

Exploración de los mecanismos de daño en hormigón reforzado con fibras bajo fatiga por flexión mediante el análisis de las curvas de fluencia cíclica

Exploring damage mechanisms in fiber-reinforced concrete under flexural fatigue through the analysis of cyclic creep curves

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

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

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

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

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

RESUMEN

En este trabajo se estudian las curvas de fluencia por fatiga en hormigón reforzado con fibras bajo fatiga por flexión. En el caso más general, se observa que dichas curvas están formadas por dos secciones en forma de 'S', asociadas a los dos mecanismos de daño que intervienen: fatiga de la matriz y fatiga de la unión fibras-matriz. Además, se concluye que la velocidad de apertura de boca de fisura ($dCMOD/dn$) permite predecir con precisión el número de ciclos para el que se agotan ambos mecanismos. Por tanto, este parámetro de daño, unido a otros, contribuye a explicar la gran variabilidad de resultados observada en los ensayos de fatiga.

ABSTRACT

In this work, the fatigue creep curves of fiber-reinforced concrete under flexural fatigue are studied. In the most general case, these curves are observed to consist of two S-shaped sections, associated with the two damage mechanisms involved: matrix fatigue and fiber-matrix bond fatigue. Furthermore, it is concluded that the crack opening rate ($dCMOD/dn$) accurately predicts the number of cycles required for both mechanisms to be exhausted. Therefore, this damage parameter, together with others, helps to explain the high variability of results observed in fatigue tests.

PALABRAS CLAVE: hormigón reforzado con fibras, fatiga, flexión, curva de fluencia cíclica.

KEYWORDS: fiber-reinforced concrete, fatigue, bending, cyclic creep curve.

1. Introducción

La fatiga en hormigón reforzado con fibras es un campo de investigación muy activo en la actualidad. Esto viene motivado por varios aspectos. Por un lado, por el desarrollo de los hormigones reforzados con fibras (HRF). El

comportamiento mecánico de este material se ha optimizado en las últimas décadas. Por ejemplo, los HRF de altas prestaciones alcanzan resistencias residuales muy elevadas en flexión (endurecimiento por deformación) con

contenidos relativamente bajos de fibras [1,2]. Por otro lado, la fatiga cada vez está ganando más importancia como acción de diseño, a medida que se utiliza hormigón más resistente y las estructuras son más ligeras. Un caso son las torres de aerogenerador de hormigón, en las que la fatiga es la acción crítica.

Sin embargo, hay una cuestión problemática al investigar fatiga de hormigón: la gran disparidad de resultados en los ensayos. Es habitual que, en series de probetas idénticas sometidas a ensayos de fatiga de alto número de ciclos bajo los mismos niveles de tensión, la dispersión de la vida a fatiga de la muestra sea de dos o más órdenes de magnitud [3]. Esto conduce a que es preciso realizar un gran número de ensayos para caracterizar correctamente el comportamiento a fatiga de un cierto hormigón. Además, esta incertidumbre en la respuesta a fatiga tiene su reflejo en unos códigos estructurales muy conservadores. Por ejemplo, según el EC-2 [4] la resistencia de diseño a fatiga en un hormigón con f_{ck} de 80 MPa es de tan solo 36 MPa [5].

Por otra parte, los mecanismos de daño por fatiga en hormigón son complejos y requieren un estudio en profundidad. En el caso particular del HRF sometido a fatiga por flexión, se distinguen dos mecanismos principales: fatiga de la matriz y fatiga de la unión fibras-matriz [1,6]. En el primero, las cargas cíclicas son resistidas por la propia matriz. Cuando la matriz se fractura, las cargas pasan a ser soportadas por las fuerzas de adhesión entre las fibras y la matriz. No obstante, estos dos mecanismos no siempre intervienen, lo que depende de factores como la resistencia residual a flexión del HRF, los niveles de las cargas de fatiga, la prefisuración o no de las muestras, etc. Aunque varios autores han señalado este doble comportamiento, todavía no se ha analizado en profundidad los factores de los que depende (niveles de tensión de fatiga, contenido de fibras, resistencia de la matriz de hormigón, resistencia residual a

flexión, etc.). Esto permitiría establecer en qué condiciones se produce y cómo controlarlo.

Una herramienta que permite estudiar el daño por fatiga durante un ensayo son las curvas de fluencia cíclica o curvas de fluencia por fatiga. En fatiga por flexión, estas curvas representan el CMOD (apertura de la boca de la fisura) máximo en cada ciclo frente al número de ciclos [7,8]. Normalmente, tienen forma de 'S' con tres tramos diferenciados (Figura 1). El tramo central, con pendiente aproximadamente constante, es el más extenso y el que gobierna el progreso del daño.

El objetivo de este trabajo es doble. En primer lugar, estudiar los mecanismos de daño en HRF sometido a fatiga por flexión a través de las curvas de fluencia por fatiga. En segundo lugar, obtener parámetros de daño que tengan una buena correlación con la vida a fatiga. De esta forma, sería posible ajustar expresiones para estimar la vida a fatiga, reduciendo la variabilidad de resultados en ensayos iguales.

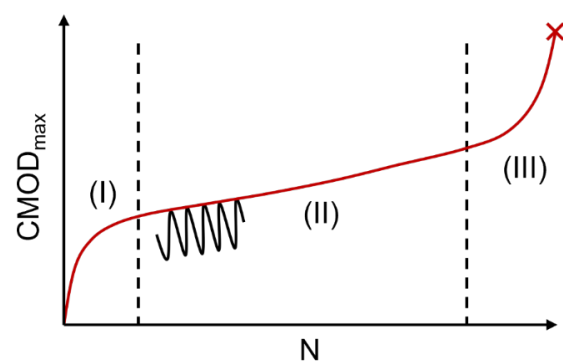


Figura 1. Curva de fluencia por fatiga.

2. Programa experimental

2.1 Materiales y muestras

Se han fabricado 3 series de hormigón reforzado con fibras de acero. La Tabla 1 contiene las dosificaciones. Las cantidades de los componentes son iguales en todas las series, con excepción del contenido de fibras, que es del 0.3%, 0.6% y 1% en las series A1, A2 y A3, respectivamente. Las fibras de acero son del

modelo Dramix RC-80/30-CP, producidas por Bekaert (Zwevegem, Bélgica). Estas fibras tienen extremos en forma de gancho, 30 mm de longitud y una esbeltez de 79.

Se han fabricado un total de 48 probetas prismáticas con dimensiones de 75×75×300 mm³; 16 por serie. En todas las probetas se ha practicado una entalla central de 12.5 mm de profundidad (h/6). Adicionalmente, se han hormigonado probetas cilíndricas estándar de Ø150×300 mm² para caracterizar cada serie. Todas las probetas se han almacenado en una cámara climática a 20 °C de temperatura y 95% de humedad durante 1 año.

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

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

2.2 Caracterización del hormigón

Los tres tipos de HRF son autocompactantes. Para determinar su consistencia, se han realizado ensayos de escurrimiento del hormigón fresco [9]. Se observa que, a medida que aumenta la cantidad de fibras, se reduce la consistencia. El diámetro del hormigón vertido oscila entre 770 mm (serie A1) y 650 mm (serie A3). El tiempo t_{500} varía entre 4.8 s (serie A1) y 5.5 s (serie A3).

En cuanto a las propiedades del hormigón endurecido, la resistencia media a compresión es de 106.7 (± 2.2) MPa, mientras que el módulo de elasticidad medio es de 45.4 (± 0.8) GPa. No se han observado variaciones significativas de estos parámetros entre las distintas series.

En cuanto a la resistencia estática a flexión, determinada según EN 14651 [10], la Tabla 2 contiene los valores de la tensión correspondiente al límite de proporcionalidad (f_{LOP}) y la tensión última (σ_{ult}). Esta última se define como la mayor tensión alcanzada a lo largo de todo el ensayo de flexión, incluyendo la fase post-fisuración. Se aprecia que en todas las series $\sigma_{ult} > f_{LOP}$; es decir, la resistencia residual de la unión fibras-matriz es mayor que la resistencia de la matriz.

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	7.36	8.78	7.02	1.40
A2	8.35	11.78	9.42	1.88
A3	10.45	19.65	15.72	3.14

2.3 Ensayos de fatiga por flexión

Se han realizado 12 ensayos de fatiga por flexión de alto número de ciclos por serie, haciendo un total de 36 ensayos. En cada serie, los niveles de tensión de fatiga se han mantenido 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 han mantenido constantes. La Tabla 2 contiene los valores de las tensiones máxima y mínima de los ciclos de fatiga ($\sigma_{fat,min}$ y $\sigma_{fat,max}$). La frecuencia de aplicación de los ciclos es de 5 Hz.

Los parámetros que se han registrado en los ensayos son la carga, el desplazamiento relativo, el CMOD (apertura de boca de fisura) y el número de ciclos hasta el fallo.

3. Resultados y análisis

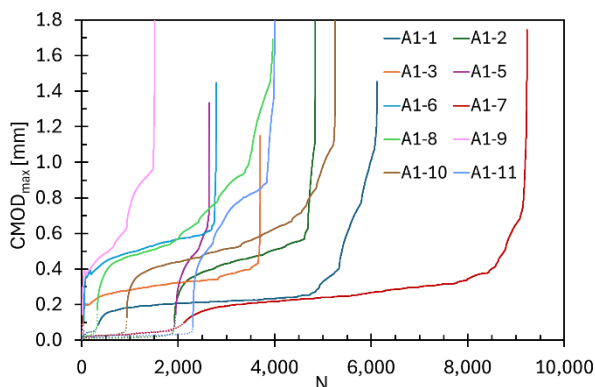
3.1 Curvas de fluencia cíclica

Como se ha comentado, las curvas de fluencia por fatiga relacionan el CMOD máximo en cada ciclo con el número de ciclos. En la Figura 2 se

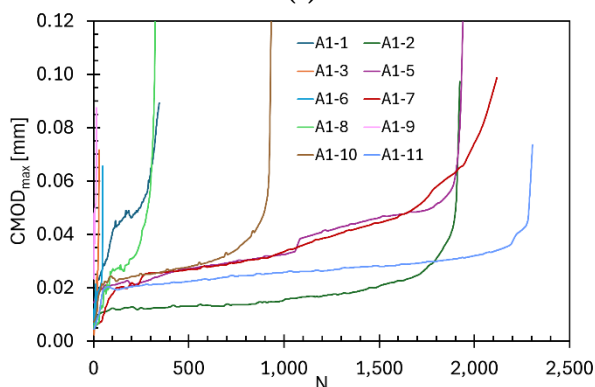
muestran las curvas de fluencia por fatiga en todos los ensayos, separados por series. Además, la Tabla 3 contiene los valores de las vidas a fatiga.

Tabla 3. Vidas a fatiga.

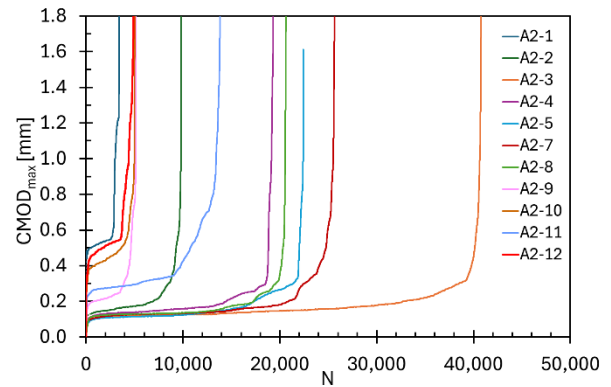
Ensayo	A1	A2	A3
1	6121	3522	18889
2	4838	10316	918
3	3696	40858	30
4	43	19401	3176
5	2642	22481	12888
6	2791	1000000	7195
7	9226	26308	15225
8	3956	20746	12
9	1512	5156	31
10	5263	5068	3090
11	4015	14233	3743
12	48	5024	2219



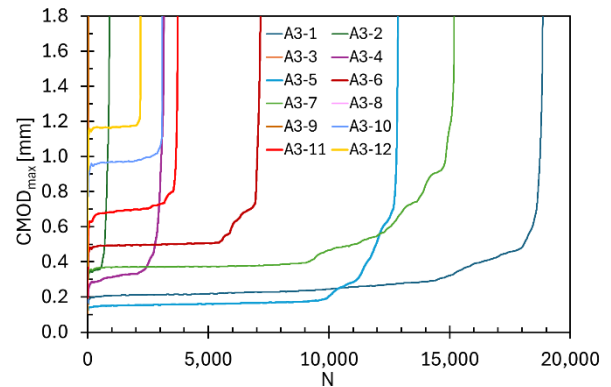
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2. Curvas de fluencia por fatiga: (a) serie A1; (b) vista de detalle en serie A1; (c) serie A2; (d) serie A3.

La Figura 3a revela que en los ensayos de la serie A1 hay una fase inicial (línea de puntos) con un comportamiento de fatiga diferente al del resto de la curva. Se concluye que en estas probetas intervienen dos mecanismos de daño diferentes. En la vista de detalle de la Figura 3b, se aprecia que esta fase inicial también tiene la forma característica en 'S' de las curvas de fluencia por fatiga. No obstante, este mecanismo se agota (es decir, se produce la rotura de la matriz de hormigón por tracciones excesivas) con valores de CMOD bajos, de alrededor de 0.05 mm.

En los ensayos de la serie A2 (Figura 3c), esa fase inicial de fatiga solo aparece en algunos casos, teniendo además una extensión muy reducida (menor de 50 ciclos). Finalmente, en ningún ensayo de la serie A3 (Figura 3d) se observa el doble mecanismo de daño.

Con respecto a las vidas a fatiga recogidas en la Tabla 3, se advierte una gran variabilidad de resultados, como es habitual en fatiga de

hormigón. Los valores de cada serie se ajustan bien a una función de distribución de Weibull de dos parámetros [8,11]. Conforme al ajuste de Weibull, la vida a fatiga característica ($p = 0.50$) es de 1528, 12764 y 1135 ciclos para las series A1, A2 y A3, respectivamente. Estos resultados se pueden consultar con más detalle en [1,12].

3.2 Curva de fluencia cíclica general para HRF sometido a fatiga por flexión

Los resultados de la serie A1 se corresponden con el caso más genérico de las curvas de fluencia cíclica en FRC bajo fatiga por flexión. En la Figura 3 se muestran de nuevo dichas curvas, aunque esta vez representando el número de ciclos en términos relativos.

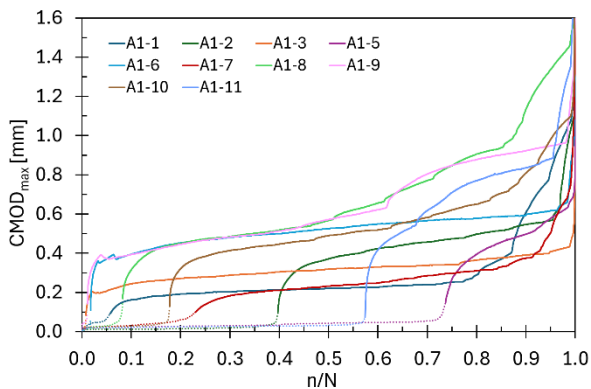


Figura 3. Curvas de fluencia por fatiga en serie A1, representando N en términos relativos.

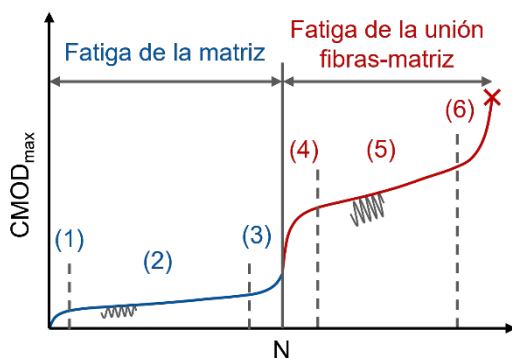


Figura 4. Curva de fluencia por fatiga general en HRF.

En la curva de fluencia por fatiga general, se distinguen dos fases, cada una gobernada por un mecanismo de daño diferente. La primera fase se denomina fatiga de la matriz (en azul en la Figura 4). Consiste en el desarrollo de

microfisuras dispersas en torno al borde de la entalla. Esto produce un daño perpetuo en el hormigón (deformaciones permanentes), aunque dicho daño no está concentrado en una fisura principal, sino repartido en forma de microfisuración. En este caso, las cargas de fatiga son resistidas por la matriz de hormigón. Debido a las deformaciones tan bajas ($CMOD < 0.05$ mm), las fibras apenas intervienen. La curva de la fatiga de la matriz tiene forma de 'S', y se distinguen tres tramos: (1) nacimiento de microfisuras distribuidas en la zona del borde de la entalla, (2) estabilización y crecimiento gradual de las microfisuras, y (3) convergencia en una macrofisura principal que provoca la rotura de la matriz de hormigón.

Cuando se produce la fractura de la matriz, comienza la segunda fase, llamada fatiga de la unión fibras-matriz (en rojo en la Figura 4). En este punto, las cargas cíclicas se soportan por las fuerzas de adherencia entre la matriz y las fibras; en particular, las que 'cosen' la macrofisura principal. Este mecanismo de daño es mucho más dúctil que el anterior, caracterizado por niveles de CMOD altos (> 0.1 mm). La curva de fatiga de la unión fibras-matriz también tiene forma de 'S', aunque en este caso los tres tramos se corresponden con fenómenos distintos: (4) transferencia de tensiones de tracción entre la matriz, que se agota, y la unión fibras-matriz, (5) estabilización de la macrofisura principal y agotamiento progresivo de las fuerzas de adherencia fibras-matriz, y (6) desestabilización de la macrofisura por fuerzas de adherencia insuficientes y fallo global de la probeta.

Para que se produzca el caso general de la curva de fluencia por fatiga, se aprecia que se tienen que cumplir dos condiciones. En primer lugar, la tensión máxima de fatiga debe ser menor que la resistencia a primera fisura ($\sigma_{fat,max} < f_{LOP}$). La resistencia a primera fisura se corresponde aproximadamente a la tensión en el límite de proporcionalidad según el ensayo de flexión en tres puntos [10]. En segundo lugar, la tensión máxima de fatiga debe ser inferior a la

tensión residual post-fisuración ($\sigma_{fat,max} < \sigma_{res}$). Cuando la matriz de hormigón se fractura, la tensión residual que la unión fibras-matriz puede soportar tiene que ser mayor que la tensión máxima de los ciclos de fatiga. Cabe destacar que, si no se produce ablandamiento por deformación, esta condición se cumple automáticamente siempre que se cumpla la primera. En la Figura 5 se muestra un ejemplo del cumplimiento de estas dos condiciones, comparando la resistencia estática (en azul) con los ciclos de fatiga (en rojo).

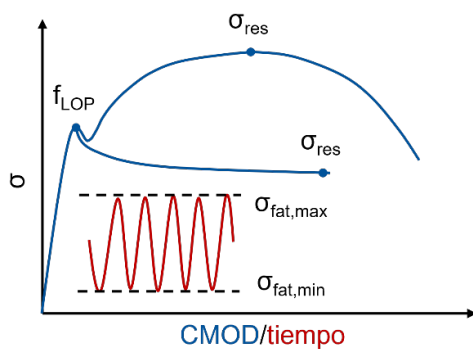


Figura 5. Condiciones para el caso general de curva de fluencia por fatiga, comparando resistencia estática (en azul) y ciclos de fatiga (en rojo).

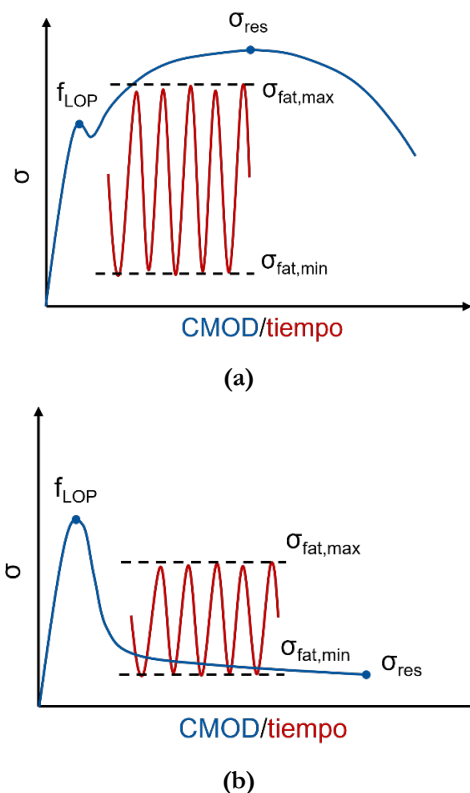


Figura 6. Casos particulares de curvas de fluencia por fatiga.

Si no se verifican la dos condiciones descritas, entonces solo intervendrá un mecanismo de daño por fatiga. Existen dos casos particulares. El primero se produce cuando la tensión máxima de fatiga es menor que la tensión residual post-fisuración, pero es mayor que la resistencia a primera fisura ($f_{LOP} < \sigma_{fat,max} < \sigma_{res}$). Cuando esto ocurre, la matriz se fractura inmediatamente tras el primer ciclo, por lo que solo se observa fatiga de la unión fibras-matriz (Figura 6a). El segundo caso sucede cuando la tensión máxima de fatiga es menor que la resistencia a primera fisura, pero es mayor que la tensión residual post-fisuración ($\sigma_{res} < \sigma_{fat,max} < f_{LOP}$). En esta situación, cuando la matriz de hormigón se fractura después de un cierto número de ciclos (fatiga de la matriz), las fuerzas de adherencia fibras-matriz no pueden resistir las cargas cíclicas y la probeta falla (Figura 6b).

3.3 Vida a fatiga

Teniendo en cuenta los dos mecanismos de daño que intervienen en la fatiga por flexión del HRF, la vida a fatiga total (N) se puede dividir en dos partes: la correspondiente a la fatiga de la matriz (N_1) y la relativa a la fatiga de la unión fibras-matriz (N_2). La Tabla 4 contiene N_1 y N_2 para los ensayos de la serie A1. Como se observa en la Tabla 2, en esta serie se cumplen las dos condiciones para que se produzca el caso general de la curva de fluencia por fatiga ($\sigma_{fat,max} < f_{LOP}$ y $\sigma_{fat,max} < \sigma_{res}$).

Sin embargo, en las probetas de las series A2 y A3 la tensión máxima de fatiga es mayor que la resistencia a primera fisura ($\sigma_{fat,max} > f_{LOP}$). Por tanto, en estas series se da el caso particular de la Figura 6a, produciéndose únicamente la fatiga de la unión fibras-matriz ($N_1 = 0$). El hecho de que en algunos ensayos de la serie A2 se observen pequeños segmentos de fatiga de la matriz se explica porque $\sigma_{fat,max}$ es tan solo un 13% mayor que f_{LOP} , y por la propia dispersión de la resistencia estática a flexión. En cambio, en la serie A3 $\sigma_{fat,max}$ es un 50% superior a f_{LOP} , lo que

hace muy improbable que se observe fatiga de la matriz.

Tabla 4. Vidas a fatiga en la serie A1, divididas en fatiga de la matriz (N_1) y fatiga de la unión fibras-matriz (N_2).

Ensayo	N_1	N_2
1	346	5775
2	1924	2914
3	31	3665
4	27	16
5	1948	694
6	49	2742
7	2118	7108
8	327	3629
9	17	1495
10	934	4329
11	2305	1710
12	42	6

3.4 Relación entre la velocidad de apertura de boca de fisura y la vida a fatiga

En las curvas de fluencia por fatiga, los tramos centrales, numerados como (2) y (5) en la Figura 4, son los más extensos y los que por ende gobiernan el progreso del daño por fatiga. Dichos tramos, de pendiente aproximadamente constante, se pueden caracterizar a través de la pendiente de su recta de ajuste. Este parámetro se conoce como velocidad de apertura de boca de fisura ($dCMOD/dn$), y representa el incremento de CMOD que se produce en cada ciclo de fatiga. En la curva general, se distinguen dos velocidades de apertura de boca de fisura: la asociada a la fatiga de la matriz, denominada $(dCMOD/dn)_1$, y la correspondiente a la fatiga de la unión fibras-matriz, nombrada como $(dCMOD/dn)_2$. Esto se representa en la Figura 7.

La Figura 8 muestra la correlación en escala logarítmica entre la velocidad de apertura de boca de fisura y la vida a fatiga, distinguiendo

entre los dos mecanismos de daño que intervienen. En la Figura 8a se representan las rectas de regresión lineal de las series A1 y A2, ya que en los ensayos de la serie A3 no se produce fatiga de la matriz. En cambio, en la Figura 8b se representan las rectas de ajuste de las tres series.

La Figura 8 revela que existe una fuerte correlación entre la velocidad de apertura de boca de fisura y la vida a fatiga. Valores elevados de $dCMOD/dn$ conducen a N reducidas, y viceversa. Estos buenos ajustes se observan en ambos mecanismos de fatiga y en todas las series, con valores del coeficiente R^2 superiores a 0.80.

Otra conclusión interesante es que aparentemente los dos mecanismos son independientes. De esta forma, $(dCMOD/dn)_1$ permite estimar la vida a fatiga desde el inicio hasta la rotura de la matriz de hormigón (N_1), mientras que $(dCMOD/dn)_2$ permite estimar la vida a fatiga desde la rotura de la matriz hasta el fallo total del elemento (N_2). Las figuras contienen las expresiones que relacionan $dCMOD/dn$ y N en cada caso.

La relación entre $dCMOD/dn$ y N en fatiga por flexión del hormigón ha sido señalada por otros autores anteriormente [8,13]. No obstante, hasta la fecha esta correlación no se había estudiado en los dos mecanismos de daño que intervienen en la fatiga por flexión del HRF. En este trabajo se verifica que la relación entre $dCMOD/dn$ y N es válida tanto en fatiga de la matriz como fatiga de la unión fibras-matriz.

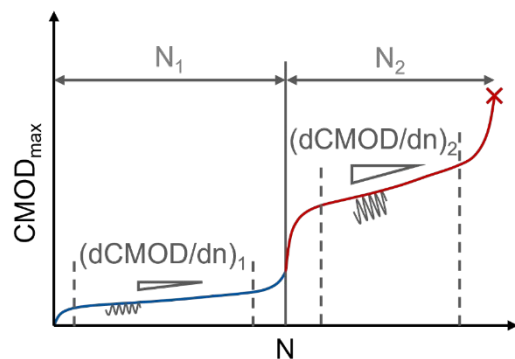


Figura 7. Velocidades de apertura de boca de fisura en la curva de fluencia por fatiga general.

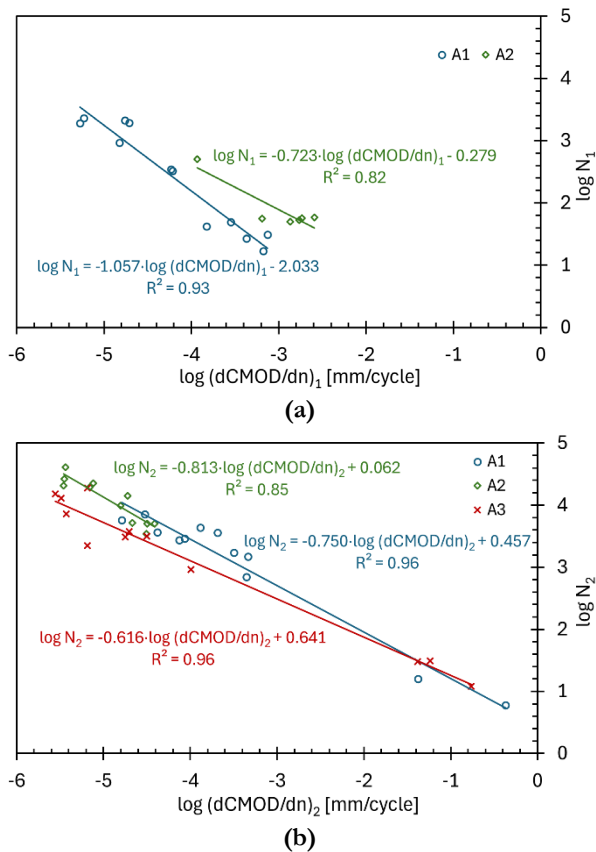


Figura 8. Regresión lineal en escala logarítmica entre $dCMOD/dn$ y N : (a) en fatiga de la matriz, (b) en fatiga de la unión fibras-matriz.

3.5 Incremento de $CMOD$ entre las dos fases de fatiga

En los ensayos de la serie A1, en los que se observa el caso general de las curvas de fluencia por fatiga, se ha encontrado una buena correlación entre el incremento de $CMOD$ que se produce entre las dos fases de fatiga ($\Delta CMOD_{1-2}$) y el número de ciclos de fatiga de la unión fibras-matriz (N_2). El parámetro $\Delta CMOD_{1-2}$ se define como la diferencia de apertura de boca de fisura entre el final del tramo (4) y el comienzo del tramo (3), según la curva general de la Figura 4. Este parámetro se representa en la Figura 9.

En la Figura 10 se muestra la regresión lineal entre los dos parámetros. Se aprecia que un mayor ‘salto’ de $CMOD$ entre las dos fases de fatiga conduce a una menor número de ciclos soportado por la unión fibras-matriz, y viceversa. Esto se explica por lo siguiente:

cuando la matriz de hormigón se fractura y se produce la transferencia de tensiones de tracción hacia la unión fibras-matriz, hay un cierto valor de estabilización del $CMOD$ (final del tramo (4)). Este valor varía entre probetas, ya que entre otros aspectos depende de la distribución de fibras. Se asume que, cuanto mayor es el $CMOD$ de estabilización, menor es la sección resistente remanente y por tanto menor es la vida a fatiga esperable.

Se advierte que esta correlación es más débil que la observada entre $dCMOD/dn$ y N , con un coeficiente R^2 de alrededor de 0.6. En cualquier caso, se trata de un parámetro de daño más, extraído de las curvas de fluencia por fatiga, que ayuda a entender la variabilidad del fenómeno.

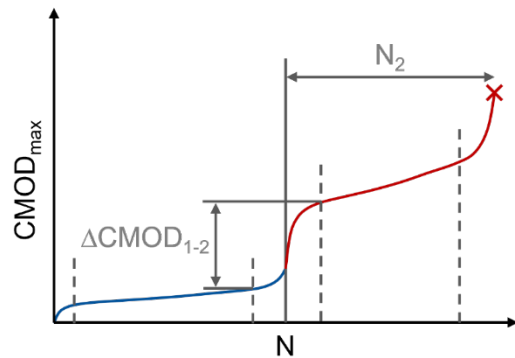


Figura 9. Identificación del incremento de $CMOD$ entre las dos fases de fatiga en la curva de fluencia por fatiga general.

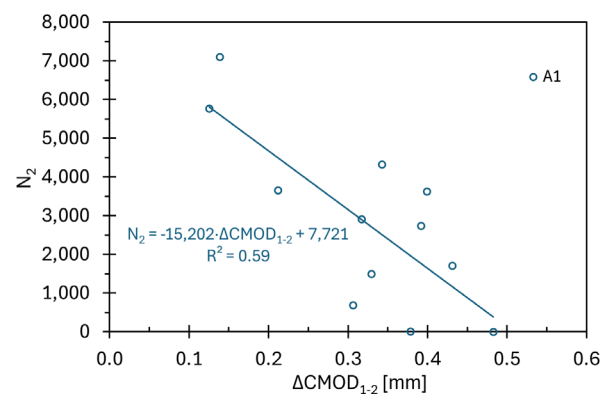


Figura 10. Regresión lineal entre $\Delta CMOD_{1-2}$ y N_2 .

5. Conclusiones

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

En primer lugar, el comportamiento en fatiga por flexión del HRF en el caso más general comprende dos mecanismos de daño: fatiga de la matriz y fatiga de la unión fibras-matriz.

En segundo lugar, y de acuerdo con lo anterior, la curva de fluencia por fatiga general está formada por dos secciones, ambas con forma de 'S', y asociadas a sendos mecanismos de daño. Para que se observe la curva general, se deben cumplir dos condiciones: la tensión máxima de fatiga debe ser inferior a la resistencia a primera fisura y a la tensión residual post-fisuración, respectivamente. Si una de las dos condiciones no se verifica, entonces solo intervendrá un mecanismo de daño y por tanto solo se observará una sección en 'S': bien la de fatiga de la matriz, bien la de fatiga de la unión fibras-matriz.

En tercer lugar, se aprecia una fuerte correlación entre la velocidad de apertura de boca de fisura y la vida a fatiga, de manera que, cuanto mayor es $dCMOD/dn$, menor es N . En el caso de la curva de fluencia por fatiga general, esta relación se verifica de forma independiente para fatiga de la matriz y fatiga de la unión fibras-matriz. Se concluye que $(dCMOD/dn)_1$ permite estimar la vida a fatiga desde el inicio del ensayo hasta la rotura de la matriz, mientras que $(dCMOD/dn)_2$ predice la vida a fatiga desde la rotura de la matriz hasta el fallo final del elemento.

Finalmente, se han determinado otros parámetros de daño extraídos de las curvas de fluencia por fatiga, como el incremento de $CMOD$ entre las dos fases de fatiga, que muestran una buena correlación con la vida a fatiga.

Agradecimientos

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

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

Referencias

- [1] Á. Mena-Alonso, D.C. González, J. Mínguez, M.A. Vicente, Size effect on the flexural fatigue behavior of high-strength plain and fiber-reinforced concrete, *Constr Build Mater* 411 (2024) 134424. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134424>.
- [2] S.I. Lee, J.H. Kim, S.J. Han, H. Jeong, S.Y. Seo, K. Su Kim, Tension-softening behavior of UHPFRC based on fracture energy, *Structures* 38 (2022) 361–374. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.086>.
- [3] J.J. Ortega, G. Ruiz, R.C. Yu, N. Afanador-García, M. Tarifa, E. Poveda, X. Zhang, F. Evangelista, Number of tests and corresponding error in concrete fatigue, *Int J Fatigue* 116 (2018) 210–219. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.06.022>.
- [4] European Committee for Standardisation (CEN), EN 1992-1-1:2023. Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures, 2023.
- [5] C. Ríos, J.C. Lancha, M.Á. Vicente, Fatigue in Structural Concrete According to the New Eurocode 2, *Hormigón y Acero* (2023). <https://doi.org/10.33586/hya.2023.310>.
- [6] G. Gebuhr, S. Anders, M. Pise, M. Sahril, D. Brands, J. Schröder, Deterioration development of steel fibre reinforced high performance concrete in low-cycle fatigue, in: *Advances in Engineering Materials, Structures and Systems: Innovations, Mechanics and Applications*, CRC Press, 2019: pp. 1444–1449.

<https://doi.org/10.1201/9780429426506-249>.

- [7] G.A. Plizzari, S. Cangiano, S. Alleruzzo, The fatigue behaviour of cracked concrete, *Fatigue Fract Eng Mater Struct* 20 (1997) 1195–1206. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1997.tb00323.x>.
- [8] D.M. Carlesso, A. de la Fuente, S.H.P. Cavalaro, 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>.
- [9] UNE-EN 12350-8. Testing fresh concrete. Part 8: Self-compacting concrete. Slump-flow test, 2011.
- [10] 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.
- [11] 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>.
- [12] Á. Mena-Alonso, Flexural fatigue of high-strength plain and fiber-reinforced concrete: influence of mesostructure and study of size effect [PhD Thesis], University of Burgos, 2023. <https://doi.org/10.36443/10259/7855>.
- [13] 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>.