

NUEVO CRITERIO DE FALLO EN DEFORMACIONES PARA FATIGA POR COMPRESIÓN DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS

E. Poveda^{1*}, G. Ruiz¹, H. Cifuentes², R. C. Yu¹, X. X. Zhang¹

¹ E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Castilla-La Mancha
Avenida Camilo José Cela s/n, 13071, Ciudad Real

² E.T.S. de Ingenieros, Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos s/n, 41092, Sevilla

*Correo-e: Elisa.Poveda@uclm.es

RESUMEN

Este trabajo propone un nuevo criterio de fallo basado en deformación para fatiga en hormigón reforzado con fibras de acero. Se basa en la conocida relación entre el logaritmo de la velocidad de deformación secundaria por ciclo en fatiga en compresión, y la vida expresada como el logaritmo del número de ciclos hasta el fallo de una probeta. Una integración básica de esta relación permite calcular la deformación crítica que produce la rotura como suma de la máxima deformación en el primer ciclo debida al esfuerzo de compresión máximo, más el incremento de deformación debido al resto de los ciclos hasta rotura. Así, el fallo se produce cuando la deformación alcanza un nivel crítico durante la carga de fatiga. Por el contrario, el material sigue resistiendo mientras que su deformación acumulada sea inferior a la crítica. Este criterio se valida con una serie de ensayos de fatiga de bajo número de ciclos en cinco tipos de hormigones con diferentes cuantías de fibra que comparten la misma matriz de hormigón. Los resultados experimentales muestran que las fibras retrasan el proceso de deformación y deterioro que provoca el fallo. También prueban que existe un contenido de fibra óptimo que maximiza la vida a fatiga.

ABSTRACT

This work proposes a new strain-based fatigue failure criterion for steel-fiber reinforced concrete. It is based on the well-known relation between the secondary strain rate per cycle in compressive fatigue, and the life expressed as the number of cycles at failure. A basic integration of this equation allows for proposing a strain-based failure criterion as the sum of the initial instantaneous strain in the specimen due to the maximum compressive stress, plus the increment of strain due to the cyclic loading and companion creep. Then, a specimen fails when the strain reaches a certain value during the cyclic loading. Contrariwise, it keeps resisting while its accumulated strain is smaller than the critical one. This criterion is validated against a series of low-cycle fatigue tests by the authors on five steel fiber reinforced concretes with various fiber ratios but sharing the same base concrete. The experimental results show that fibers delay the deformation and deterioration process that eventually provoke the failure of the specimen. Our results also prove that it happens to exist an optimum in fiber content that results in the longest fatigue life.

PALABRAS CLAVE: Velocidad de deformación secundaria, hormigón reforzado con fibras, fatiga, compresión.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón reforzado con fibras (HRF) es un material compuesto en el que las fibras se orientan y distribuyen aleatoriamente en la matriz de hormigón. Sus beneficios en tracción están suficientemente probados, debido a que las fibras controlan el crecimiento y propagación de las fisuras por efecto cosido, siendo el volumen de fibra un factor determinante en el comportamiento del HRF. Sin em-

bargo, en compresión no existe consenso en la bibliografía experimental sobre el beneficio de la fibra, especialmente en fatiga. Además la bibliografía existente es escasa y abarca una limitada variedad de composiciones [1, 2] o un número muy reducido de ensayos [3, 4]. Es importante destacar que la fatiga en hormigón presenta una alta dispersión de resultados [1, 5–7], y que además las fibras aumentan la dispersión del número de ciclos que la probeta es capaz

de resistir [2, 6]. Por ello, para obtener una distribución estadística de los ciclos resistidos es necesario recurrir a un número considerable de ensayos [8].

Uno de los parámetros más importantes para identificar el daño en fatiga es la curva de fluencia en fatiga, que representa la evolución de la deformación máxima frente al número de ciclos hasta el fallo. En ella se pueden identificar tres partes, de las cuales la parte intermedia, o rama secundaria, se caracteriza por un aumento lineal de la deformación con respecto al número de ciclos. Su pendiente es la llamada velocidad de deformación secundaria por ciclo [5, 6, 9], $\partial\varepsilon/\partial n$. Ésta permite predecir la vida a fatiga, ya que existe una notoria relación entre el logaritmo de la velocidad de deformación secundaria y el logaritmo del número de ciclos hasta el fallo [2, 5, 9]. Que nosotros sepamos, esta relación no se ha usado para desarrollar criterios de fallo basados en deformación, siendo más usados los criterios de fallo basados en tensiones y en los diagramas $S - N$ o curvas de Whöler, que representan los niveles de tensión, S , frente al logaritmo del número de ciclos hasta el fallo, N .

El artículo está estructurado de la siguiente manera: en la Sección 2 se presenta el criterio de fallo para HRF. La Sección 3 presenta la validación del modelo. En primer lugar, se explican las características de los hormigones utilizados y, posteriormente, la aplicación del modelo. Finalmente, en la Sección 4 resumimos la investigación y extraemos las conclusiones más relevantes.

2. CRITERIO DE FALLO

En esta sección, se presenta un nuevo criterio de fallo en fatiga basado en deformación para HRF. A partir de la relación conocida entre la velocidad de deformación secundaria por ciclo en fatiga por compresión, $\partial\varepsilon/\partial n$, y la vida, expresada como la cantidad de ciclos resistidos, N , por una probeta [9], es decir:

$$\log \frac{\partial\varepsilon}{\partial n} = m + s \log N \quad (1)$$

siendo m y s constantes. Además, recientemente se ha demostrado la independencia de esta relación con el contenido de fibras, siendo por tanto una característica del hormigón base o de su matriz [6]. A partir de la Ec. 1, obtenemos:

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial n} = 10^m N^s \quad (2)$$

multiplicando Ec. 2 por el número de ciclos hasta el fallo, la relación entre el log $\partial\varepsilon/\partial n$ y el log N queda:

$$\varepsilon_2 = \frac{\partial\varepsilon}{\partial n} N = 10^m N^{s+1} \quad (3)$$

en la que ε_2 es la deformación secundaria en fatiga y puede interpretarse como el incremento de deformación como consecuencia de la carga cíclica y el fenómeno de fluencia asociado que provoca el fallo. Este valor se define como el incremento de deformación que la probeta puede alcanzar extendiendo la rama secundaria de la curva $\varepsilon - n$ a las tres fases que presenta. Tomando logaritmos decimales en la Ec. 3:

$$\log \varepsilon_2 = m + (s + 1) \log N \quad (4)$$

A partir de esta ecuación y de un término correspondiente a la deformación máxima en el primer ciclo, se puede formular un criterio de fallo basado en deformaciones. Así la deformación crítica en fatiga es igual a una deformación inicial instantánea, ε_1 , debida al nivel de tensión máxima, más el incremento de deformación que se produce hasta la rotura y que puede ser estimado con la Ec. 3. Luego la ecuación quedaría:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \varepsilon_1 + 10^m N^{s+1} \quad (5)$$

donde ε_c es la deformación crítica de fallo en fatiga y simula que el fallo del material se produce cuando la deformación alcanza ese valor de ε_c durante la carga en fatiga. Por el contrario, el material continúa resistiendo si la deformación acumulada es menor que la crítica, $\varepsilon \leq \varepsilon_c$.

3. VALIDACIÓN DEL MODELO

Para el estudio de la influencia del contenido de fibra en el comportamiento a fatiga [6], se han diseñado y fabricado cinco tipos de hormigones autocompactantes manteniendo la misma matriz de hormigón en todos ellos y variando el contenido de fibra. La Tabla 1 describe la dosificación de la matriz de hormigón. La fibra empleada es de acero HE 55/35 de ArcelorMittal, de longitud 35 mm y esbeltez de 64, con extremos conformados en gancho. Las cuantías de fibra varían desde 0 a 45 kg/m³, en incrementos de 15 kg/m³, identificándolos con la letra H seguido de la cuantía de fibra en kg/m³. La Tabla 2 refleja las propiedades mecánicas de los hormigones utilizados: resistencia a compresión, f_c , módulo elástico, E , coeficiente de Poisson, ν , y densidad, ρ . Obsérvese que el valor del módulo elástico es un poco bajo

debido a la alta presencia de árido calizo en la matriz (36 % en volumen), pero se encuentra dentro del rango típico de hormigones normales (14-42 GPa).

Los ensayos para obtener la resistencia a compresión y los de fatiga se llevaron a cabo sobre probetas cúbicas de 100 mm de lado. Las probetas se sometieron a ensayos de fatiga en compresión con ciclos de carga de amplitud constante a una frecuencia de $f = 1/25$ Hz y un escalón tensional para una previsión de fallo de 1000 ciclos basándonos en las previsiones del Código Modelo [10], con una tensión máxima $\sigma_{max}=0.87f_c$ y una relación de tensiones, R , de 0.27. Se realizaron 12 ensayos de fatiga por

amasada más 6 ensayos para determinar la resistencia a compresión de referencia.

Tabla 1: Dosificación de la matriz de hormigón.

Componentes	Contenido (kg/m ³)
CEM II/B-L 32.5 N	360
Gravilla 0/6	530
Arena silícea 0/2	200
Arena caliza 0/2	975
MasterGlenium SKY 886	6.4
Agua	222

Tabla 2: Propiedades mecánicas de los hormigones utilizados [6].

	H00	H15	H30	H45	H60
f_c (MPa)	33.4 (0.8)	35.1 (0.8)	32.6 (1.1)	30.7 (0.9)	30.1 (1.6)
E (GPa)	18.5 (1.2)	19.4 (0.6)	18.5 (0.5)	18.3 (0.2)	19.0 (0.5)
ν	0.17 (0.01)	0.17 (0.00)	0.18 (0.01)	0.16 (0.01)	0.18 (0.01)
ρ (kg/m ³)	2310 (30)	2310 (10)	2280 (20)	2300 (20)	2280 (10)

3.1. Resultados y Discusión

La Tabla 3 muestra el logaritmo del número de ciclos que han resistido las probetas en los ensayos de fatiga para cada tipo de hormigón, el valor medio y su desviación estándar entre paréntesis. Como puede apreciarse, el hormigón reforzado con fibras tiene un mayor $\log N$, luego el comportamiento a fatiga es mejor que en el hormigón en masa, aunque presenta una mayor dispersión en los resultados. Obsérvese que la vida más larga no se obtiene con la mayor cuantía de fibras, sino con un contenido de fibras intermedio (45 kg/m³), que puede considerarse óptimo para la combinación entre este hormigón base y este tipo de fibra.

Tabla 3: Valor medio del logaritmo del número de ciclos resistidos en fatiga por amasada (desviación entre paréntesis).

H00	H15	H30	H45	H60
2.21(0.29)	2.27(0.20)	2.75(0.41)	2.90(0.58)	2.55(0.50)

La Fig. 1a representa una de las curvas de fluencia en fatiga obtenida en los ensayos, es decir, la evolución de la deformación máxima de cada ciclo, ε , respecto

al número de ciclos (expresado como n/N , donde n es el ciclo actual y N es el número total de ciclos resistidos). En este tipo de curvas, se aprecian tres fases bien diferenciadas. La primera fase consiste en un rápido incremento de la deformación. Posteriormente comienza la segunda fase, que refleja un aumento lineal de la deformación frente al número de ciclos, hasta que finalmente se produce un abrupto incremento de la deformación y se produce la rotura (tercera fase). Además esta figura representa gráficamente el valor de ε_2 . Obsérvese que este valor queda del lado de la seguridad, ya que la deformación en la tercera fase y por tanto a la que se produce la rotura, es superior al valor de ε_2 .

A partir de las curvas de fluencia en fatiga en el tramo secundario, obtenemos la velocidad de deformación secundaria por ciclo. La Fig. 1b representa el logaritmo de la velocidad de deformación secundaria por ciclo respecto al logaritmo del número de ciclos resistidos. Como puede observarse, todos los puntos se ajustan perfectamente a una misma recta que responde a la Ec. 1 con un coeficiente de regresión $r=0.97$. Obsérvese que esta relación es independiente de la cuantía de fibra y que sólo depende de la matriz [6].

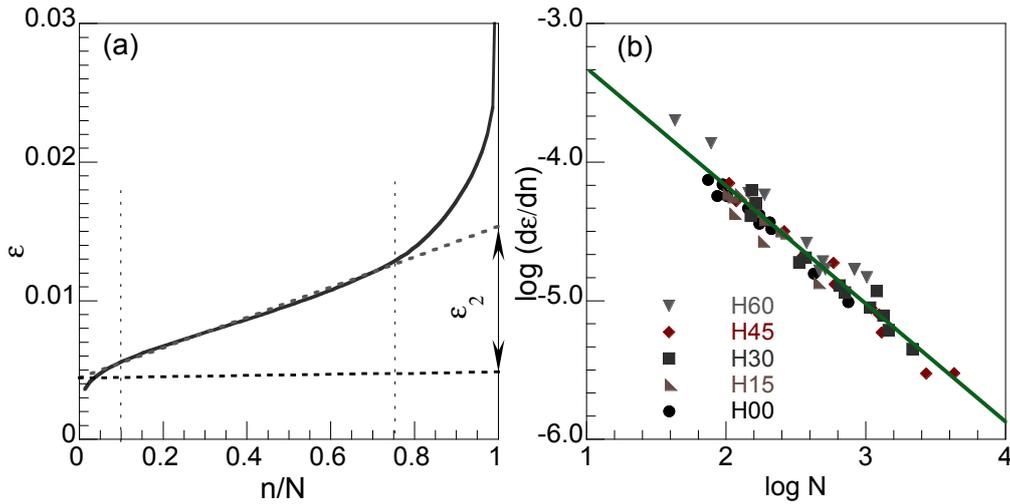


Figura 1: a) Curva de fluencia en fatiga y b) ajuste de regresión de los ensayos experimentales del logaritmo de la velocidad de deformación secundaria por ciclo respecto al logaritmo del número de ciclos.

Extrapolando el criterio de fallo a $N=1$, obtenemos que 10^m coincide aproximadamente con el incremento de deformación que causaría el fallo de la probeta durante el primer ciclo. Esta observación se puede verificar con nuestros resultados experimentales. La Tabla 4 muestra la deformación máxima promedio durante el primer ciclo de los ensayos ϵ_1 para cada tipo de hormigón y compara la suma $\epsilon_1 + 10^m$ con la deformación experimental media correspondiente a la resistencia de referencia, es decir, ϵ_c correspondiente a f_c , que sería la misma que la deformación crítica ϵ_c en un ensayo de fatiga de sólo un ciclo. Como podemos ver los valores están muy cercanos, luego el criterio de fallo se valida también para el caso asintótico de fatiga a un sólo ciclo.

Tabla 4: Comparación valores experimentales y dados por el modelo para $N=1$.

	ϵ_1 [%]	$\epsilon_1 + 10^m$ [%]	ϵ_c [%]
H00	0.38	0.71	0.70
H15	0.37	0.70	0.64
H30	0.33	0.66	0.62
H45	0.35	0.68	0.66
H60	0.39	0.72	0.77

La Fig. 2a muestra el ajuste realizado para ϵ_2 con los coeficientes m y s del ajuste original (ver Ec. 3)

mientras que la Fig. 2b muestra el criterio de fallo por fatiga basado en deformación para este hormigón según la Ec. 5.

4. CONCLUSIONES

Este artículo propone un nuevo criterio de fallo en deformaciones para la fatiga de HRF en compresión. Para validarlo, hemos analizado las curvas $\epsilon - N$ de una serie de HRFs realizada con el mismo hormigón base y cinco cuantías de fibras distintas. A partir de esta relación, hemos propuesto un criterio de fallo que expresa la deformación de fatiga como suma de dos términos: la deformación instantánea debida a la tensión máxima en el primer ciclo, ϵ_1 , más el incremento de deformación debido a la carga cíclica y su fluencia asociada, que se puede estimar como $\epsilon_2 = 10^m N^{s+1}$. El fallo en fatiga no se produce hasta que la deformación en el ensayo coincide con la deformación crítica, $\epsilon = \epsilon_c = \epsilon_1 + \epsilon_2$. Este criterio evidencia que el fallo se debe a que la deformación ha llegado a un valor crítico que la matriz ya no puede soportar (que implica deformación mecánica y fluencia). Por otro lado, las fibras tienen un efecto beneficioso, ya que mejoran el comportamiento a fatiga.

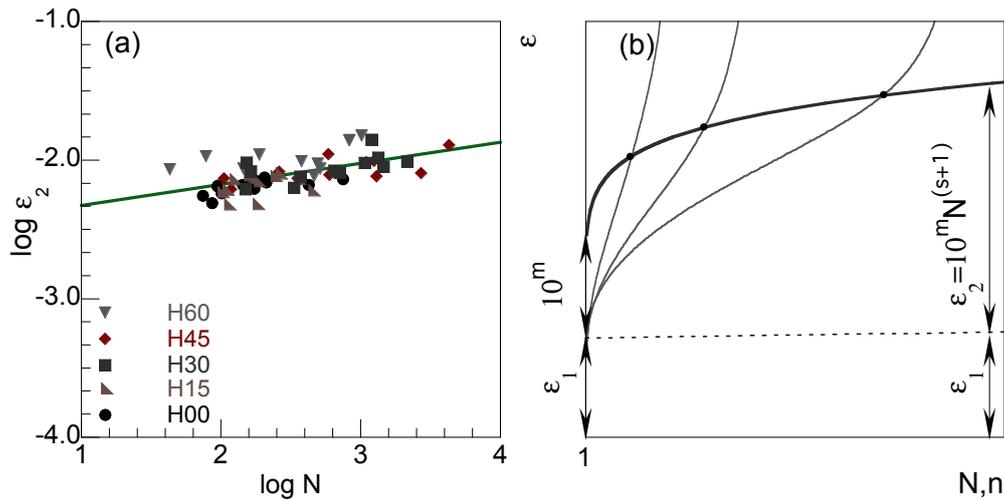


Figura 2: a) Ajuste de ε_2 para los valores experimentales y b) criterio de fallo.

REFERENCIAS

[1] A. Medeiros, X.X. Zhang, G. Ruiz, R.C. Yu, and M.S.L. Velasco. Effect of the loading frequency on the compressive fatigue behavior of plain and fiber reinforced concrete. *International Journal of Fatigue*, 70:342–350, 2015.

[2] P. B. Cachim, J.A. Figueiras, and P.A.A. Pereira. Fatigue behavior of fiber-reinforced concrete in compression. *Cement and Concrete Composites*, 24(2):211–217, 2002.

[3] M. Grzybowski and C. Meyer. Damage accumulation in concrete with and without fiber reinforcement. *American Concrete Institute Journal*, 90(6):594–604, 1993.

[4] T. Paskova and Meyer C. Low-cycle fatigue of plain and fiber reinforced concrete. *American Concrete Institute Journal*, pages 273–285, 1997.

[5] CEB. Fatigue of concrete structures, State of the Art Report. Technical report, *Bulletin d'Information No. 188*, Comité Euro-International du Béton, Case Postale, Lausanne, 1988.

[6] E. Poveda, G. Ruiz, H. Cifuentes, R. C Yu, and X.X Zhang. Influence of the fiber content on the compressive low-cycle fatigue behavior of self-compacting ssrc. *International Journal of Fatigue*, 101:9–17, 2017.

[7] M. Tarifa, X. X. Zhang, G. Ruiz, and E. Poveda. Full-scale fatigue tests of precast reinforced concrete slabs for railway tracks. *Engineering Structures*, 100:610–615, 2015.

[8] E. Castillo and A. Fernández-Cantelli. *A unified statistical methodology for modeling fatigue damage*. Springer Science, 2009.

[9] P.R. Sparks and J.B. Menzies. The effect of rate of loading upon the static and fatigue strengths of plain concrete in compression. *ACI*, 25:83:73–80, 1973.

[10] *Model Code 2010, Final Draft*. fib Bulletin N.65 and 66, EPFL Lausanne, 2012.