

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Determinación de las curvas de Wöhler en fatiga a flexotracción de un hormigón de muy alta resistencia sometido a temperatura elevada

José D. Ríos ^{(1)*}, Héctor Cifuentes ⁽¹⁾ y Fernando Medina ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad de Sevilla, España.

*Persona de contacto: jdrios@us.es

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5527>

RESUMEN

En ciertas aplicaciones de almacenamiento energético, como los depósitos de almacenamiento de vapor en plantas de energía solar, el hormigón de muy alta resistencia es un material de gran interés debido a sus elevadas propiedades mecánicas, sobre todo su resistencia a tracción. En estas aplicaciones, el material se encuentra sometido a cargas térmicas y mecánicas repetidas, por lo que debe analizarse convenientemente su comportamiento a fatiga. En este trabajo, se realiza un estudio experimental del comportamiento frente a fallo por fatiga a flexotracción de un hormigón de muy alta resistencia sometido a temperaturas moderadamente elevadas. Para ello, se han realizado ensayos cíclicos de flexión en tres puntos de un hormigón de muy alta resistencia, con y sin refuerzo de fibras de acero, a temperatura ambiente, 100°C y 200°C. A partir de los resultados experimentales y con la aplicación de un modelo probabilístico, se obtuvieron las curvas de Wöhler de los hormigones ensayados, poniendo de manifiesto y cuantificando el efecto de la adición de fibras de acero y el daño generado en la matriz cementicia por el aumento de temperatura, lo que conlleva a una reducción de la vida a fatiga.

PALABRAS CLAVE: hormigón de muy alta resistencia, fatiga, fibras de acero, curvas de Wöhler

1.- INTRODUCCIÓN

El uso de energías renovables como principal fuente de energía es un tema de gran interés en numerosos países que no disponen de fuentes de energía fósiles. El tener una fuente de energía limpia y de fácil acceso supone una reducción de costes importantes, pero al mismo tiempo requiere un desarrollo tecnológico en materia de producción de energía renovable. Entre las más utilizadas se encuentra la energía solar por ser abundante y ampliamente extendida. Sin embargo, uno de los principales inconvenientes es la aleatoria discontinuidad de producción debido a los periodos sin radiación solar. Este es uno de los motivos por los

que la independencia energética de los combustibles fósiles no pueda llegar a ser total. El disponer de sistemas de almacenamiento que permitan producir energía eléctrica en las zonas valle de producción supondría un avance en el establecimiento de la energía solar como fuente de energía alternativa.

La fabricación de sistemas de almacenamiento de energía con elementos de hormigón en plantas de energía solar está siendo objeto de estudio frente a otros tipos de materiales. Las principales ventajas que aporta el hormigón son la de ser un material resistente y con capacidad para almacenamiento de energía térmica, y todo ello para un material accesible y de bajo coste en comparación con otras alternativas [1]. En el proceso de almacenamiento, el material debe resistir ciclos térmicos durante periodos prolongados. El estudio de la durabilidad de estos materiales en periodos con exposición de cargas y temperaturas variables, así como los posibles daños térmicos, son de gran importancia debido a las consecuencias que pueden ocasionar.

Los hormigones de muy alta resistencia (HMAR) se caracterizan por tener una capacidad mecánica significativamente mayor en comparación con los de resistencia normal, tanto en compresión como en 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 menos porosa y en consecuencia son menos sensibles a agentes externos. Si se refuerzan con fibras de acero, se produce una mejora notable de la resistencia a tracción en la matriz [2].

En este trabajo se ha llevado a cabo una amplia campaña en la que se han realizado ensayos de fatiga a flexión en tres puntos sobre probetas prismáticas entalladas de HMAR sometidos a diferentes temperaturas. Se fabricaron dos tipos distintos de hormigón, uno sin refuerzo de fibras, usado como hormigón de control, y otro reforzado con fibras de acero. Cada uno de ellos fue ensayado a tres temperaturas diferentes: temperatura ambiente, 100°C y 200°C. El comportamiento en fatiga, para cada uno de ellos, fue determinado mediante la obtención de la familia de curvas de Wöhler (diferentes percentiles) para una relación de tensión y frecuencia fijada. Para la obtención de las curvas S-N se ha usado una metodología estadística unificada desarrollada por Castillo y Fernández-Canteli [3]. Esta metodología modeliza el daño a fatiga de manera probabilística, no determinista, a partir de un conjunto representativo de datos de fatiga experimentales. Los criterios utilizados para el desarrollo de los modelos son físicos, estadísticos y de compatibilidad.

El artículo está estructurado de la siguiente manera: en la sección 2 se describe la campaña experimental realizada. Se detallan las características de los hormigones utilizados, así como el desarrollo de los ensayos. La sección 3 describe brevemente el modelo de fatiga utilizado para la estimación de las curvas S-N, expone los resultados obtenidos y presenta una discusión de los mismos. Finalmente, en la sección 4 se exponen las conclusiones extraídas.

2.- CAMPAÑA EXPERIMENTAL

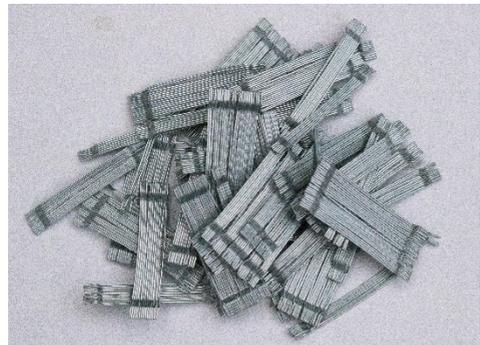
La campaña experimental consistió en el estudio del comportamiento a fatiga en flexotracción de un HMAR cuando es sometido a tres temperaturas diferentes: temperatura ambiente (TA), 100°C y 200°C. Para ello se fabricó un HMAR con la dosificación de la Tabla 1. El refuerzo utilizado en este estudio consiste en la utilización de dos tipos de fibras de acero mezclados al 50% [4].

Tabla 1. Dosificación y contenido de componentes en los HMAR

<i>Componentes</i>	<i>Contenido (kg/m³)</i>
Cemento	544
Humo de sílice	214
Escoria de alto horno	312
Arena de sílice (<0.315 mm)	470
Arena de sílice (<0.800 mm)	470
Superplastificante	42
Agua	188
Fibra OL 13/.20	98
Fibra 3D 65/35BG	98



(a)



(b)

Figura 1. Fibras de acero utilizadas en la fabricación del HMAR: (a) modelo OL13/.20 y (b) modelo 3D 65/35BG

Se fabricaron seis amasadas, tres sin fibras y tres reforzadas con fibras. De las tres sin refuerzo, D_i , para $i:1-3$, cada una se ensayó a una temperatura diferente (TA, 100°C y 200°C). Se procedió de forma análoga con las tres amasadas reforzadas con fibras, DF_i para $i:1-3$. En la Tabla 2 se muestra de forma resumida las 6 amasadas y a las temperaturas estudiadas. Todos los hormigones fueron curados durante 28 días en un baño de agua. Tras el curado fueron secadas al aire durante al menos 48 horas. Para el caso de los ensayos a

temperatura de 100°C y 200°C, previamente a la realización de los ensayos mecánicos, las probetas fueron calentadas a la temperatura objetivo durante 24 horas. De esta forma se garantiza un secado del material y la no influencia del grado de humedad de las probetas. Los ensayos realizados a 100°C y 200°C se llevaron a cabo en un horno al que se le acopla el actuador y se introducen los soportes de manera que las probetas están sometidas a la temperatura objetivo durante todo el ensayo.

Para cada una de las seis amasadas se fabricaron 16 probetas prismáticas de dimensiones 440x100x100 mm³ con una entalla central de 1/6 del canto. Estas probetas fueron ensayadas con una configuración de flexión en tres puntos. En la Figura 2.a se muestra una vista esquemática de las dimensiones de las probetas y el tipo de ensayo.

Tabla 2. Nomenclatura para cada tipo de refuerzo y temperaturas estudiadas

<i>Temperatura</i>	<i>No reforzado</i>	<i>Reforzado con fibras</i>
Temperatura ambiente	D1_TA	DF1_TA
100°C	D2_100	DF2_100
200°C	D3_200	DF3_200

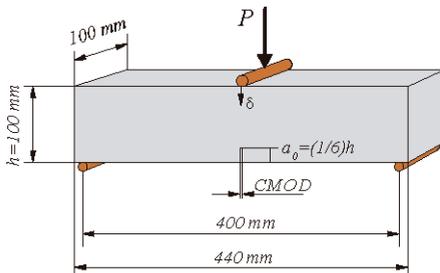


Figura 2. Configuración de los ensayos: a) dimensiones de las probetas b) ensayo estático de flexión en tres puntos con extensómetro de pinza

De las 16 probetas, las dos primeras se sometieron a un ensayo de rotura para determinar las propiedades estáticas (Figura 2.b) mediante un equipo servo hidráulico con capacidad máxima de carga 150 kN. A partir de los resultados obtenidos de los ensayos estáticos, se determinaron los niveles de carga para la realización de los ensayos a fatiga (Figura 3). Se realizan 14 ensayos a fatiga por flexotracción, cada uno de ellos a 14 niveles de carga diferentes. La frecuencia de carga y la relación de tensión fue siempre la misma para cada ensayo con valores de 4 Hz y 0.2 respectivamente.



Figura 3. Configuración de los ensayos a fatiga sometidos a cargas de flexotracción

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.- Modelo de probabilidad de fallo por fatiga

En este estudio se aplica un modelo estadístico para la estimación del daño por fatiga, desarrollado por Castillo y Fernández-Canteli [3]. Este modelo permite determinar las curvas de Wöhler a partir de una serie de resultados experimentales representativos y así poder analizar el comportamiento a fatiga de los elementos ensayados. Una de las ventajas de este modelo es su carácter probabilístico. Esto hace que pueda ser aplicado a diferentes tipos de materiales (metálicos, cerámicos u hormigones) [5], ya que se centra en la distribución de probabilidad de fallo del elemento y no en el mecanismo de fallo [5]. El tiempo de vida a fatiga es una variable aleatoria, por lo que en vez de una única curva media $S-N$, considera una familia de curvas percentiles $S-N$, a diferencia de los modelos deterministas [3].

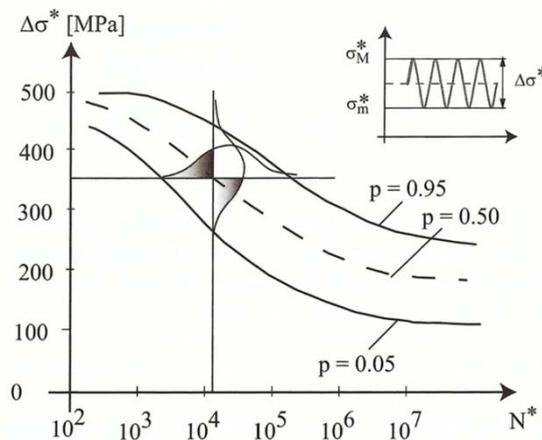


Figura 4. Condición de compatibilidad entre $N^*/\Delta\sigma$ y $\Delta\sigma/N^*$.

Otro aspecto importante a reseñar es el principio de compatibilidad (Figura 4) necesaria entre las funciones de densidad de vida a fatiga, N , para un nivel de tensión, S , dado y la función de densidad de S , para una vida a fatiga, N , dada. Las dos funciones de densidad deben cruzarse en un punto de igual probabilidad. Debido a esa condición de compatibilidad no es necesario realizar varios ensayos para los mismos niveles de tensión, con el consiguiente ahorro de recursos y tiempo que conlleva. La igualdad entre ambas funciones de densidad lleva a establecer una ecuación funcional cuya solución conduce a las dos familias de modelos siguientes:

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

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

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 mayor profundidad los modelos y su funcionamiento se recomienda consultar el libro de Castillo y Fernández-Canteli [3].

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 [6], que facilita el proceso de obtención de los parámetros del modelo. 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 [3,6].

3.2.- Curvas S - N

Para mayor claridad en la interpretación de los resultados, el efecto de la adición de fibras y la temperatura en la vida a fatiga se exponen por separado en diferentes subapartados. Para cada tipo de ensayo realizado, las curvas S - N mostradas corresponden al percentil del 75% (curva superior) y 25% (curva inferior) aunque, como se ha comentado, el modelo probabilístico aporta información para cualquier percentil.

3.2.1.- Efecto de la adición de fibras

La Figura 5.a muestra las curvas $S-N$ para el caso del hormigón sin refuerzo (D1) y reforzado (DF1) ambos a temperatura ambiente. Se observa como la mejora de la resistencia a flexotracción debido a la adición de fibras conlleva dos efectos principales: un incremento del límite de fatiga del hormigón, en este caso de 0.2 en D1 a 0.5 para DF1, y un descenso de la sensibilidad de la resistencia a fatiga a incrementos de nivel de tensión. Este último efecto se observa en la Figura 5.a, donde la curva $S-N$ del hormigón reforzado (DF1) tiene una progresión de la vida a fatiga más suave a medida que decrece el nivel de tensión. La distribución y alineamiento de las fibras produce un ligero incremento en la dispersión [4,7] de los resultados. Este efecto se aprecia en un mayor intervalo entre las curvas del 75% y 25% de probabilidad.

En la Figura 5.b, se hace la misma comparación cuando el hormigón está sometido a 100°C. A esa temperatura, se observa cualitativamente, el mismo comportamiento descrito para temperatura ambiente (Figura 5.a). Las diferencias respecto a la Figura 5.a son un decremento del límite de fatiga para DF2 respecto a DF1, que pasa a 0.26 en DF2 desde 0.5 en DF1 y una evolución más suave de la curva $S-N$ para el hormigón D2 si se compara con D1 (límite de fatiga de D2 es 0.09). Ambas diferencias descritas son debidas a efectos térmicos y se explican en el siguiente subapartado. Destacar que a 100°C las curvas $S-N$ para D2 y DF2 son más parecidas entre sí, de manera que la mejora en el comportamiento mecánico proporcionada por la adición de fibras es menos significativa a medida que aumenta la temperatura.

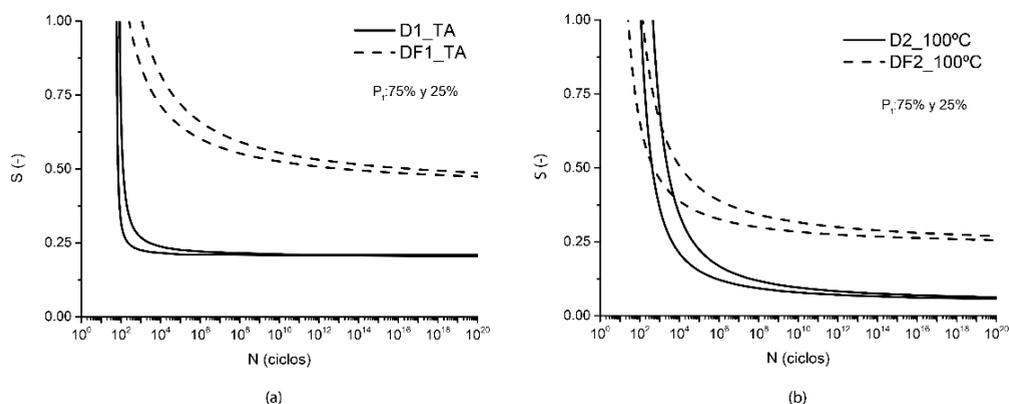


Figura 5. Comparación de refuerzo de fibras en curvas S-N:
 (a) temperatura ambiente, (b) 100 °C.

3.2.2.- Efecto de la temperatura

El efecto de la temperatura es analizado en la Figura 6, tanto para el hormigón sin refuerzo (Figura 6.a) como para el reforzado (Figura 6.b). Los primeros efectos de desconchamiento del hormigón (“spalling”) debidos al efecto de la temperatura fueron observados a 200°C en

algunas probetas de hormigón sin reforzar. Esto ha hecho que para el caso de hormigón sin refuerzo de fibras (D3_200) no se dispongan de resultados suficientes y representativos para determinar las correspondientes curvas *S-N* y se esté ampliando la campaña experimental para poder disponer de ellos en un futuro. Para el caso con refuerzo de fibras (DF3_200) sí se obtienen resultados debido a que las fibras reduce la propagación de daño.

Cuando se incrementa la temperatura del hormigón a 100°C se generan tensiones internas debidas a la presión de vapor procedentes de la evaporación de la humedad interna de la matriz [8,9]. Esas tensiones generan microfisuras que dañan la matriz del material [8,9]. Tanto en el caso de los hormigones de control (Figura 6.a) como en los reforzados con fibras (Figura 6.b), la microfisuración originada por la temperatura provocaron tres efectos: un descenso del límite de fatiga, de 0.2 en D1 a 0.05 en D2 (Figura 6.a) y de 0.5 en DF1, a 0.26 para DF2 y 0.09 en DF3, un incremento de la dispersión de resultados, observados por el aumento de los intervalos entre las curvas del 75% y 25% de probabilidad, y un ablandamiento del material observado en la tendencia más suavizada de las curvas *S-N*.

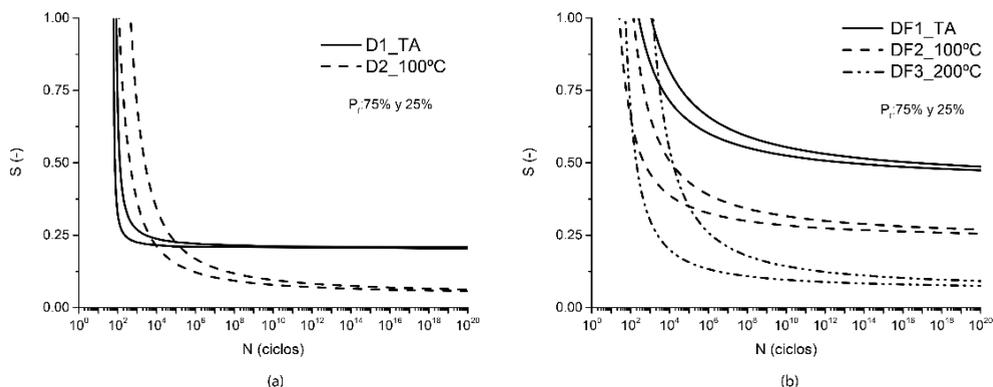


Figura 6. Comparación del efecto de la temperatura: (a) sin refuerzo de fibras, (b) reforzado con fibras.

4.- CONCLUSIONES

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

- La adición de fibras produce un aumento significativo del límite de fatiga del hormigón como consecuencia de la significativa mejora de resistencia a flexotracción que conlleva el refuerzo.
- El incremento de temperatura genera daño en la matriz debido a la presión de vapor interna que produce un descenso del límite de fatiga. Por tanto, a mayor temperatura menor límite de fatiga para el hormigón de control o reforzado.
- La dispersión en las curvas *S-N* se ve afectada por la adición de fibras y por la microfisuración en la matriz debida a efectos térmicos. Esta última tiene mayor repercusión por ser un proceso progresivo con el incremento de temperatura.

- La adición de fibras y la temperatura generan un comportamiento de las curvas S-N más suave debido al incremento de ductilidad de ambos casos.

AGRADECIMIENTOS

A los autores les gustaría agradecer la contribución del Ministerio de Economía y Competitividad de España por la financiación del trabajo realizado mediante el proyecto BIA2016-75431-R.

REFERENCIAS

- [1] Alonso MC, Vera-Agullo J, Guerreiro L, Flor-Laguna V, Sanchez M, Collares-Pereira M. Calcium aluminate based cement for concrete to be used as thermal energy storage in solar thermal electricity plants. *Cem Concr Res* 2016;82:74–86. doi:10.1016/j.cemconres.2015.12.013.
- [2] Caggiano A, Cremona M, Faella C, Lima C, Martinelli E. Fracture behavior of concrete beams reinforced with mixed long/short steel fibers. *Constr Build Mater* 2012;37:832–40. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.060.
- [3] Castillo E, Fernández-Canteli A. Una metodología estadística unificada para modelar el daño a fatiga. 2009.
- [4] Ríos JD, Cifuentes H. Comportamiento en fractura de un hormigón de muy altas prestaciones frente a la adición de fibras metálicas. *An Mecánica La Fract* 34 2017;1:212–9.
- [5] Ríos J, Cifuentes H, Yu R, Ruiz G. Probabilistic Flexural Fatigue in Plain and Fiber-Reinforced Concrete. *Materials (Basel)* 2017;10:767. doi:10.3390/ma10070767.
- [6] Fernández-Canteli a., Przybilla C, Nogal M, Aenlle ML, Castillo E. Profatigue: A software program for probabilistic assessment of experimental fatigue data sets. *Procedia Eng* 2014;74:236–41. doi:10.1016/j.proeng.2014.06.255.
- [7] Lappa ES. High Strength Fibre Reinforced Concrete: Static and fatigue behaviour in bending. 2007.
- [8] Cifuentes, H; Leiva, C; Medina, F; Fernández-Pereira C. Effects of fibers and rice husk ash on properties of heated high-strength concrete. *Mag Concr Res* 2012;64:457–70.

Determinación de las curvas de Wöhler en fatiga a flexotracción de un hormigón de muy...

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

- [9] Zhang, B; Bicanic N. Fracture energy of high-performance concrete at high temperatures up to 450C: the effects of heating temperatures and testing conditions (hot and cold). Mag Concr Res 2006;58:277–88.