RC-65/35 NB.

Desde el punto de vista de las propiedades mecánicas, se han realizado diferentes ensayos de caracterización. La resistencia a compresión fue medida según la norma EN 12390-3:2009 [6] mediante el uso de las probetas cúbicas. El módulo de Young fue medido a partir de las probetas cilíndricas acorde a la norma EN 12390-13:2014 [7], manteniendo un incremento gradual de la carga hasta un tercio del valor de rotura máximo del hormigón y midiendo las correspondientes deformaciones mediante dos transductores LDVT. La resistencia a flexotracción fue medida según la norma EN 14651:2007 [8] mediante probetas prismáticas entallada con profundidad 1/6 del canto. Para la medida de la apertura de fisura en la punta de la entalla (CMOD), se utiliza un extensómetro resistivo de tipo clip. La energía de fractura fue determinada siguiendo el procedimiento RILEM [9], mediante ensayos de flexión en tres puntos de probetas prismáticas con entallas. Fueron aplicadas las mejoras propuestas por Planas, Guinea y Elices [10–12]. El ensayo de flexión en tres puntos con el extensómetro puede verse en la Figura 2.



Figura 2. Ensayo estático de flexión a tres puntos.

Los valores medios de las propiedades mecánicas medidas pueden verse en la Tabla 3.

	f_c (MPa)	E (GPa)	f_t (MPa)	G_f (N/m)
D1	124.7	33.7	7.55	143
DF1	147.4	49.2	42.6	69122

Tabla 3. Propiedades mecánicas de los hormigones utilizados.

2.2. Descripción de los ensayos

Los ensayos de fatiga fueron configurados para flexión en tres puntos sobre probetas prismáticas de 440x100x100 mm con entalla a 1/6 del canto. La relación de carga aplicada en todos los ensayos fue la misma y de valor $R=0.2$. La frecuencia de aplicación de la carga fue fija de 4 Hz. Los ensayos de fatiga fueron realizados en una máquina servo hidráulica con capacidad máxima de carga de 20 kN. En las probetas fueron colocadas cuatro bandas extensométricas para determinar la velocidad de propagación de la grieta para los diferentes niveles de carga ensayados. En la Figura 3 puede verse la configuración de los ensayos de fatiga.

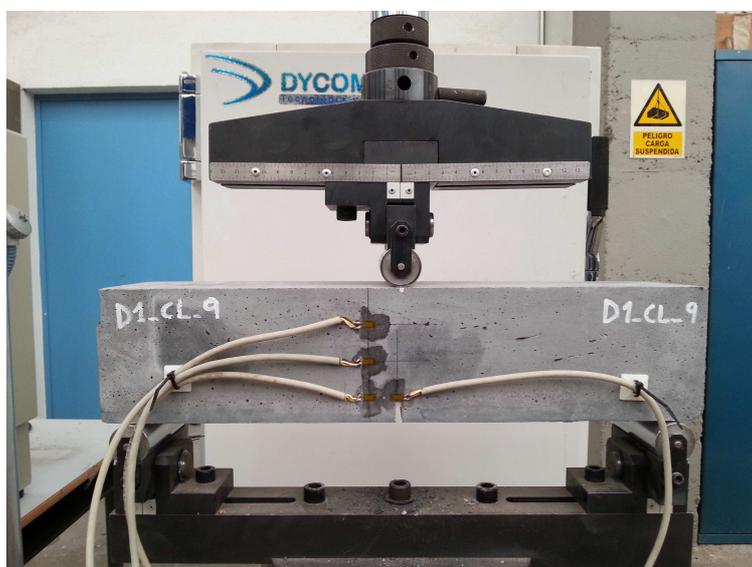


Figura 3. Ensayo de fatiga a flexión en tres puntos.

3. Resultados y discusión

3.1. Obtención de las curvas S-N

En este estudio se ha aplicado un metodología estadística, para modelizar el daño en fatiga, desarrollado por Castillo y Fernández-Canteli [4] y así obtener las curvas S-N derivadas de los datos experimentales y poder analizar el comportamiento en fatiga de los mismos. La principal ventaja del modelo utilizado radica en ser de naturaleza probabilística, no determinista. Es decir, tienen en cuenta diferentes percentiles de las curvas S-N derivados de la aleatoriedad propia del comportamiento en fatiga y por tanto el resultado obtenido es un conjunto de curvas S-N relativas, cada una de ellas, a una probabilidad de fallo diferente. Los criterios utilizados para el desarrollo de los modelos son físicos, estadísticos y de compatibilidad. Criterios objetivos, no tomados por conveniencia o facilidad de uso. Los modelos utilizan variables adimensionales, de manera que, reduce el número de variables al mínimo y hace que los modelos sean físicamente válidos. De esta manera, las funciones usadas tienen la misma forma independientemente de las unidades utilizadas. Este aspecto es muy importante, porque si se usan modelos dependientes de unidades

fuera de las regiones de los ensayos, puede llegar a violarse las propiedades físicas en esa zona. Los modelos deben cumplir con cuatro condiciones:

1. **Principio del eslabón más débil:** El tiempo de vida de cada elemento, será el del subelemento que menos resista, luego es un problema de mínimos.
2. **Estabilidad:** La familia de funciones de distribución seleccionada para el tiempo de vida a fatiga debe ser válida para todas las posibles longitudes. Esta condición la cumplen la distribución de Weibull y Gumbel, pero no la normal.
3. **Comportamiento límite:** Para incluir el rango hipotético de piezas con tamaño nulo (infinitas piezas), es conveniente que la familia de distribuciones sea una familia asintótica. En el caso de independencia, solo existen tres familias asintóticas: Weibull, Gumbel y Fréchet.
4. **Rango limitado:** Las variables N y σ tienen un límite inferior finito que debería coincidir con el de las familias elegidas. Esto solo le ocurre a la distribución de Weibull.

Luego, el modelo de Weibull (1) es el más adecuado. Sin embargo, puesto que la distribución minimal de Gumbel es el límite de la distribución de Weibull, también se puede considerar el modelo de Gumbel (2) [4].

$$\text{Modelo I (Weibull)} \quad p = 1 - \exp \left[- \left(\frac{N - \lambda}{\delta} \right)^\beta \right]; N \geq \lambda \quad (1)$$

$$\text{Modelo II (Gumbel)} \quad p = 1 - \exp \left[- \exp \left(\frac{N - \lambda}{\delta} \right) \right]; N \in \mathfrak{R} \quad (2)$$

Siendo $N = (\log N - B)(\log \Delta \sigma - C)$, donde B es el valor umbral de vida a fatiga, C es el límite de fatiga y λ, δ, β son los parámetros de localización, de escala y de forma de la distribución de Weibull. El parámetro de localización define la posición del percentil 0%. Estos dos modelos son aplicables a los casos de rango de tensiones y nivel de tensión constante, a las situaciones con nivel fijo y rango variable o al más general, nivel y rango de tensiones variables imponiendo diferentes condiciones de compatibilidad según el caso. Para conocer con más profundidad los modelos y su funcionamiento se recomienda consultar el libro de Castillo y Fernández-Canteli [4].

La resolución de estos modelos a partir de datos experimentales de fatiga, llevan a la obtención de las curvas S-N para cada probabilidad de fallo. Para facilitar la aplicación del modelo a casos prácticos donde sea necesario la determinación de los datos de vida a fatiga mediante las curvas S-N, Castillo y Fernández-Canteli desarrollaron un programa, ProFatigue [5], que facilita los cálculos necesarios. Los parámetros del modelo se estiman desde los datos de fatiga experimentales llevando a una predicción probabilística de vida a fatiga como función del rango de tensiones [4,5].

Los datos de vida a fatiga experimental obtenidos para el HMAR sin refuerzo de fibras y reforzado pueden verse en la Tabla 4.

D1 (sin fibras)			DF1 (con fibras)		
S_{max} (-)	$\Delta\sigma$ (MPa)	N (ciclos)	S_{max} (-)	$\Delta\sigma$ (MPa)	N (ciclos)
0.500	1.824	2e6	0.500	10.215	2e6
0.525	1.903	1105	0.550	11.236	423098
0.550	1.993	93700	0.600	12.258	256282
0.575	2.084	1105	0.625	12.768	33790
0.600	2.174	94	0.650	13.279	83875
0.600	2.174	4888	0.675	13.790	16911
0.650	2.356	43000	0.700	14.301	5030
0.700	2.537	99	0.725	14.811	15836
0.700	2.537	1225	0.750	15.322	3998
0.750	2.718	16108	0.800	16.343	631
0.850	3.080	19	0.850	17.365	2150
0.900	3.627	6	0.900	18.386	79

Tabla 4. Vida a fatiga experimental para hormigón sin fibras (D1) y con fibras (DF1).

Las curvas S- N fueron determinadas mediante la aplicación del modelo I (Weibull) en la que los valores de los parámetros ajustados del modelo pueden verse en la tabla 5.

	B (ciclos)	C (MPa)	β	δ	λ
D1	5	2.26	1.12	1.20	0.00
DF1	1	9.88	8.37	4.98	0.36

Tabla 5. Parámetros ajustados del modelo de Weibull para los datos de D1 y DF1.

Si comparamos los valores de tensión alcanzados y la vida a fatiga para los hormigones sin refuerzo (Tabla 4, D1) con los hormigones reforzados con fibras (Tabla 4 DF1), se observa cómo, a pesar de que los componentes y proceso de fabricación de la matriz sean idénticos en ambos casos (D1 y DF1), la presencia de fibras modificaba significativamente el comportamiento resistente de los hormigones haciendo de ellos dos materiales muy diferentes que se van a analizar con mayor profundidad.

De los parámetros del modelo (Tabla 5) se puede deducir la forma que tendrán las curvas S-N. El hormigón D1 tiene un valor del parámetro B mayor que DF1. Esto indica que el valor umbral de vida a fatiga del hormigón D1 es ligeramente mayor [4]. A efectos prácticos 4 ciclos de diferencia es el mismo valor en cuanto a vida a fatiga. Sin embargo, observando el parámetro C , que indica el límite de fatiga, puede verse como la adición de fibras a la matriz de hormigón produce un aumento considerable del límite de fatiga. El incremento del parámetro de forma, β , con la adición de las fibras lleva a valores de la vida a fatiga del hormigón menos dispersos. El parámetro de escala, δ , aumenta para el caso del hormigón DF1, ya que está relacionado con la resistencia del material. El parámetro de localización, λ , indica la situación del percentil cero [4]. Para el caso D1, al tener valor nulo, la curva para el percentil cero corresponde con el umbral y límite de fatiga. Sin embargo, estará ligeramente alejada de estos límites para el caso DF1.

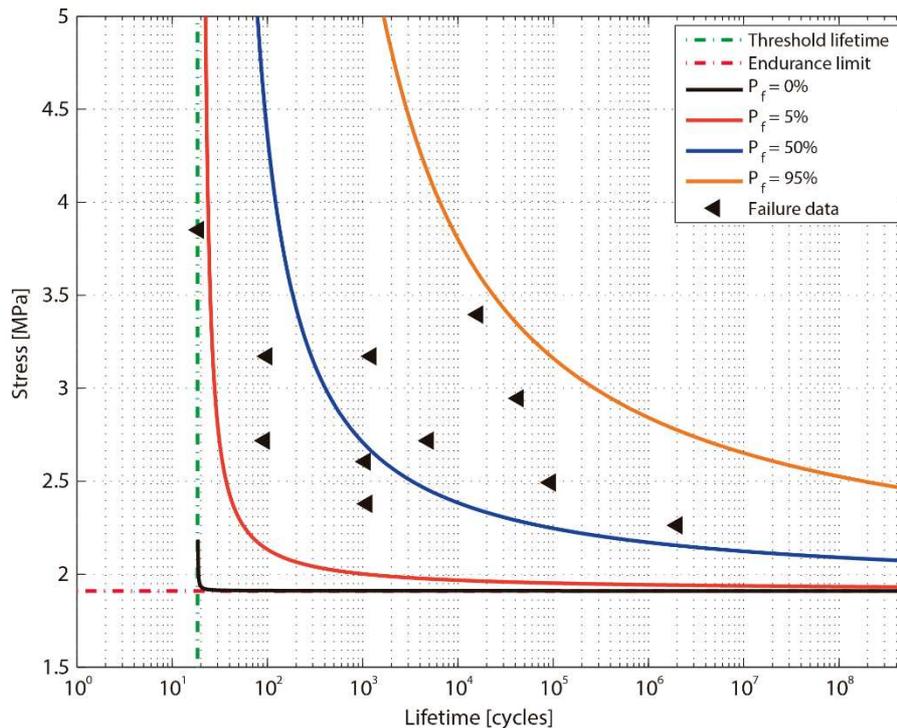


Figura 4. Curvas S-N ajustadas a partir de los datos de fatiga experimental para D1.

En la Figura 4 se pueden observar las curvas S-N para la matriz del HMAR diseñado para este estudio sin refuerzo de fibras (D1). La principal característica que se observó fue que la dispersión de los resultados de los ensayos de fatiga era muy marcada. Las curvas S-N, ajustadas a partir de estos datos, muestran dicha dispersión desde el amplio rango abarcado por los diferentes percentiles correspondientes a cada probabilidad de fallo (P_f).

Las curvas S-N ajustadas desde los datos de fatiga experimental para el hormigón reforzado con fibras (DF1) son mostradas en la Figura 5. Para este caso los valores de vida a fatiga han visto reducida significativamente su dispersión, comparado con el caso D1 (Figura 4). Este aspecto se puede ver de forma clara si observamos la franja formada por los percentiles $P_f=95%$ y $P_f=5%$, que forma una región bastante contenida, con baja dispersión.

La adición de fibras, además de mejorar las propiedades mecánicas, como ya se mencionó en la introducción, mejora el comportamiento en fatiga de HMAR [13]. Para el caso D1, para un mismo nivel de tensión, el orden de variabilidad de la vida a fatiga para una probeta ensayada, observada mediante la franja formada por la curva de probabilidad de fallo $P_f=95%$ y $5%$ puede ser de cuatro órdenes de magnitud en la zona más amplia, en torno a un nivel de tensión de 3 MPa. Sin embargo, para el hormigón DF1, la dispersión de la vida a fatiga puede ser de dos órdenes de magnitud en torno al 16 MPa, que puede ser el nivel de tensión para el que existe mayor dispersión a la luz de los resultados obtenidos.

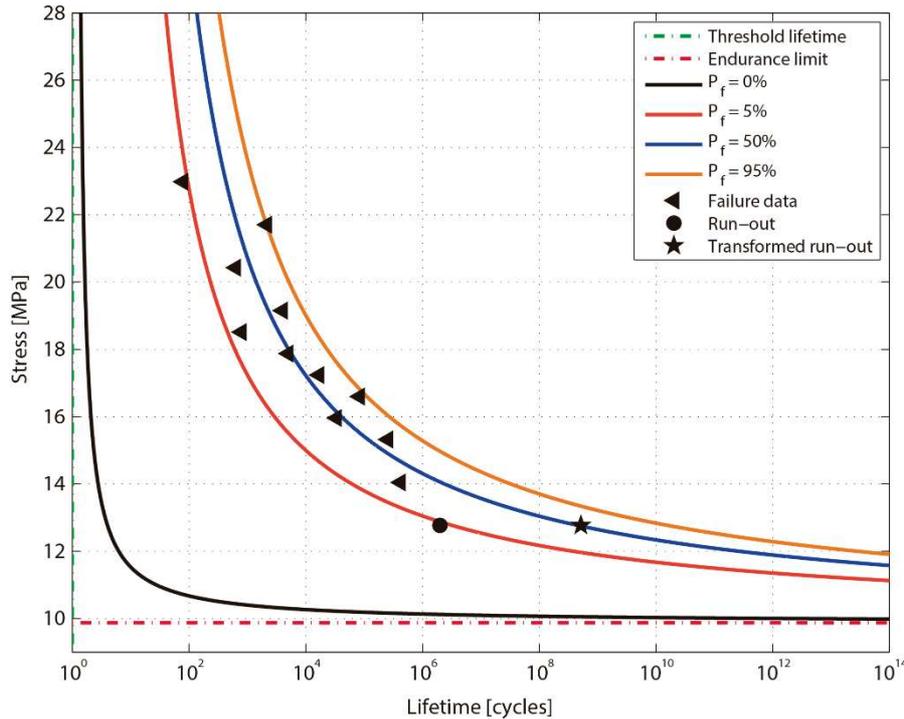


Figura 5. Curvas S-N ajustadas a partir de los datos de fatiga experimental para DF1.

El rango de percentiles de las curvas S-N está más delimitado para el caso de hormigón reforzado con fibras, DF1. Esto lleva a que el uso de las curvas S-N determinadas por este método aporten valores con menor dispersión y sean más fiables para predecir la vida a fatiga de estos elementos.

4. Conclusiones

A la vista de los resultados se establecen las siguientes conclusiones generales:

- La adición de fibras produce un incremento notable de la resistencia estática a flexotracción, como es sabido, pero a la vista de los resultados, esto puede extenderse a los casos de fatiga. Este efecto se observa en la mayor vida a fatiga que los hormigones DF1 tienen en comparación con los hormigones D1.
- La dispersión en los resultados, propia en los hormigones y acrecentada por la fatiga, se reduce para el caso de HMAR con la adición de fibras debido a la barrera que suponen éstas para la propagación de grietas. Esto será más efectivo cuanto mejor estén distribuidas las fibras en la matriz.
- La adición de fibras aumenta el límite de fatiga, de manera que los elementos de HMAR pueden estar sometidos a mayores tensiones sin que el efecto de la fatiga aparezca.
- El rango de percentiles de las curvas S-N está más confinado para el caso de hormigón reforzado con fibras, DF1, dando unos valores con menor dispersión y siendo más fiable la predicción de la vida a fatiga en estos casos.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer la financiación recibida para la realización de esta investigación por parte del Ministerio de Economía y Competitividad mediante el proyecto BIA2013-48352-P.

Referencias

- [1] R. Deeb, A. Ghanbari, B.L. Karihaloo, Development of self-compacting high and ultra high performance concretes with and without steel fibres, *Cem. Concr. Compos.* 34 (2012) 185–190. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.11.001.
- [2] A. Caggiano, M. Cremona, C. Faella, C. Lima, E. Martinelli, Fracture behavior of concrete beams reinforced with mixed long/short steel fibers, *Constr. Build. Mater.* 37 (2012) 832–840. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.060.
- [3] S. Goel, S.P. Singh, Fatigue performance of plain and steel fibre reinforced self compacting concrete using S–N relationship, *Eng. Struct.* 74 (2014) 65–73. doi:10.1016/j.engstruct.2014.05.010.
- [4] E. Castillo, A. Fernández-Canteli, Una metodología estadística unificada para modelar el daño a fatiga, 2009.
- [5] A. Fernández-Canteli, C. Przybilla, M. Nogal, M.L. Aenlle, E. Castillo, Profatigue: A software program for probabilistic assessment of experimental fatigue data sets, *Procedia Eng.* 74 (2014) 236–241. doi:10.1016/j.proeng.2014.06.255.
- [6] EN 12390-3: 2009. Testing hardened concrete-Part 3: Compressive strength of test specimens, AENOR, (n.d.).
- [7] EN 12390-13: 2014. Testing hardened concrete-Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression, AENOR, (n.d.).
- [8] EN 14651: 2007+A1 Test method for metallic fibered concrete- Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual), AENOR ., (2007).
- [9] RILEM TCM-85 1985. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams., *Mater. Struct.* 18 (n.d.) 287–290.
- [10] J. Planas, M. Elices, G. V. Guinea, Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part 2-Influence of bulk energy dissipation, *Mater. Struct.* 25 (1992) 305–312. doi:10.1007/BF02472671.
- [11] J. Elices, M; Guinea, GV;Planas, Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part 3- Influence of cutting the P- δ tail., *Mater. Struct.* 25 (1992) 327–334.
- [12] M. Guinea, GV;Planas, J;Elices, Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part 1- Influence of experimental procedures., *Mater. Struct.* 25 (1992) 212–218.
- [13] S. Goel, S. Singh, P. Singh, Fatigue Analysis of Plain and Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete., *ACI Mater. J.* (2012) 573–582.