

LA ESTABILIDAD BAJO CONDICIONES DE SERVICIO DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS EN ESTADO FISURADO

Monetti, Diego H¹, Torrijos, María C.², Giaccio, Graciela³ y Zerbino, Raúl²

¹Facultad de Ingeniería UNLP, ²CONICET-LEMIT-Facultad de Ingeniería UNLP, ³CIC-LEMIT-Facultad de Ingeniería UNLP, zerbino@ing.unlp.edu.ar.

RESUMEN

La fluencia en Hormigones reforzados con fibras en estado fisurado, las situaciones en las cuales es relevante y las condiciones para mantener aptitud en servicio, constituye un tema en discusión. Este trabajo analiza varias combinaciones de niveles de carga y daño inicial en busca de rangos de velocidades de crecimiento de fisura que permitan inferir un comportamiento estable durante la vida útil de los elementos estructurales. Luego de sintetizar antecedentes sobre el tema se analizan resultados obtenidos sobre hormigones con fibras de acero y con macrofibras sintéticas. Prismas con aperturas de fisura entre 0,05 y 0,5 mm fueron sometidos durante 6 meses a tensiones entre 25% y 45% de la resistencia residual f_{R1} (EN14651). Los resultados muestran que aún en hormigones con fibras con baja capacidad residual existen condiciones donde el crecimiento de fisuras bajo carga sostenida se minimiza a tal punto que torna estable al sistema.

Palabras claves: Hormigón, fibras, fisuración, fluencia, condiciones de servicio.

INTRODUCCIÓN

Los estudios y experiencias de obra sobre Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) dieron lugar a diversas publicaciones, normas y reglamentos o recomendaciones técnicas. Un avance significativo fue la inclusión del HRF dentro del *fib* Model Code 2010 [1], donde se proponen clases de HRF en función del nivel resistente y se brindan criterios para el diseño estructural. No obstante, el documento advierte que no han sido contempladas aquellas fibras cuyas propiedades puedan afectarse en el tiempo. A la vez, cabe indicar que la principal contribución de las fibras se produce en “estado fisurado” y que bajo cargas sostenidas se pueden producir deformaciones diferidas conforme el tipo de fibra.

La fluencia en estado fisurado puede incidir en la viabilidad de uso del HRF, podría tener consecuencias en la durabilidad y seguridad, y se ha transformado en tema controversial tanto en ámbitos científicos como profesionales. El interés en la temática derivó en la formación del Technical Committee 261-CCF de RILEM “*Creep behavior on cracked sections in FRC*” [2] donde participan más de 15 grupos de investigación del mundo, y tiene por objetivos interpretar los mecanismos de fluencia, valorar las repercusiones estructurales y casos donde la fluencia puede ser problemática, proponer métodos de ensayo y criterios de análisis, para, finalmente, elaborar recomendaciones prácticas.

En pocos años se realizaron muchos estudios sobre el tema atendiendo al efecto del tipo y dosis de fibra, de la adherencia fibra-hormigón y de las condiciones ambientales. También se consideraron métodos de ensayo, tipo de probetas y niveles de carga y daño inicial, así como criterios de análisis, acumulando un caudal de información interesante. Sin embargo, en general los valores de fluencia medidos para las cargas y tamaño de fisuras estudiadas, indicarían que en pocos años tales HRF podrían alcanzar la rotura. En definitiva, si bien las condiciones de ensayo eran suficientes para discernir acerca de las bondades de una u otra fibra o tipo de HRF con respecto a la fluencia en estado fisurado, persistían las dudas sobre las condiciones de estabilidad. Este trabajo muestra parte de una investigación que busca definir condiciones (niveles de carga y daño) para las cuales se pueda inferir un comportamiento estable durante la vida en servicio de los elementos estructurales. Se analizan HRF de acero (HRFA) y en especial HRF poliméricas (HRFP).

ANTECEDENTES

Las investigaciones sobre HRF en estado fisurado incluyen estudios de las variables que inciden en la fluencia, propuestas de metodologías y parámetros para su evaluación, análisis de los mecanismos intervinientes y definición de las condiciones de estabilidad.

Los mecanismos que promueven la fluencia en estado fisurado del HRF se relacionan principalmente con procesos de arrancamiento de las fibras, pero también otros factores contribuyen al desarrollo de las deformaciones diferidas como el aumento de esfuerzos en la zona comprimida en elementos flexados ante el crecimiento de las fisuras [3][4]. En las fibras poliméricas existe la posibilidad de fluencia del propio filamento a temperaturas de servicio y además la mayor deformabilidad transversal puede reducir la adherencia, aspectos que con fibras de acero no son relevantes. Se ha sugerido que en HRFP el aporte de las fibras a la capacidad de carga se hace notorio a partir de la formación de una "bisagra", el fenómeno corresponde a la zona de ablandamiento de la curva carga-apertura de fisura para espesores mayores a 0,1 mm donde se produce el arrancamiento de las fibras; la etapa de inicio de fisuras en la matriz no tiene mayor influencia [5].

En cuanto a métodos para caracterizar la fluencia del HRF en estado fisurado, existen en la actualidad varias propuestas que difieren en las configuraciones de carga, el tipo y tamaño de probeta, los parámetros de ensayo y equipamiento empleado. Los primeros estudios experimentales se realizaron sobre prismas sometidos a flexión [6-10], sea cargados en tres o en cuatro puntos, en forma separada o en columnas, y con probetas con o sin entalla. También se consideraron otras modalidades como testigos cilíndricos [11] o prismas [12] sometidos a tracción directa o diferentes tipos de paneles tanto cuadrados [13] como redondos [14]. Es necesario definir métodos normalizados para poder comparar los resultados de las diversas investigaciones y clarificar la influencia de parámetros tales como nivel de carga y daño inicial y de las condiciones de humedad y temperatura. Tampoco son totalmente conocidos los mecanismos físicos, químicos y mecánicos que gobiernan la fluencia en estado fisurado ni las condiciones para que se inicie la etapa de fluencia terciaria (colapso) [15].

Son varios 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 [16], y es sencillo establecer el nivel de fisuración previa (apertura de la boca de fisura, CMOD).

Entre las variables que inciden en la fluencia bajo cargas sostenidas se destacan, para un dado HRF, el nivel de carga y la apertura de fisura o daño inicial presente en el elemento

estructural. Las investigaciones suelen indicar niveles de carga, en general expresados como porcentaje de resistencia residual, donde se verifican condiciones de estabilidad, esto es, no se alcanza la fluencia terciaria. Dichos porcentajes no son independientes del tipo de HRF, en particular difieren si el HRF tiene postpico con endurecimiento o sin él. En HRFA se ha recomendado que las cargas permanentes no superen el 50 % de la resistencia residual [8], pero en HRFP los porcentajes suelen ser menores. La estabilidad también depende del tipo de ensayo, encontrándose que en tracción directa cargas del orden del 30 % de la capacidad residual condujeron al colapso [11]. Al aumentar el daño inicial el nivel crítico de sollicitación disminuye [9]. Sin embargo, Aitor Llano Torre et al [17] observaron mayor efecto del nivel de tensión y poca influencia del daño inicial entre 0,2 y 2 mm; también indican una respuesta estable para HRFA a partir de los 30 días, mientras que en HRFP se observó crecimiento de fisuras aún pasados los 180 días. Los estudios concuerdan en que la fluencia disminuye marcadamente luego del primer mes.

Las fibras poliméricas tienen gran desarrollo en la actualidad, sus características técnicas (no se corroen y se han logrado significativas mejoras en su rigidez y adherencia con la matriz) les permiten competir con las de acero para algunas aplicaciones. Bajo cargas rápidas el HRFP suele presentar una clara reducción en la capacidad residual luego de la primera fisura, pero a partir de entonces dicha capacidad se mantiene para grandes CMOD [15] lo que aparece como una ventaja. Sin embargo, existen referencias de HRFP donde luego de casi 7 años bajo carga se produjo el colapso de muestras que hasta entonces parecían estables [6]. Por otro lado, las deformaciones medidas en HRFP suelen ser varias veces mayores que en HRFA [9, 18].

Dado que la fluencia del HRF fisurado está dominada por la propagación de las fisuras, la progresiva pérdida de adherencia fibra–matriz donde intervienen mecanismos de microfisuración en la zona de anclaje [19] y el consecuente arrancamiento de las fibras, es relevante la respuesta postpico del HRF. La fluencia adquiere importancia en un HRF con postpico sin endurecimiento tanto más cuanto más descienda la capacidad portante. Cuando existe endurecimiento, el aumento en la capacidad residual al crecer la CMOD actuará como freno limitando la fluencia. En este sentido dosis altas de fibras (más allá del tipo de fibra) implican menor riesgo o incidencia del fenómeno de fluencia [20].

En cuanto a la forma de evaluación, en varios casos se han empleado coeficientes de fluencia [6, 14, 21]. Sin embargo, los coeficientes muestran mucha dependencia de las variables de ensayo intervinientes [20] y, a criterio de los autores, esta herramienta da lugar a incertidumbres. El coeficiente depende de la apertura de fisura instantánea al aplicar la carga y la misma varía durante los primeros minutos y además, al cambiar substancialmente para diferentes daños preexistentes, puede dar lugar a coeficientes bajos en elementos muy dañados. Otra herramienta para evaluar la fluencia es la velocidad de crecimiento de la apertura de fisura (COR, por su sigla en inglés). La COR es función de la tensión aplicada y se reduce significativamente con el tiempo bajo carga tanto en flexión como en tracción uniaxial [3, 9, 17, 22]. Se observó crecimiento de la COR a mayor esfuerzo aplicado y una incidencia importante del nivel de daño inicial [9]. Cuando las condiciones de daño inicial y nivel de carga se mantuvieron por debajo de las críticas, la COR se estabilizó luego de 3 semanas por lo cual se sugiere utilizar el intervalo entre 30 y 90 días para calcularla.

En general para COR menores a 1 mm/año no se consignan episodios de rotura. No obstante, al considerar una vida en servicio superior a 25 años, este valor sigue pareciendo elevado. Como la mayoría de los estudios realizados buscaban definir una metodología o las variables que afectan la fluencia en un lapso acotado, los niveles de carga y daño analizados superaban holgadamente las situaciones tolerables en servicio. Por tal motivo se propuso encontrar condiciones para las cuales los valores de COR no

generen dudas acerca de aptitud en servicio. Inicialmente se estudiaron HRFA y luego HRF; los principales resultados de estas experiencias se analizan en este trabajo.

METODOLOGÍA DE ENSAYO

La metodología seguida es similar a la propuesta por Arango et al. [7] e incluye tres etapas. En primer lugar se caracteriza el HRF según la norma EN14651 [16] 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 $CMOD_{pr}$ (en este caso entre 0,05 y 0,5 mm); también se consigna el valor residual de la apertura de fisura al descargar ($CMOD_{res}$). Luego se realiza el ensayo de fluencia propiamente dicho. Las vigas fisuradas se colocan en pórticos y se someten a esfuerzos sostenidos (flexión en 4 puntos) en función de la resistencia residual f_{R1} media resultante de la caracterización del HRF (en este caso se adoptó entre 25 y 45% de f_{R1}). Las CMOD se registran mediante comparadores fijos a planchuelas adheridas a cada lado de la entalla separados 150 mm. Los pórticos de carga y dispositivos de medición han sido descritos previamente [3]. Se determinaron las aperturas instantáneas al aplicar la carga sostenida ($CMOD_i$) y la evolución de las aperturas diferidas ($CMOD_d$). Para evaluar la incidencia de la contracción por secado sobre las medidas de apertura de fisura también se registró en paralelo la variación del CMOD en vigas fisuradas sin cargar ubicadas en el mismo ambiente. A los 180 días se retiraron las cargas y las vigas permanecieron en los pórticos durante un mes para registrar las recuperaciones. Como tercera etapa se evalúa la resistencia residual mediante la misma metodología empleada para la caracterización previa.

ESTUDIOS SOBRE HRF DE ACERO

Se seleccionó un HRF de uso habitual en pisos industriales, que incorpora 50 kg/m³ de fibras de acero tipo hooked-end de 50 mm de largo y 1 mm de diámetro, que mantiene una capacidad residual similar a la tensión de primera fisura durante el postpico ($f_{R1} = 5,39$, $f_{R3} = 5,20$, clase 5c [1]). Se prefisuraron prismas hasta CMOD entre 0,05 y 0,5 mm que fueron sometidos a diferentes niveles de carga permanente (0,25, 0,35 y 0,45 de f_{R1}).

La Figura 1 muestra curvas típicas de la evolución de la apertura de fisura ($CMOD_d$, esto es sin incluir la $CMOD_{res}$) durante 6 meses bajo carga sostenida; se incluye la recuperación durante un mes luego de la descarga.

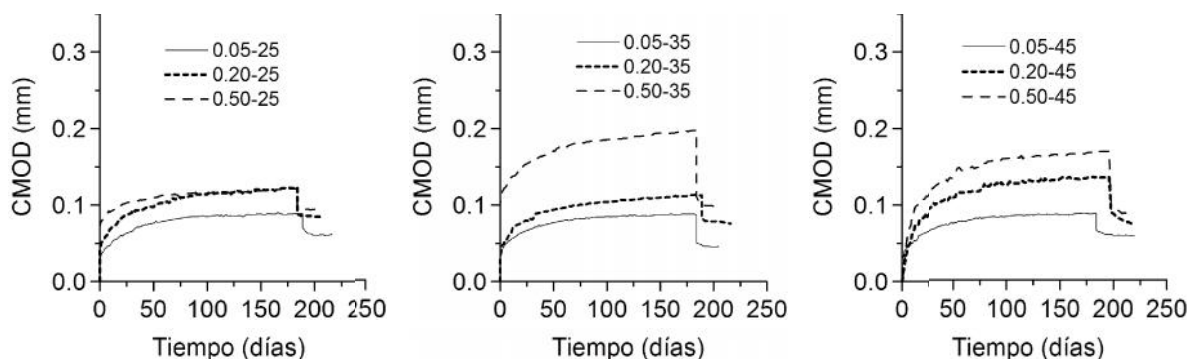


Figura 1: Curvas típicas tiempo apertura de fisura distintas combinaciones daño-carga.

Tabla 1: Velocidad de apertura de fisura COR (micrones/día) en HRFA.

Fisura previa - % f_{R1}	COR (mm/año)			$CMOD_{pr}$ (mm)	$CMOD_{res}$ (mm)	$CMOD_i$ (mm)	Carga (% f_{R1})
	30-60 d	60-90 d	90-180 d				
0,05-25	0,15	0,08	0,02	0,052	0,028	0,021	25
0,2-25	0,14	0,14	0,04	nm	nm	0,035	
0,5-25	0,08	0,05	0,02	0,501	0,347	0,032	
0,05-35	0,12	0,05	0,02	0,051	0,015	0,017	35
0,2-35	0,14	0,08	0,05	0,205	0,113	0,030	
0,5-35	0,24	0,07	0,06	0,512	0,340	0,090	
0,05-45	0,14	0,06	0,02	0,056	0,021	0,025	45
0,2-45	0,15	0,12	0,04	0,205	0,114	0,049	
0,5-45	0,22	0,14	0,04	0,503	0,341	0,071	

Se aprecia que las $CMOD$ instantáneas crecieron con el nivel de carga y que el comportamiento diferido es cualitativamente similar.

La Tabla 1 presenta los resultados en términos de velocidad de crecimiento de fisura (COR) para diferentes lapsos bajo carga (30-60, 60-90 y 90-180 días). La COR varía con el nivel de tensión aplicada y con el daño inicial, pero en todos los casos decrece drásticamente a lo largo del tiempo. Para estas condiciones las deformaciones diferidas fueron realmente bajas y permiten inferir una gran estabilidad por años. Cabe comentar que para los menores niveles de carga y de daño los cambios por fluencia fueron tan pequeños que la contracción por secado en el sector donde se mide la $CMOD$ adquiere peso y puede enmascarar, compensar o incluso superar los valores de $CMOD_d$.

Se destaca que estabilización significa una variación de $CMOD_d$ muy pequeña pero no que haya dejado de abrirse la fisura. El concepto de velocidad de apertura de fisura permite inferir su comportamiento en servicio y en tal sentido la tendencia a disminuir dicha velocidad observada implica una estabilización. Sin embargo, dado que el HRFA estudiado poseía una capacidad residual importante, se consideró necesario explorar que ocurría en HRF con un postpico con descenso más abrupto y en particular en el caso de fibras poliméricas, que son las más cuestionadas en cuanto a las posibilidades de que se produzca fluencia en estado fisurado. Eso será analizado en el siguiente apartado.

EVALUACIÓN DE HRF POLIMERICAS

Se elaboró un HRF con relación a/c 0,43 y piedra partida de 12 mm de tamaño máximo, incorporando 5 kg/m^3 de macrofibras sintéticas de 0,6 mm de diámetro y 50 mm de largo. El hormigón de base presentó un asentamiento de 90 mm que se redujo a 50 mm al agregar las fibras. Se registró un contenido de aire del 4%. Se moldearon 9 vigas de $150 \times 150 \times 600$ mm y 4 cilindros de 100×200 mm que se curaron en cámara húmeda durante 28 días. La resistencia a compresión a la edad de ensayo fue 50,8 MPa. Dos vigas se utilizaron para caracterizar al HRF (Figura 2 Izq.) y las otras se prefisuraron hasta $CMOD$ iguales a 0,05, 0,2 o 0,5 mm (Figura 2 Der.). Luego seis vigas fueron sometidas durante 6 meses a esfuerzos del orden de 25% o 45% de f_{R1} . La viga prefisurada restante se mantuvo en el mismo ambiente sin cargar y se instrumentó en forma similar a las cargadas pero con dos bases de medida, una que incluía la entalla y otra que la dejaba afuera, a fin de evaluar la incidencia de la contracción en el registro del $CMOD_d$. La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos en las etapas de caracterización y prefisuración. A los 180 días se descargaron las vigas y se registraron las recuperaciones durante un mes. Finalmente se evaluó la resistencia residual bajo cargas rápidas.

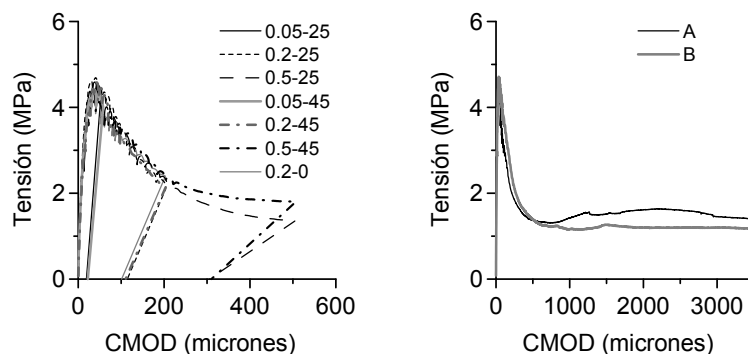


Figura 2- HRFP estudiado. Izq: Caracterización según EN14651. Der: Prefisuración.

Tabla 2- Resultados las etapas de la caracterización en flexión, prefisuración y fluencia.

Viga	Prefisuración				Ensayo de fluencia				
	f_L (MPa)	f_{R1} (MPa)	$CMOD_{pr}$ (mm)	$CMOD_{res}$ (mm)	Carga (% f_{R1})	$CMOD_i$ (mm)	COR (mm/año)		
							30-60 d	60-90 d	90-180 d
A	4,33	1,37	Ensayo completo para caracterización						
B	4,71	1,39							
0,2-0	4,15	----	0,20	0,10	Sin carga para evaluación de la contracción				
0,05-25	4,59	----	0,05	0,02		0,002	0,18	0,15	0,09
0,2-25	4,69	----	0,20	0,11	25	0,015	0,08	0,08	0,03
0,5-25	4,54	1,36	0,50	0,31		0,073	0,24	0,23	0,12
0,05-45	4,40	----	0,06	0,02		0,008	0,10	0,08	0,07
0,2-45	4,58	----	0,20	0,11	45	0,034	0,12	0,14	0,06
0,5-45	4,14	1,81	0,51	0,30		0,163	1,38	1,40	0,77
Promedio		1,48	Referencia para nivel de carga sostenida						

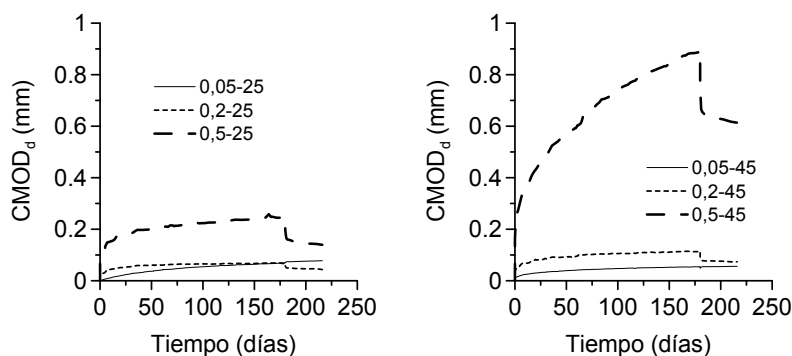


Figura 3: Evolución de la CMOD durante el ensayo de fluencia (no incluye apertura inicial)

La Figura 3 presenta la evolución de la $CMOD_d$ diferenciando los niveles de sollicitación y daño inicial. A la apertura de fisura medida se sumó la contracción para cada edad; los valores de contracción con y sin entalla fueron similares y alcanzaron 0.027 % a 180 días. Los valores experimentales son consistentes con la contracción teórica estimada según el *fib* Model Code 2010 [1]. La figura muestra la importancia de la $CMOD_{pr}$ en la $CMOD_d$. El efecto del nivel de sollicitación fue pequeño con las menores $CMOD_{pr}$; por el contrario, en las vigas más dañadas ($CMOD_{pr}$ 0,5 mm) el comportamiento se aparta del observado para pequeñas aperturas iniciales y la $CMOD_d$ crece claramente con el nivel de tensión.

La Tabla 2 también presenta la COR calculada para diferentes períodos verificando su disminución en el tiempo. Para $CMOD_{pr}$ chicas las COR son muy bajas (muy por debajo de 1 mm/año), incluso en los primeros meses, sin que aparezca un cambio significativo al incrementar el nivel de carga. Por el contrario, para la mayor apertura de fisura (0,5 mm)

los valores de COR aumentan y existe un marcado incremento con el nivel de carga. Sin embargo, solo en el caso más desfavorable (0,5-45) superó 1 mm/año en los primeros 90 días. Luego de 3 meses la COR se redujo para todas las combinaciones de daño y carga. Esto indica que, incluso en este HRFP con baja capacidad residual, es previsible que la COR continúe disminuyendo y permite inferir que se mantendrá la capacidad de carga por años. Finalmente, se observó que todas las vigas presentaron una capacidad de carga residual post-fluencia similar a la de las vigas no expuestas a cargas sostenidas.

DISCUSIÓN

La fluencia del HRF en estado fisurado preocupa principalmente en el caso de las macrofibras sintéticas. En HRFA con postpico con endurecimiento el problema se minimiza. Los HRFP suelen tener postpico sin endurecimiento a lo que se suma la posibilidad de fluencia del mismo filamento a temperaturas de servicio. En todos los casos el mecanismo imperante es el arrancamiento de las fibras, proceso que, si el HRF no tiene endurecimiento, no se detiene, ya que a medida que se reduce la capacidad de transferencia de carga de una fibra aumenta la sollicitación en las fibras vecinas. En consecuencia, aunque no haya rotura puede ser que no se detenga la deformación. Existen casos donde luego de varios años colapsaron HRFP que parecían estables.

En general, por debajo de ciertos niveles de sollicitación los problemas de fluencia se minimizan; en HRFA se han propuesto niveles del orden del 50% de la capacidad residual teniendo en cuenta la variabilidad propia del HRF. Dicha variabilidad, que se verifica en los ensayos de corta duración, suele ser mayor en HRFA que en HRFP. Varios autores coinciden en que las muestras sometidas a fluencia poseen una capacidad de carga residual similar a la de las vigas que no fueron expuestas a carga permanente, por lo que la curva de caracterización es representativa del comportamiento del HRF.

Si bien los valores de COR medidos en HRFP son bastante mayores a los de HRFA, este trabajo muestra que existen condiciones para las cuales el crecimiento de la apertura de fisura se minimiza y permite inferir condiciones de estabilidad. Se destaca que los incrementos en apertura de la fisura fueron muy pequeños y comparables a los cambios que provoca la contracción. Cabe indicar que en estudios donde el objetivo sea comparar la performance bajo cargas sostenidas de distintas fibras, se emplearán niveles de esfuerzo y de fisura previa mayores, por ejemplo $CMOD_{pr}$ 0,5 mm y tensión 50 % f_{R1} [23], esta consideración no resulta determinante. No obstante es conveniente incorporar una medida de los cambios dimensionales sin carga a la metodología habitual.

Las consecuencias negativas de la fluencia de HRF en estado fisurado son bastante acotadas. Analizando el uso combinado de HRF con armaduras convencionales se ha comprobado que las fibras reducen las deformaciones diferidas y anchos de fisuras y que se alcanza la estabilización de las deformaciones en lapsos mucho más breves que en hormigón armado convencional [24].

CONCLUSIONES

A partir del estudio de la fluencia en estado fisurado de HRF de acero y macrofibras sintéticas surgen las siguientes conclusiones:

En hormigones con macrofibras sintéticas, aún en dosis que no dan lugar a un postpico con endurecimiento, existen niveles de carga y daño inicial para los cuales la velocidad de crecimiento de la apertura de fisura (COR) resulta baja y permiten inferir una extensa

vida en servicio. No obstante, para condiciones de carga similares la COR es claramente inferior en el caso de HRF de acero.

Aplicando niveles de carga de hasta $0,45 f_{R1}$ se observó un comportamiento estable para aperturas de fisura inicial ($CMOD_{pr}$) menores a 0,2 mm. Con $CMOD_{pr}$ 0,5 mm la COR continuó siendo elevada para este nivel de carga incluso superados 180 días; solo se encontraron bajos valores de COR para cargas mucho menores ($0,25 f_{R1}$).

REFERENCIAS

- [1] Féd Int du Béton. (2013) fib Model Code for Conc Struc 2010. Ernst & Sohn, Berlin, Germany.
- [2] <https://www.rilem.net/groupe/261-ccf-creep-behavior-in-cracked-sections-of-fiber-reinforced-concrete-325> (acceso 23/3/18)
- [3] Zerbino R, Monetti DH, Giaccio G, Ravindra G. "Creep en estado fisurado en hormigones reforzados con fibras", VII Cong Int - 21a Reunion Tecnica AATH, Concordia, 2016: 235-242.
- [4] 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.
- [5] Kamasani CR, Subramaniam KVL, "Experimental evaluation of flexural response and post-cracking behavior in macro-synthetic fiber reinforced concrete" in BEFIB 2016 RILEM Pub, (2016): 64-74.
- [6] 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.
- [7] Arango S, Serna P, Martí Vargas JR, García Taengua EA. "Test method to characterize flexural creep behaviour of pre-cracked FRC specimens". Exp Mec. 52 8 (2012), 1067-78.
- [8] 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.
- [9] Zerbino R, Monetti DH, Giaccio G. "Creep behaviour of cracked steel and macro-synthetic fibre reinforced concrete", Materials and Structures 49 (2016), 3397-3410.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Bernard ES. "Influence of fiber type on creep deformation of cracked fiber-reinforced shotcrete panels, ACI Mat J, 107, (2010), 474-480.
- [15] Buratti N, Mazzotti C. "Creep testing methodologies and results interpretation", in RILEM Bookseries V14 Creep behaviour in cracked sections of fibre reinforced concrete (2017) 13-24
- [16] Eur Com for Standarization (2005) EN14651:2005 Test method for metallic fibered concrete - measuring the flexural tensile strength (Limit of proportionality (LOP), Residual). Brussels.
- [17] Llano-Torre A, Serna P, Zerbino R, Martí-Vargas JR, "Effect of initial crack opening on flexural creep behavior of FRC specimens", in BEFIB 2016, RILEM Pub (2016): 117-126.
- [18] 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.
- [19] Boshoff WP, Nieuwoudt PD "Tensile creep of cracked steel fibre reinforced concrete: mechanisms on the single fibre and at the macro level", in RILEM Bookseries V14 Creep behaviour in cracked sections of fibre reinforced concrete (2017) 63-76.
- [20] 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.

- [21] Pujadas P, Blanco A, Cavalaro SHP, 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.
- [22] Babafemi A, Boshoff W. “Creep response of polypropylene macro fibre concrete under sustained flexural loads”, in BEFIB 2016, RILEM Pub (2016): 189-197.
- [23] Llano-Torre A, Serna P, Cavalaro SHP. “International round robin test on creep behavior of FRC supported by the RILEM TC 261-CCF”, in BEFIB 2016, RILEM Pub (2016): 127-140.
- [24] Nakov D, Markovski G, Arangjelovski T, Mark P. Creeping effect of SFRC elements under specific type of long term loading, in RILEM Bookseries V14 Creep behaviour in cracked sections of fibre reinforced concrete (2017) 211-222.

