

## **CREEP EN ESTADO FISURADO EN HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRAS**

Raúl Zerbino<sup>1\*</sup>, Diego .H. Monetti<sup>2\*</sup>, Graciela Giaccio<sup>3\*</sup> y Ravindra Gettu<sup>4\*\*</sup>  
\* Depto. Construcciones Facultad de Ingeniería UNLP. 48 y 115 (1900) La Plata, Argentina  
\*\* Indian Institute of Technology Madras.

**Palabras claves** Hormigón reforzado con fibras, fluencia, arrancamiento, fibras poliméricas

### **RESUMEN**

El *fib* Model Code 2010 presenta avances significativos para uso de Hormigón Reforzado con Fibras ya que no sólo considera su clasificación en función de los niveles resistentes sino que brinda criterios para el diseño estructural de elementos como losas armadas, losas sin armadura convencional, uniones de columnas, paredes y muros. Sin embargo el documento no considera casos donde las cargas sostenidas den lugar a deformaciones diferidas (fluencia). Esto genera un interés particular para las macrofibras poliméricas y se ha formado un comité de la RILEM "*Creep behavior on cracked sections in FRC*". Este trabajo analiza los mecanismos que provocan deformaciones diferidas en hormigones con fibras en estado fisurado y discute en qué casos tales deformaciones adquieren relevancia. Se sintetizan resultados sobre hormigones con fibras de acero y poliméricas.

### **INTRODUCCION**

El Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) es un material de alta performance utilizado ampliamente en pavimentos, pisos industriales y revestimientos de túneles. A la vez, las fibras combinadas con barras de armadura convencional, reducen los anchos de fisuras y las flechas aumentando la vida en servicio de estructuras en ambiente agresivo (1,2), lo que fue verificado en hormigones reforzados con fibras de acero (HRFA) y en hormigones reforzados con fibras poliméricas (HRFP) (3). Como las fibras actúan principalmente luego de iniciadas las fisuras, valorar la fluencia en estado fisurado, las condiciones de estabilidad de las fisuras y la capacidad residual de transferir esfuerzos bajo cargas sostenidas constituye un tema relevante.

Un avance significativo para aprovechar las ventajas que depara el uso del refuerzo con fibras ha sido la incorporación en el *fib* Model Code 2010 de criterios para el diseño estructural (4); sin embargo indica en forma explícita que no es aplicable para fibras susceptibles a procesos de deformaciones diferidas. El tema adquiere impacto en el caso de las fibras poliméricas (macrofibras sintéticas) ya que no sólo hay menos antecedentes de su respuesta, sino que el polímero tiene mayor deformabilidad y posibilidades de desarrollar deformaciones viscosas a las temperaturas de aplicación que el acero.

<sup>1</sup> Investigador CONICET. Prof. Dpto. de Construcciones. Facultad de Ingeniería, UNLP.

<sup>2</sup> Docente Dpto. de Construcciones. Facultad de Ingeniería, UNLP.

<sup>3</sup> Investigador CIC. Prof. Dpto. de Construcciones. Facultad de Ingeniería, UNLP.

<sup>4</sup> Professor, Dept. of Civil Engng., Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India

Considerando esta problemática el comité RILEM-TC 261-CCF “*Creep behavior on cracked sections in FRC*” tiene por objetivos analizar los mecanismos de fluencia, proponer métodos de ensayo para caracterizar la fluencia en estado fisurado y analizar las variables involucradas como propiedades, dosis y tipo de fibras y nivel de sollicitación. Este trabajo discute los mecanismos que provocan deformaciones diferidas en HRFA y HRFP en estado fisurado y analiza resultados de varios estudios experimentales.

## **ANTECEDENTES**

Varios estudios de la fluencia de HRF en estado fisurado se realizaron bajo cargas de flexión. Si bien sólo parte de la sección está sometida a esfuerzos de tracción, el ensayo presenta varias ventajas: es representativo de muchas aplicaciones destacadas, es más fácil de realizar que el ensayo de tracción directa (5), utiliza el mismo tipo de sollicitación y dispositivos que se emplean para clasificar al HRF según norma EN 14651 (6), y es sencillo establecer el nivel de fisuración previa. Un procedimiento de ensayo fue propuesto por Arango et al. (7); estudiando HRFA (8) se encontraron bajos coeficientes de fluencia para cargas de poca magnitud, y una clara influencia del tipo de fibra, del nivel de carga y de la resistencia del hormigón; concluye que la dosis de fibras afecta la fluencia al aumentar la capacidad de carga y que el uso de fibras más esbeltas, incluso en bajos contenidos, permite controlarla. Empleando una metodología similar, otro estudio (9) sobre un HRFA con postpico con endurecimiento, donde se prefisuraron prismas hasta aperturas de fisuras (CMOD) entre 0,2 y 3,5 mm, concluye que para CMOD menores a 1 mm, la respuesta es estable si no se supera la tensión alcanzada durante la fisuración inicial y que, considerando la variabilidad del HRF, para mayores aperturas es mejor no superar esfuerzos de 0,50 de  $f_{R4}$  (resistencia residual para CMOD 3,5 mm). El efecto de la apertura de fisura previa sobre la capacidad resistente fue observado en un estudio de fluencia sobre HRFP (10).

En un estudio sobre HRFA y HRFP (11) no se observaron diferencias significativas en las deformaciones diferidas bajo cargas de flexión en tres o cuatro puntos, siendo la última configuración más estable y sencilla de implementar; bajo ciclos de carga-descarga se midieron deformaciones diferidas del mismo orden que bajo cargas permanentes de igual magnitud y se midieron velocidades de CMOD casi un orden de magnitud menores en HRFA que en HRFP. El HRFA tuvo respuesta estable para esfuerzos menores al 60 % de  $f_{R1}$  (tensión residual a CMOD 0,5 mm), mientras que en HRFP el esfuerzo para asegurar la estabilidad en el tiempo fue menor y se encontraron grandes diferencias de velocidad de crecimiento de CMOD entre distintas fibras. Se han medido diferencias significativas en el mecanismo de arrancamiento (adherencia) de diversas macrofibras sintéticas (12). Ni en HRFA ni en HRFP se observaron cambios en la capacidad residual de los HRF luego de ser sometidos a cargas de larga duración (11).

Una ventaja del HRFP es que mantiene su capacidad residual para grandes CMOD (13). Al analizar la fluencia de cuatro HRFP y un HRFA que luego de fisurados fueron expuestos al aire a 20°C o 45°C o sumergidos en agua de mar (14) la fluencia fue mucho mayor en los HRFP que en el HRFA y se detectaron diferencias en los efectos de envejecimiento entre los HRFP. En el HRFA expuesto en ambiente marino la corrosión de las fibras afectó la capacidad residual, mientras que la misma se mantuvo en los HRFP. Estudiando paneles de HRFA y HRFP (15) con fisuras iniciales delgadas y esfuerzos menores al 50 % de la capacidad residual estática, se encontró mayor estabilidad con fibras de acero y mayores deformaciones de fluencia y aperturas de fisuras con fibras poliméricas. Sin embargo Kanstad y Žirgulis (16) no encontraron diferencias en la fluencia entre HRFA y HRFP al analizar vigas previamente fisuradas hasta CMOD de 1,5 mm, cargadas al 50 % de su capacidad residual; también observaron que la capacidad residual no cambia significativamente al retirar las cargas permanentes.

## **VARIABLES Y MECANISMOS QUE AFECTAN LA FLUENCIA**

En este apartado se discute sobre el estado del conocimiento relativo a las variables y mecanismos que intervienen en la fluencia del HRF en estado fisurado a fin de evaluar la relevancia e impacto del tema en diferentes aplicaciones.

Las fibras atraviesan y controlan la propagación de las fisuras en base a su adherencia; el proceso de arrancamiento depende de la adhesión física y/o química y principalmente del anclaje mecánico (17); es evidente que los mecanismos de adherencia no son independientes del tipo de fibra; el efecto del anclaje mecánico es particularmente relevante en el caso de las fibras conformadas. Las fibras que cosen las fisuras están sometidas a cargas y el conjunto se deforma progresivamente por efecto del arrancamiento (pull out) de las fibras (18).

También intervienen otros factores en las deformaciones diferidas. Bajo esfuerzos de flexión el crecimiento de las fisuras reduce la zona comprimida y en consecuencia aumentan los esfuerzos a los que se someten las fibras. También pueden producirse retracción y deformaciones de compresión en la zona comprimida. Es importante destacar que los incrementos en las deformaciones de dicha zona que resultan de los mayores esfuerzos por reducción de sección ante el crecimiento del largo de fisura no se deben confundir con la fluencia en compresión del HRF. En estado fisurado la parte comprimida de un prisma puede ser considerablemente pequeña, tanto más cuando más efectivo es el refuerzo de las fibras y por lo tanto los esfuerzos crecen en buen grado.

Otro proceso que puede contribuir a la fluencia es la deformación diferida del filamento de las fibras. Esto no ocurre en las fibras de acero, ya que éste no sufre fluencia a temperatura ambiente, pero se puede dar en las fibras poliméricas, particularmente si se elevan las temperaturas de servicio. Se han informado roturas en HRFP luego de varios años bajo carga, aún cuando inicialmente lucían estables (16). Un estudio sobre fibras poliméricas (18) concluye que el nivel de esfuerzo afecta el tiempo de falla y la deformación total alcanzada. La fluencia puede ser muy grande, y además del nivel de carga, la deformación del filamento puede jugar un rol importante en la apertura total de fisuras. Se encontró fluencia en el material aún a muy bajos niveles de carga.

La fluencia además de aumentar anchos y longitudes de fisuras puede provocar nuevas fisuras en especial en HRF con respuesta tipo endurecimiento. Las deformaciones de fluencia y su variabilidad dependen de los contenidos de fibras en las superficies de fractura, en general a altos contenidos de refuerzo la fluencia es menor (13, 19). El nivel de carga constituye un parámetro de importancia en la respuesta del HRF fisurado (8, 9, 11, 20). Mackay y Trottier (21) observaron mayor fluencia en HRFP y coinciden en limitar el nivel de carga para prevenir la falla; recomiendan que los esfuerzos permanentes no superen el 60 % de la capacidad residual, pero es evidente que el nivel de carga para garantizar una respuesta estable se relaciona con el tipo de respuesta residual (endurecimiento – ablandamiento) y con el nivel de fisuración inicial.

La alta temperatura incide en HRFP (22, 23) y puede duplicar las deformaciones de fluencia con respecto a la respuesta a temperatura ambiente; el fenómeno se produce en especial para grandes aperturas (> 1,5 mm). Alternando ambientes secos y húmedos se produjeron mayores deformaciones en HRFP, en especial para temperaturas > 40°C (24). Aún en casos de grandes deformaciones de fluencia, si no se degradan las fibras, como en el caso de fibras de acero expuestas en ambiente húmedo (14), no existen mayores efectos sobre la resistencia residual con respecto a los ensayos bajo cargas rápidas.

El arrancamiento de las fibras de la matriz constituye el principal mecanismo que da lugar a deformaciones diferidas; el diámetro de las fibras, la conformación en sus

extremos, las propiedades de las interfaces y la resistencia de la matriz son los principales factores involucrados. La ausencia de un gancho, sumada al menor módulo de elasticidad del polímero y un módulo transversal (Poisson) mucho mayor al del acero, provocan mayor deformación transversal que disminuye aún más la adherencia de las fibras poliméricas. En fibras onduladas la falla del anclaje es más relevante. Los procesos de microfisuración en las interfaces fibra-matriz facilitan el arrancamiento. La influencia de la falla del anclaje es, como era de esperar, más importante en las fibras de acero.

La deformación diferida del mismo filamento es una cuestión a atender en las fibras poliméricas; sin embargo existen notables diferencias entre distintas fibras. En un polímero las deformaciones se deben a movimientos de los átomos a nuevas posiciones con alta energía y grandes reacomodamientos dentro de la microestructura, proceso que demanda tiempo. Ambos mecanismos crecen al aumentar la temperatura. La formación de enlaces cruzados entre las cadenas del polímero mejora la resistencia a la fluencia; la fluencia disminuye al aumentar el peso molecular, depende de la orientación, polaridad, cristalinidad y temperatura de transición vítrea del polímero. Un estudio sobre morteros con fibras polivinilo alcohol con endurecimiento en el postpico concluye que estas fibras no sufren fluencia significativa bajo cargas sostenidas y que la formación de nuevas fisuras y el ensanchamiento de las existentes (25) son los mecanismos dominantes que provocan deformaciones diferidas.

## EXPERIENCIAS

### Propiedades de los HRF y detalles metodológicos

En este apartado se analizan los resultados correspondientes a ensayos de fluencia en flexión en estado fisurado de varios hormigones reforzados con diferentes tipos y dosis de fibras de acero y poliméricas; las mezclas representan aplicaciones tradicionales de HRF. Se comparan las deformaciones medidas en términos de la velocidad de apertura de fisura para diferentes niveles de sollicitación. Se empleó una metodología similar a la propuesta por Arango et al. (4). Los pórticos de carga y dispositivos de medición de la apertura de fisura (CMOD) fueron descritos previamente (10, 11, 26); las cargas se aplican con un sistema de palanca y las CMOD se miden mediante diales micrométricos y extensómetros tipo LVDT (durante las primeras horas). El ensayo emplea prismas de 150x150x600 mm y consta de tres etapas: a) se prefisuran los prismas siguiendo la norma EN14651 (6) hasta una CMOD (adoptada en función de la aplicación), la tensión al detener el ensayo se utiliza como referencia y se identifica como tensión final ( $f_{final}$ ) de prefisuración; b) se realiza el ensayo de fluencia propiamente dicho adoptando un nivel de carga sostenida; se suele pasar de la configuración de carga en tres puntos, empleada en la fisuración previa, a una disposición en cuatro puntos que facilita el montaje cuando se disponen varias probetas en columna; c) pasado el lapso establecido se procede a la descarga y se puede reiterar un ensayo de flexión siguiendo la norma EN14651 con el fin de determinar la capacidad residual remanente.

Se analizan a continuación valores de fluencia obtenidos sobre los siguientes HRF:

- **A1:** incorpora 30 kg/m<sup>3</sup> de fibras de acero de 50 mm de longitud y 1 mm de diámetro. Según el *fib* Model Code 2010 (4) S1 se clasifica como HRF tipo 3b.
  - **P2:** reforzado con 3 kg/m<sup>3</sup> de una macrofibra sintética de 40 mm de largo y 0.38 mm de diámetro equivalente. Corresponde a un HRF tipo 2c.
  - **P3:** al igual que el anterior incorpora 3 kg/m<sup>3</sup> de otra macrofibra sintética, en este caso de 60 mm de longitud y 0.62 mm de diámetro. Se trata de un HRF tipo 2b.
- Estos tres HRF fueron prefisurados hasta una CMOD de 0,5 mm; y luego se aplicaron diferentes regímenes de cargas sobre prismas montados en columnas de a tres (11).

El hormigón de base, similar en todos, contenía 360 kg/m<sup>3</sup> de cemento, 1000 kg/m<sup>3</sup> de piedra partida granítica de 19 mm de tamaño máximo, 900 kg/m<sup>3</sup> de arena silícea natural y una dosis apropiada de superfluidificante. La relación a/c fue del orden de 0.40 y los niveles de resistencia media a compresión variaron entre 40 y 50 MPa.

- **P4:** incluye 3,5 kg/m<sup>3</sup> de otra macrofibra sintética (de 54 mm de largo y 0,46 mm de diámetro) (10); el hormigón de base empleó 350 kg/m<sup>3</sup> de cemento, 890 kg/m<sup>3</sup> de arena silícea natural, 970 kg/m<sup>3</sup> de piedra partida granítica de 19 mm de tamaño máximo y un reductor de agua convencional; la relación a/c fue 0,43 y la resistencia a compresión 42 MPa. Los prismas se cargaron en forma individual y las fisuras previas variaron entre 0,2 y 1,5 mm. Este HRF se clasifica como Clase 1a.
- **P5:** esta mezcla incorpora 6 kg/m<sup>3</sup> de refuerzo que combina fibras fibriladas estándar de polipropileno con macrofibras monofilamento de copolímero muy resistentes de 54 mm de longitud y 0,38 mm de diámetro. Los materiales y las proporciones del hormigón de base fueron similares al caso anterior; la relación a/c fue 0,40 y la resistencia a compresión 51 MPa. Se trata de un HRF Clase 4c. Los prismas se cargaron en columnas de a tres y las fisuras previas fueron 0,2 ó 0,5 mm.
- **P RRT:** contiene 10 kg/m<sup>3</sup> de macrofibras sintéticas de 40 mm de largo, y se trata de un HRF Clase 1e.
- **A RRT:** contiene 30 kg/m<sup>3</sup> de fibras de acero conformadas de 60 mm de largo y el HRF resultante es Clase 3c.

Las dos últimas mezclas corresponden a un Round Robin Tests (RRT) del comité RILEM TC 261-CCF, con resistencias a compresión entre 30 y 40 MPa a 28 días; el estudio se realiza con fisuras previas de 0,5 mm y niveles de carga del 50 % de  $f_{R1}$ .

## Análisis de resultados y discusión

La Figura 1 muestra curvas tensión – CMOD en flexión del HRF P5, la respuesta residual completa (norma EN14651) y dos curvas representativas de la fisuración previa.

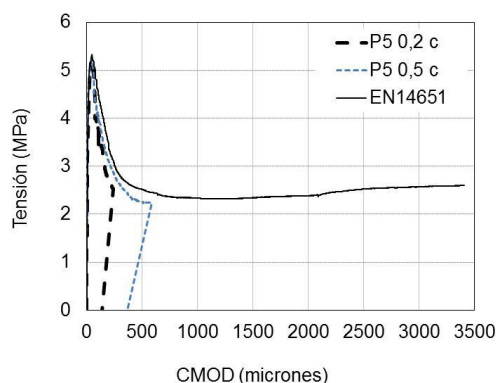


Figura 1: HRF P5: Curvas tensión – CMOD en flexión (fisuración previa y ensayo completo).

Tabla 1: HRF P5. Resistencia y capacidad residual durante el ensayo de fisuración inicial y resultados del ensayo de fluencia.

Fisura inicial		0,2 mm			0,5 mm		
Viga		P5 <sub>0,2a</sub>	P5 <sub>0,2b</sub>	P5 <sub>0,2c</sub>	P5 <sub>0,5a</sub>	P5 <sub>0,5b</sub>	P5 <sub>0,5c</sub>
$f_L$	MPa	4,7	5,6	5,1	5,0	5,2	5,0
$f_{R0,2}$	MPa	3,3	3,0	2,7	2,6	3,1	3,8
$f_{R1}$	MPa	-	-	-	1,9	2,2	2,9
CMOD <sub>res</sub>	μm	121	128	137	379	368	342
f aplicada	(MPa)	1,80	1,71	1,70	1,35	1,39	1,49
$f/f_{final}$ $f_{R0,2}$ o $f_{R1}$	(%)	0,56	0,60	0,67	0,71	0,62	0,52
Velocidad	(mm/año)	0,252	2,916	rotura	rotura	0,270	0,181

La Tabla 1 sintetiza los resultados correspondientes a 6 prismas de P5, 3 fisurados hasta 0,2 mm y 3 hasta 0,5 mm. Como algunos prismas se prefisuraron sólo hasta 0,2 mm, se calculó una tensión residual para esa apertura ( $f_{R0,2}$ ). Además de la resistencia a primera fisura ( $f_t$ ) y la resistencias residuales  $f_{R0,2}$  y  $f_{R1}$  (CMOD 0,5 mm), se indica la apertura residual al descargar (CMOD<sub>res</sub>). Para los ensayos de fluencia indica la tensión aplicada, que fue del orden del 60 % de  $f_{R0,2}$  o  $f_{R1}$ , y la velocidad de apertura de fisura (en mm/año). Obsérvese que dos prismas fallaron luego de pocas horas bajo carga y en estos dos casos las relaciones tensión aplicada / tensión final ( $f / f_{final}$ ) fueron las más elevadas. En los otros prismas los ensayos se prolongaron durante más de 5 meses.

La Figura 2 muestra curvas típicas de crecimiento de CMOD en el tiempo obtenidas durante los ensayos de fluencia del RRT con HRFA y HRFP. Se incluyen las medidas de un dial micrométrico ubicado a la altura de la fibra más traccionada de cada prisma y los registros obtenidos a partir de LVDT ubicados a la altura del ápice de la entalladura. Las medidas de los LVDT se han multiplicado por 1.2 para tener en cuenta la diferencia de posición con respecto a la altura de la viga (150 mm / 125 mm), se destaca la coherencia entre ambas medidas. La Figura 3 muestra el montaje de los prismas y los sistemas de medición de apertura de fisuras durante los ensayos de fluencia.

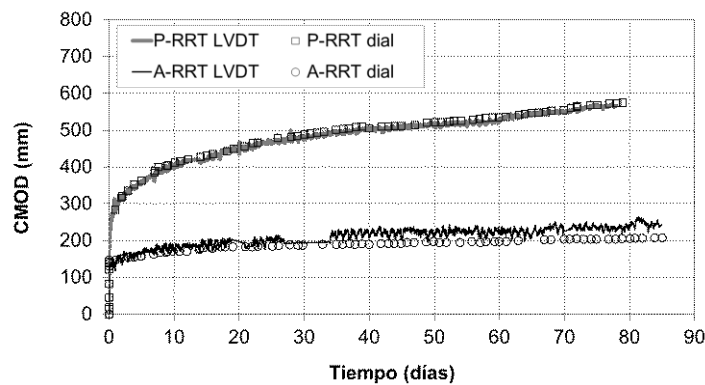


Figura 2: Ensayos de fluencia: curvas incremento de la apertura de fisura (CMOD) – tiempo.



Figura 3: Probetas y dispositivos de medida empleados en los ensayos de fluencia.

La Figura 4 compara resultados obtenidos en los diferentes HRF y muestra la influencia del nivel de carga sobre la velocidad de fluencia (Crack Opening Rate, COR). El esfuerzo se expresa como valor relativo a la tensión al final del proceso de fisuración inicial ( $f/f_{final}$ ); se incluyen datos del HRF A1 y de P2 y P3 reforzados con dos macrofibras sintéticas diferentes. Se aprecia que la COR crece significativamente en los HRFP (líneas discontinuas) con variaciones que pueden ser de un orden de magnitud respecto al HRF A1 (línea continua) y que hay diferencias notables entre diversas fibras poliméricas. La figura también incluye los valores obtenidos sobre P4 (10) (línea de puntos), y los correspondientes a P5, A-RRT y P-RRT; se aprecia la consistencia de estos resultados con las experiencias previas. Una velocidad mayor a 1 mm/año parece indicar condiciones de inestabilidad (rotura).

La Figura 5 representa los mismos resultados modificando la escala del eje de ordenadas. Se aprecia para cada HRF que al superar cierto nivel  $f/f_{final}$  se desencadena la rotura, en los HRF P parece ubicarse cercano a 0,60 pero en un caso se reduce a 0,40. En HRFA el nivel crece a relaciones del orden de 0,80. Sin embargo debe destacarse que estos valores no sólo dependen del tipo de fibra sino que, para una misma fibra, cambian con el contenido de refuerzo (es decir, la dosis de fibras); a la vez, como fuera indicado en (9) existe una interrelación entre nivel de fisura previa y nivel de carga aplicado y para fisuras pequeñas sobre HRF con post pico con endurecimiento pueden superar el valor 1.

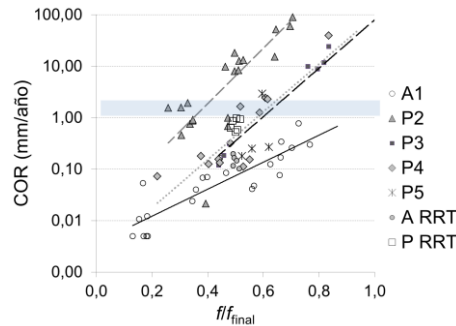


Figura 4 Efecto del nivel de carga aplicado sobre la velocidad de fluencia en diferentes HRF.

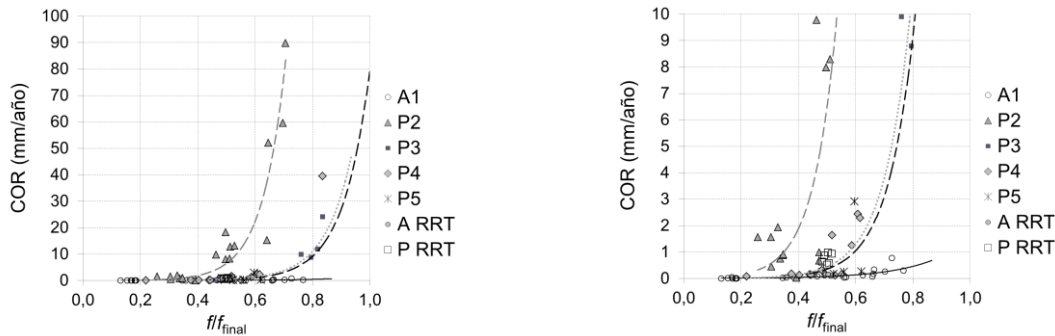


Figura 5 Nivel de carga aplicado y tendencia a la inestabilidad.

Finalmente se destaca que en general, y a pesar de encontrar altas COR en HRFP, las propiedades residuales no cambian substancialmente luego de los ensayos de fluencia. En el HRF A1 luego de 10 meses bajo cargas sostenidas las propiedades residuales mejoraron. En los HRF P2 y P3 sólo en algunos casos se redujo la capacidad residual pero las tensiones nunca fueron menores a 1 MPa (representa más del 20 %  $f_L$ ).

## CONCLUSIONES

Los mecanismos que definen la fluencia en estado fisurado del HRF se relacionan principalmente con procesos de arrancamiento de las fibras y la propagación de la propia fisura. Pero también otros factores contribuyen a las deformaciones diferidas como el aumento de esfuerzos en la zona comprimida por efecto del crecimiento de las fisuras.

La fluencia suele ser mayor en HRFP pero depende del tipo y contenido de fibras incorporadas. En fibras poliméricas la fluencia del filamento y la pérdida de adherencia por la mayor deformación transversal de la fibra también pueden contribuir a la fluencia.

Sólo en algunos casos la fluencia en estado fisurado representa una cuestión crítica. Cuando las fibras se combinan con armaduras convencionales los esfuerzos van a ser tomados por dichas armaduras, y el efecto de la fluencia no será significativo y se alcanzará rápidamente la estabilidad.



## REFERENCIAS

- (1) Tiberti G, Minelli F, Plizzari GA (2012) Crack control in fibrous RC elements. RILEM PRO88, Proc 8<sup>th</sup> RILEM Int Symp on FRC, Portugal Ed. J. Barros.
- (2) Nakov D, Markovski G (2012) Time dependant behaviour of SFRC elements under sustained loads. RILEM PRO88, Proc 8<sup>th</sup> RILEM Int Symp on FRC, Portugal Ed. J.Barros.
- (3) Vasanelli E, Micelli F, Aiello MA, Plizzari G (2013) Long term behavior of FRC flexural beams under sustained load. *Engineering Structures* 56: 1858–1867.
- (4) Féd Int du Béton. (2013) *fib Model Code for Conc Struc 2010*. Ernst & Sohn, Berlin.
- (5) Zhao G., di Prisco M, Vandewalle L. (2014). Experimental investigation on uniaxial tensile creep behavior of cracked steel fiber reinforced concrete. *Mat & Str*, 48(10): p. 3173-3185
- (6) Ecm for Standarization (2005) EN14651:2005 Test method for metallic fibered concrete - measuring the flexural tensile strength (Limit of proportionality (LOP), Residual). Brussels.
- (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) Arango S, Taengua EG, Martí Vargas JR, Serna Ros P. A comprehensive study on the effect of fibers and loading on flexural creep of SFRC. RILEM PRO 88, 8<sup>th</sup> RILEM Int. Symp on FRC, Portugal, (2012), Ed. J. Barros.
- (9) 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.
- (10) Monetti DH, Giaccio G,y Zerbino R. Fluencia en estado fisurado en hormigón reforzado con macrofibras sintéticas, VI Cong Int, 20<sup>a</sup> R. Técnica AATH, Argentina, 2014, 135-142.
- (11) Zerbino R., Monetti D.H., Giaccio G. 'Creep behaviour of cracked steel and macro-synthetic fibre reinforced concrete', *Materials and Structures* (2016) 49:3397–3410.
- (12) Bossio ME, Torrijos MC, Zerbino R, Giaccio G (2012) Pull out behaviour of macro synthetic fibres. In Cairns JW et al eds, *Bond in concrete 2012: Brescia*, 901–906.
- (13) Buratti N, Mazzotti C (2012) Effects of different types and dosages of fibres on the long-term behaviour of fibre-reinforced self-compacting concrete. In: RILEM PRO88, 8<sup>th</sup> RILEM Int Symp on FRC, Guimaraes, Barros J (ed)
- (14) Serna Ros P, Martí Vargas JR, Bossio ME, Zerbino R. Creep and residual properties of cracked macro-synthetic fibre reinforced concretes, *Mag of Conc Res* 67 (2015).
- (15) Bernard, E.S. (2010). Influence of fiber type on creep deformation of cracked fiber-reinforced shotcrete panels. *ACI Mat J*, 107(5), 474-480.
- (16) Kanstad T, Žirgulis G. (2012) Long-time creep testing of pre-cracked fibre reinforced concrete beams. In: Proc. 8<sup>th</sup> RILEM Int. Symp. FRC, Guimaraes, Portugal, Barros J (ed).
- (17) de Montaignac R, Massicotte B, Charron JP (2013) Finite-element modelling of SFRC members in bending. *Mag Conc Res* 65 (19): 1133–1146.
- (18) Vrijdaghs., di Prisco M, Vandewalle L Creep deformations of structural polymeric macrofibras” FRC-CREEP 2016, RILEM-TC 261-CCF, Valencia, March, 2016
- (19) Babafemi AJ, Boshoff WP. Tensile creep of macro-synthetic fibre reinforced concrete under uni-axial tensile loading. *Cem and Concrete Comp* 55, (2015). 62–69.
- (20) García-Taengua E, Arango S, Martí-Vargas JR, Serna P. (2014). Flexural creep of steel fiber reinforced concrete in the cracked state. *Construction and Building Mat*, 65, 321-329.
- (21) Mackay J, Trottier JF (2004) Shotcrete: more engineering developments. In Proc 2<sup>nd</sup> Int Conf on Eng Developments in Shotcrete, Cairns, Australia (Bernard ES ed.), 183–192.
- (22) Buratti N, Mazzotti C, Savoia M, Rossi (2011). Temperature and Loading Level Effect on the Long-term Behaviour of MSFRC and SFRC'. *Fibre concrete 2011*, Prague.
- (23) Cochrane JT, Flexural Creep Behaviour of Fibre Reinforced Concrete under High Temperatures' Thesis. Master of Applied Science, Dalhousie University, Canada, 2003.
- (24) Kusterle W. (2016 ) Flexural creep tests on beams-8 years of experience with steel and synthetic fibres' FRC-CREEP 2016 ,RILEM-TC 261-CCF, Valencia, 9-10 March, 2016
- (25) Boshoff WP; Mechtcherine V, van Zijl GPAG. Characterising the time-dependant behaviour on the single fibre level of SHCC: Part 1: Mechanism of fibre pull-out creep”. *Cement and Concrete Research* Vol. 39, (2009) 779–786
- (26) Monetti DH, Giaccio G, Zerbino R. Efecto de eventos de carga y descarga en la respuesta de elementos fisurados de hormigón reforzado con fibras. V Congreso Int.; 19 R. Técnica AATH, Bahía Blanca, Argentina, (2012), 295-302.