

## FLUENCIA EN HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRAS EN ESTADO FISURADO

Monetti Diego H., Zerbino Raúl L., Giaccio Graciela M

Departamento de Construcciones, Facultad de Ingeniería, UNLP.  
Calle 3 N° 58, La Plata, C.P. 1900  
dmonetti@ing.unlp.edu.ar

### INTRODUCCIÓN

El uso de Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) en los últimos tiempos ha alcanzado un avance significativo incorporando nuevas aplicaciones. Sin embargo, un aspecto que genera controversias al considerar la vida en servicio es en qué casos pueden adquirir relevancia las deformaciones diferidas en estado fisurado. Ante esto se formó el Technical Committee 261-CCF de RILEM "Creep behavior on cracked sections in FRC" [1] actualmente operativo que evalúa métodos de evaluación y las variables que definen la fluencia en estado fisurado. En los últimos años se ha generado un importante caudal de resultados experimentales aplicando diversos esquemas de carga, tipo y tamaño de probeta, parámetros de ensayo y equipamiento empleado; sobre los que ha ido primando el uso de prismas cargados en flexión, sea cargados en tres o en cuatro puntos, en forma separada o en columnas, y con probetas con o sin entalla [2-6]. No obstante también se han desarrollado estudios con otras modalidades como testigos cilíndricos [7] o prismas [8] sometidos a tracción directa o diferentes tipos de paneles tanto cuadrados [9] como redondos [10]. Las distintas modalidades de ensayo hacen que no todo el material experimental disponible sea fácilmente comparable. A los fines de este estudio, y en forma consistente con las últimas tendencias sobre la temática [1], se adoptaron como configuración de ensayo los estudios de fluencia en flexión. Si bien con esta configuración sólo parte de la sección está sometida a tracción, el ensayo presenta ventajas ya que es representativo de muchas aplicaciones, es más fácil de realizar que el de tracción directa, la sollicitación y dispositivos son los mismos que se emplean para clasificar al HRF [11], y es sencillo establecer el nivel de fisuración previa (apertura de la boca de fisura, CMOD).

En este artículo se analizan resultados propios y de otros autores con el fin de ponderar la incidencia de las variables intervinientes (esfuerzo aplicado, apertura de fisura inicial, tipo de fibra, entre otras) y evaluar diversas alternativas de predicción del crecimiento de la apertura de fisura en el tiempo. Los estudios incluyen aperturas iniciales de fisura entre 0,05 y 0,5 mm y niveles de tensiones entre 25% y 45% de la resistencia residual  $f_{R1}$  (EN14651) [11]. Asimismo se comparan resultados de hormigones con diversos tipos de fibras de acero y macro fibras sintéticas. A partir del estudio se proponen diversas ecuaciones de estimación.

### PARTE EXPERIMENTAL

Los datos experimentales considerados para este artículo siguen una metodología similar a la propuesta por Arango et al. [3], la cual incluye tres etapas de las que en este caso solo consideramos las dos primeras. En primer lugar se caracteriza el HRF según la norma EN14651 [11] mediante ensayos de flexión en 3 puntos en prismas de 150x150x600 mm con una entalla al centro de 25 mm y luz entre apoyos 500 mm, usando la CMOD para el control de la velocidad; al mismo tiempo se prefisuran otros prismas con la misma metodología pero deteniendo el ensayo al alcanzar un CMOD establecido, identificado como  $COMD_{pr}$  (en este caso entre 0,05 y 0,5 mm). Luego se realiza el ensayo de fluencia propiamente dicho. Las vigas fisuradas se colocan en pórticos y se someten a esfuerzos sostenidos de flexión en función de la resistencia residual  $f_{R1}$  media resultante de la caracterización del HRF (en los casos seleccionados se adoptaron esfuerzos entre 25 y 45% de  $f_{R1}$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir del análisis de los datos de creep registrados en diversos ensayos propios, y en base a los datos brindados por la bibliografía disponible se procedió a evaluar las principales variables intervinientes y su influencia en el crecimiento de la apertura de fisura por creep.

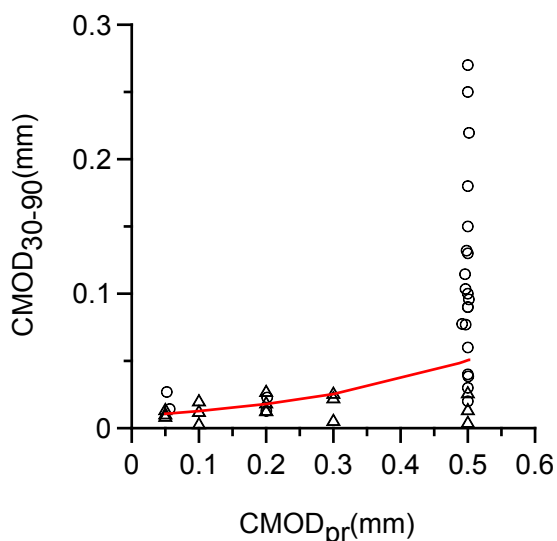
Acorde a la información disponible [2-6;12-14 entre otros] las principales variables a considerar resultan ser:

- Tipo y contenido de fibras
- Características mecánicas del HRF
- Daño inicial definido por la CMOD de pre fisuración ( $CMOD_{PR}$ )
- Carga sostenida aplicada ( $f_R$ )

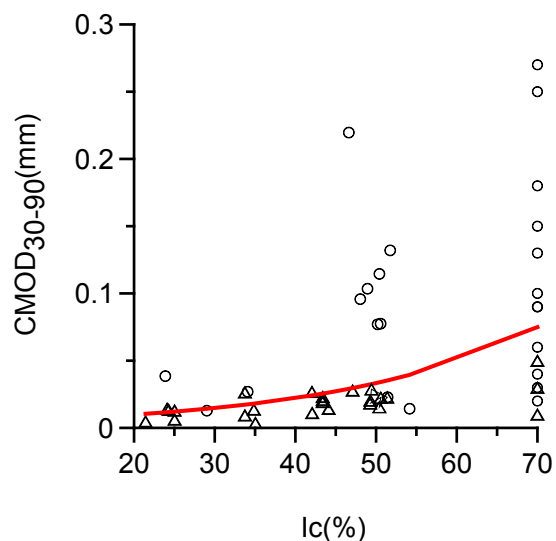
En lo que refiere al tipo de fibras existe coincidencia entre los distintos estudios relevados en lo que refiere al comportamiento bajo cargas de flexión de larga duración, observándose que el cree registrado con fibras sintéticas es mayor que con fibras de acero pero que el comportamiento es cualitativamente similar[5, 12, 15].

Las características mecánicas propias del HRF se determinan acorde a la norma EN14651 [11], y son determinantes del nivel de carga aplicada y su efecto, por lo cual se ha hecho habitual la consideración del llamado coeficiente de creep ( $I_c$ ), que es la relación expresada en por ciento entre la tensión aplicada ( $f_{RC}$ ) y la primera residual que surge del ensayo de caracterización antes mencionado ( $f_{R1}$ ), es decir  $I_c = f_{RC} / f_{R1} \times 100$ .

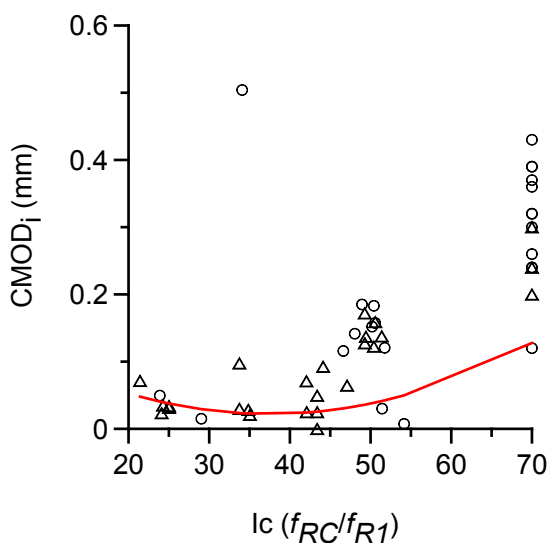
En la Figura N° 1 se analiza la incidencia cruzada de algunas de las variables antes mencionadas a partir de los resultados experimentales obtenidos de un total de 49 vigas que componen diversas experiencias. En la Figura 1 c) se puede observar que los datos relativos a la apertura de fisura instantánea al aplicar la carga permanente del ensayo de creep presentan una elevada variabilidad, en gran medida la misma está dada porque la apertura inicial varía bastante en los primeros minutos de carga, además de ser muy dependiente de las variables de ensayo, que es la misma razón que ha hecho desistir a los autores de este artículo de la consideración de coeficientes de fluencia [16]. Por su parte sí se observa una relación entre las variaciones de apertura de fisura por creep que tienen lugar entre los 30 y 90 días bajo cargas ( $CMOD_{30-90}$ ) respecto al  $I_c$  (%) y al nivel de daño inicial. El periodo 30-90 días fue adoptado en base a experiencias previas como el más representativo dado que la velocidad de apertura de fisura (COR) tiende a estabilizarse luego de tres semanas cuando las condiciones de daño inicial y nivel de carga se mantienen por debajo de las críticas [15]. Más allá de lo mencionado vale decir que existen estudios como el efectuado por Pujadas et al [17] en los que se indica que el primer estadio de creep es independiente del nivel de daño previo ( $CMOD_{PR}$ ). En los tres gráficos que componen la Figura 1 se observa la mayor magnitud de las deformaciones por creep en aquellos hormigones reforzados con fibras sintéticas acorde a lo informado previamente y en forma consistente con lo relevado en la bibliografía [5, 12, 15].



a) Tendencia de crecimiento de la apertura de fisura entre los 30 y 90 días en función de la apertura de fisura del ensayo de prefisuración.  
 $CMOD_{30-90} = 0,009e^{3,4502CMOD_{pr}}$



b) Tendencia de crecimiento de la apertura de fisura entre los 30 y 90 días en función del índice de creep ( $Ic = f_{RC}/f_{R1}$ ).  $CMOD_{30-90} = 0,0044e^{0,0405Ic}$



c) Variación de la apertura de fisura inicial al aplicar la carga de creep, en función del índice de creep ( $Ic = f_{RC}/f_{R1}$ ).  
 $CMOD_i = 0,0001*Ic^2 - 0,0075*Ic + 0,1627$

Para los gráficos se indicaron con triángulos los datos correspondientes a hormigones reforzados con fibras de acero y con círculos aquellos datos provenientes de hormigones reforzados con fibras sintéticas.

Figura N° 1 – Incidencia de las diferentes variables que afectan el creep

Más allá de la magnitud de los valores registrados, a partir del análisis de los datos disponibles se verifica la validez de las variables propuestas, y se proponen algunos criterios para la consideración de las mismas. El tipo de fibras resulta un factor en sí mismo que definirá la magnitud de las deformaciones alcanzadas. La dosis de fibras se asume como considerada dentro de los resultados de caracterización mecánica del HRF ya que es de influencia directa en los valores de residuales que se obtienen, más allá que se ha observado en trabajos previos que la cantidad de fibras que se ubican en la superficie de rotura incide en el comportamiento [18]; pero se propone esta simplificación de criterio en

observancia a que estamos buscando predecir el comportamiento de elementos estructurales de los cuales no conoceremos cuántas fibras aportan al control de cada fisura. El daño inicial, resultó pasible de ser considerado como un factor del tipo exponencial. El esfuerzo aplicado, dado que usualmente se define en función de la primera residual obtenida al caracterizar al HRF según Norma EN 14651, se decidió considerarlo en combinación con la misma a partir de la utilización del coeficiente de creep ( $I_c$ ) descrito en párrafos precedentes, y su incidencia en el crecimiento de la apertura de fisura también resulta de tipo exponencial.

Dadas las incertidumbres descritas respecto al periodo inicial de creep, y siendo la problemática que nos preocupa la que refiere al comportamiento a largo plazo, se consideró conveniente para el análisis de las curvas CMOD-tiempo conveniente descartar el primer día bajo cargas sostenidas y evaluar la evolución de la apertura de fisura desde ese punto.

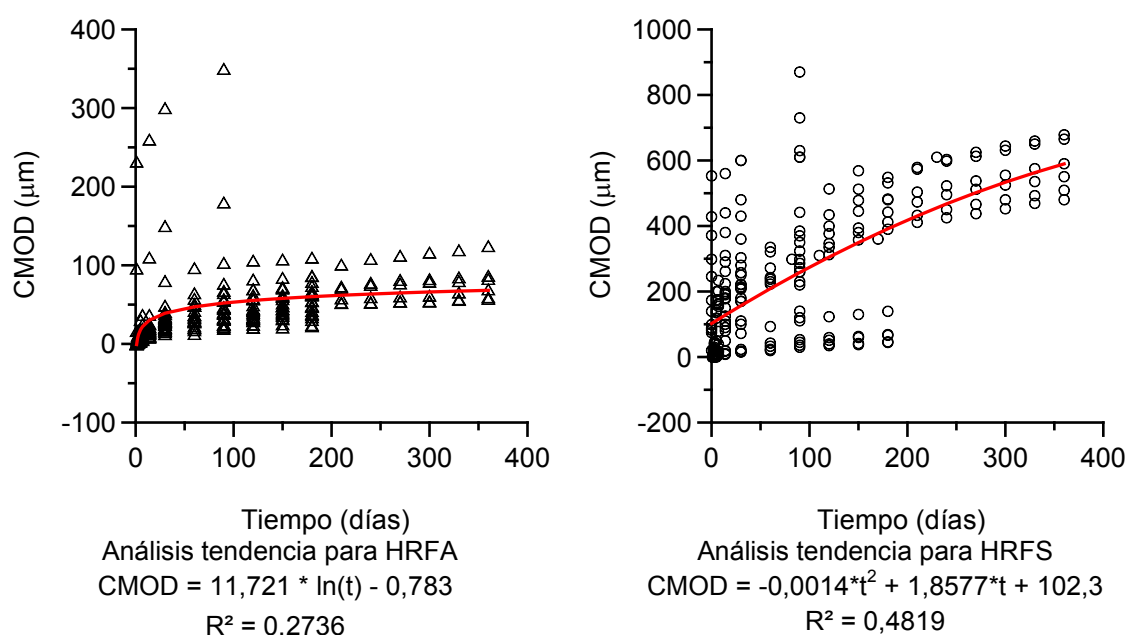


Figura N°2 – Curvas de tendencia para HRFA y HRFS

En la Figura N°2 se observan las curvas de tendencia obtenidas a partir del análisis de los datos de ensayo de las 49 vigas elegidas como base para este estudio. Se analizaron en forma separada las vigas reforzadas con fibras de acero respecto a aquellas reforzadas con fibras sintéticas acorde a las diferencias de comportamiento que marca la bibliografía y confirmadas al efectuar el análisis de las variables intervinientes desarrollado en párrafos anteriores. Los resultados obtenidos confirmaron la necesidad de su análisis independiente pero a la vez mostraron que resulta factible obtener ecuaciones que permitan una estimación rápida del comportamiento esperable a largo plazo bajo cargas sostenidas, no obstante el mismo se verá afectado no solo por las condiciones propias del HRF analizado sino también por el daño inicial (en particular cuándo se superan los 0,2 mm de CMOD) y el nivel de carga aplicado si es mayor a aproximadamente al 35 % como se desprende de las Figuras N°1 a) y b).

## CONCLUSIONES

Para la predicción del crecimiento de la apertura de fisuras por creep, las principales variables que afectan la fluencia de HRF fisurados bajo cargas sostenidas pueden ser consideradas en forma sintética a partir de la utilización de los siguientes parámetros:

Tipo de fibra (sintética o acero)

Ic (%)

Nivel de daño inicial ( $CMOD_{PR}$ )

La variación de la apertura de fisura al momento de aplicación de la carga permanente deberá ser tomada en cuenta para la evaluación de la apertura total alcanzada pero se recomienda dejarla de lado en el análisis de predicción del crecimiento de fisura por creep dada su variabilidad según las condiciones de ensayo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] <https://www.rilem.net/groupe/261-ccf-creep-behavior-in-cracked-sections-of-fiber-reinforced-concrete-325> (acceso 23/3/18)
- [2] Kusterle W. "Flexural creep tests on beams - 8 years of experience with steel and synthetic fibres", in RILEM Bookseries V14, Creep behaviour in cracked sections of fibre reinforced concrete (2017) 27-39.
- [3] Arango S, Serna P, Martí Vargas JR, García Taengua EA. "Test method to characterize flexural creep behaviour of pre-cracked FRC specimens". ExpMec. 52 8 (2012), 1067-78.
- [4] Zerbino R, Barragán B. "Long-term behavior of cracked steel fiber-reinforced concrete beams under sustained loading". ACI Materials J, 109 2 (2012), 215-224.
- [5] Zerbino R, Monetti DH, Giaccio G. "Creep behaviour of cracked steel and macro-synthetic fibre reinforced concrete", Materials and Structures 49 (2016), 3397-3410.
- [6] García-Taengua E, Arango S, Martí-Vargas JR, Serna, P, Flexural creep of steel fiber reinforced concrete in the cracked state. Const Building Mat 65, (2014), 321-329.
- [7] Zhao G, di Prisco M, Vandewalle L. "Experimental investigation on uniaxial tensile creep behavior of cracked steel fiber reinforced concrete" Mat and Struct, 48 (2014), 3173-3185.
- [8] Babafemi AJ, Boshoff WP. "Tensile creep of macro-synthetic fibre reinforced concrete (MSFRC) under uni-axial tensile loading". Cement Concrete Comp, 55 (2015), 62-69.
- [9] Larive C, Rogat D, Chamoley D, Regnard A, Pannetier T, Thuaud C "Mid-term behaviour of fibre reinforced sprayed concrete submitted to flexural loading" in RILEM Bookseries V14, Creep behaviour in cracked sections of fibre reinforced concrete (2017), 155-167.
- [10] Bernard ES. "Influence of fiber type on creep deformation of cracked fiber-reinforced shotcrete panels, ACI Mat J, 107, (2010), 474-480.
- [11] Eur Com for Standarization (2005) EN14651:2005 Test method for metallic fibered concrete - measuring the flexural tensile strength (Limit of proportionality (LOP), Residual). Brussels.
- [12] Van Bergen S, Pouillon S, Vitt G. "Experiences from 14 years of creep testing of steel and polymer Fiber Reinforced Concrete", in RILEM Bookseries V14 Creep behaviour in cracked sections of fibre reinforced concrete (2017) 41-51.
- [13] Zerbino R, Monetti DH, Giaccio G, Ravindra G. "Creep en estado fisurado en hormigones reforzados con fibras", VII CongInt - 21ª ReunionTecnica AATH, Concordia, 2016: 235-242.
- [14] Ravindra G, Zerbino R, Sujatha J. "Factors influencing creep of cracked fibre reinforced concrete: what we think we know & what we do not know", in RILEM Bookseries V14, Creep behaviour in cracked sections of fibre reinforced concrete (2017) 3-12.
- [15] Monetti, Diego H., Torrijos, María C., Giaccio, Graciela y Zerbino, Raúl, "La Estabilidad Bajo Condiciones de Servicio de Hormigón Reforzado con Fibras en Estado Fisurado", VIII Congreso Internacional - 22ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del

Hormigón: memoria técnica / V.L Bonavetti - 1a ed revisada. - Buenos Aires : Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, (2018) 361-369.

[16] Llano-Torre A, Arango SE, García-Taengua E, Martí-Vargas JR, Serna P. "Influence of fibre reinforcement on the long-term behaviour of cracked concrete", in RILEM Bookseries V14 Creep behaviour in cracked sections of fibre reinforced concrete (2017) 195-209.

[17] Pujadas P, Blanco A, CavalaroSHP, de la Fuente A, Aguado A. "Flexural post-cracking creep behaviour of macro-synthetic and steel Fiber Reinforced Concrete", in RILEM Bookseries V14 Creep behaviour in cracked sections of fibre reinforced concrete (2017) 77-87.

[18] Monetti.D.H., Llano-Torre A., Torrijos M.C., Giaccio G., Zerbino R., Martí-Vargas J.R., Serna P., "Long-term behavior of cracked fiber reinforced concrete under service conditions", Construction and Building Materials 196 (2019).649-658