

HAC2018 | Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Control de fisuración en vigas de hormigón armado reforzado con diferentes fibras

M. Fasciolo ⁽¹⁾, A. Conforti ⁽¹⁾, Zerbino ⁽²⁾ y G. Plizzari ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Department of Civil, Environmental, Architectural Engineering and Mathematics, University of Brescia, Via Branze 43, Italia.

⁽²⁾ Facultad de Ingeniería, UNLP - LEMIT, La Plata, Argentina.

DOI:<http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5502>

RESUMEN

La incorporación de fibras al hormigón controla la propagación de fisuras dando lugar a incrementos en la resistencia residual y tenacidad del material. Cuando se incorporan en elementos estructurales de hormigón armado las fibras contribuyen a la resistencia al corte y favorecen el control en el ancho de fisuras con sus consecuentes ventajas en lo concerniente a la vida en servicio y la durabilidad del material. Este trabajo presenta los resultados de un estudio de la influencia del tipo y contenido de fibra sobre el control de fisuración en flexión en vigas de hormigón armado. Se estudió la distribución y propagación de fisuras en ensayos de flexión con cargas en cuatro puntos realizados sobre vigas de hormigón armado con una sección rectangular con 150 mm de arista y una luz entre apoyos de 840 mm. Se compara la respuesta de hormigones que incorporan diferentes contenidos de fibras de acero, macrofibras poliméricas y macrofibras de vidrio. Como referencia se realizaron ensayos de flexión en tres puntos sobre prismas entallados de 150 x 150 x 600 mm siguiendo la norma EN14651 para la caracterización del hormigón con fibras y ensayos de compresión sobre cilindros estándar. Los resultados obtenidos ponen en evidencia la contribución del tipo y contenido de fibras sobre el control de fisuras en flexión.

PALABRAS CLAVE: Hormigón armado convencional reforzado con fibras; fibras de acero; macrofibras sintéticas; macrofibras de vidrio; control de fisuras.

1.- INTRODUCCIÓN

Es reconocido que la incorporación de fibras al hormigón controla la propagación de fisuras aumentando la resistencia residual y tenacidad. Cuando se incorporan en elementos de hormigón armado las fibras contribuyen a la resistencia al corte permitiendo reducir al menos parcialmente la armadura convencional y también pueden mejorar la adherencia acero-hormigón por lo cual es posible reducir la longitud de adherencia. Pero un aspecto importante es que las fibras permiten controlar el ancho de fisuras lo que se traduce en importantes ventajas en lo concerniente a la extensión de la vida en servicio y la durabilidad de las estructuras. La incorporación de apartados específicos en el *fib* Model Code 2010 [1] para el diseño estructural de elementos de Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) ha representado un importantes avance para el uso de este material.

Varias investigaciones han analizado el efecto de la incorporación de fibras en la fisuración de elementos estructurales con de armadura convencional [2-7]. Los primeros trabajos sobre elementos fabricados con hormigones con fibras de acero datan de fines de los años '90, como los desarrollados por Mitchell et al. [2], Bischoff [3], Noghabai [4] y Vandewalle [5], mostraron que la incorporación de fibras de acero redujo el espaciamiento y el ancho de las fisuras, y proponen modelos para evaluación analítica. Tiberti et al. [6] investigaron el efecto de la presencia de fibras de acero tensores de hormigón. Distinguiendo entre la etapa de formación de las fisuras y su posterior estabilización, no encontraron una clara relación entre las deformaciones medidas y la tenacidad del HRF, aunque observaron un aumento global de la tenacidad y una reducción general del espaciamiento medio de fisuras. Estudiando la fisuración en vigas a escala real [7] se encontró que la incorporación de fibras no incrementa significativamente la resistencia a flexión y la ductilidad en estado límite último (ULS). Existe consenso que el HRF mejora la respuesta en estado límite de servicio (SLS) en lo referido al control de fisuras y flechas, ya que las fibras favorecen la transferencia de tensiones de tracción desde las armaduras hacia el hormigón circundante mejorando la tenacidad en tracción de los elementos estructurales. La combinación de este mecanismo con la capacidad residual en tracción que imparten las fibras conduce a la reducción en el ancho y espaciamiento de fisuras.

Este trabajo presenta los primeros resultados de un estudio sobre la influencia del tipo y contenido de fibra sobre el control de fisuración en flexión en vigas de hormigón armado. Se compara la distribución y tamaño de fisuras de hormigones que incorporan diferentes contenidos de fibras de acero, macrofibras poliméricas y macrofibras de vidrio.

2.- PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1.- Vigas de hormigón armado

El estudio fue realizado sobre vigas de 150 x 150 x 900 mm que incluyen dos barras de 10 mm de diámetro como armadura principal (refuerzo a flexión, $\rho = 0.87\%$) y estribos de 6 mm de diámetro distanciados cada 50 mm en los extremos de forma tal de evitar roturas por cortante. Las vigas fueron cargadas a flexión en 4 puntos sobre una luz de 840 mm.

La Fig. 1 muestra detalles de la geometría y configuración de carga de las vigas de hormigón armado, la zona central se dejó sin estribos a fin de estudiar el efecto de las fibras sobre el desarrollo de las fisuras. En lo relativo a las características de las armaduras se realizaron ensayos de tracción obteniendo como resultados tensiones de fluencia y de rotura iguales a 469,4 MPa (CV=0,01) y 632,3 MPa (CV=0,02) en el caso de las barras de $\varnothing 6$ mm y de 562,3 MPa (CV=0,03) y 690,7 MPa (CV=0,01) para las armaduras de $\varnothing 10$ mm respectivamente.

2.2 Materiales y mezclas

Se elaboraron 7 hormigones utilizando un hormigón de base similar, un hormigón sin fibras como referencia (RC) y 6 hormigones reforzados con 3 tipos de fibras diferentes en dos contenidos para cada una de ellas. La Tabla 1 indica las características de las fibras empleadas, una de acero con ganchos en sus extremos (S), una macrofibra de vidrio (G) y una macrofibras poliméricas (P). En todos los casos se emplearon como materiales cemento

Portland normal tipo CPF40, arena sílicea natural (densidad relativa 2,63, módulo de finura 2,8) y piedra partida granítica (densidad relativa 2,75, tamaño máximo 12 mm). Buscando como consigna una resistencia media a compresión del orden de 40 MPa, se adoptó una relación agua/cemento 0.4 y un contenido unitario de cemento $390 \pm 20 \text{ kg/m}^3$. En cada caso se ajustó la dosis de superfluidificante de forma tal que los diferentes hormigones tuvieran un asentamiento igual a $60 \pm 10 \text{ mm}$, a fin de lograr una adecuada compactación.

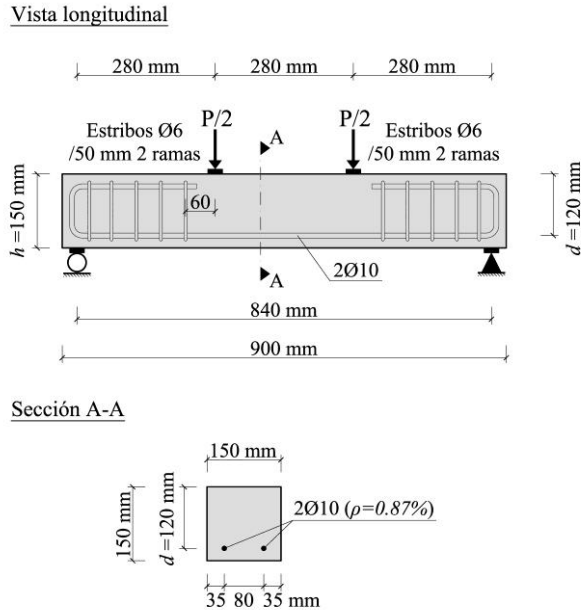


Figura 1. Detalle de la geometría y configuración de carga de las vigas de hormigón armado.

Tabla 1. Fibras empleadas.

Fibras	S	G	P
Material	acero	vidrio	Polímero
Largo l [mm]	50	36	58
Diámetro Ø [mm]	1,00	0,54	0,67
Aspecto geométrico l/Ø	50	67	86
Resistencia a tracción [MPa]	> 1100	> 1700	640
Módulo elástico [GPa]	210	72	6,8
Densidad relativa [g/cm ³]	7,85	2,68	0,91

Control de fisuración en vigas de hormigón armado reforzado con diferentes fibras...

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Tabla 2. Hormigones elaborados.

Hormigón		Fibra	Contenido [kg/m ³]	Volumen de hormigón [%]
Sin fibras	RC	-	-	-
Fibras de acero	S-25	S	25	0,32
	S-50	S	50	0,64
Fibras de vidrio	G-6	G	6	0,22
	G-12	G	12	0,44
Fibras poliméricas	P-5	P	5	0,55
	P-10	P	10	1,10

Considerando casos típicos de aplicación se seleccionaron dosis de 25 y 50 kg/m³ en el caso de las fibras de acero, de 6 y 12 kg/m³ en las macrofibras de vidrio, y de 5 y 10 kg/m³ para las fibras poliméricas. La Tabla 2 indica la identificación de cada una de las mezclas y el contenido de fibras en peso y en volumen extremos.

En cada caso se moldearon de 3 vigas de hormigón armado de 150 x 150 x 900 mm, tres vigas de 150 x 150 x 600 mm para realizar la caracterización en flexión y diez cilindros de 100 x 200 mm para determinar la resistencia a compresión. Las probetas se desmoldaron a las 24 horas y se curaron durante 28 días en cámara húmeda, luego fueron dejadas al aire en ambiente de laboratorio hasta la edad de ensayo que fue cercana a los 60 días. De este modo se evitó que durante los ensayos de cada serie que demandaron varios días, existieran variaciones por efecto de la edad o del contenido de humedad de las muestras.

2.3 Resultados de los ensayos de caracterización

La Tabla 3 indica los valores promedio de resistencia a compresión (entre paréntesis los CV) de cuatro cilindros determinada al momento de realizar los ensayos de las vigas de hormigón armado. Se aprecia que la resistencia es similar en los distintos hormigones y resulta del orden de 43 MPa.

Para caracterizar la respuesta en flexión del HRF se realizaron ensayos de flexión siguiendo la norma EN14651 [8]. La misma emplea una disposición de carga central, luz entre apoyos 500 mm y una entalladura en la zona traccionada; sobre esta última se fija un transductor tipo clip gage que se utiliza para el control de la velocidad de ensayo. La Fig. 2 muestra las curvas típicas tensión - apertura de fisura (CMOD) donde se aprecia la respuesta característica de cada tipo y dosis de fibra; también se puede apreciar la respuesta postpico del hormigón simple. A partir de los ensayos se calculan la tensión de primera fisura (f_L) que coincide con la carga máxima y los parámetros que valoran la resistencia residual previstos en la norma para aperturas de fisura iguales a 0,5 y 2,5 mm (f_{R1} y f_{R3}); en base a estos últimos es posible establecer la clase de HRF siguiendo la propuesta del *fib* Model Code 2010 [1]. Los resultados obtenidos también se consignan en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores promedio de resistencia a compresión y resistencia y capacidad residual en flexión.

Series	f_c [MPa]	$f_{L,m}$ [MPa]	$f_{R,1m}$ [MPa]	$f_{R,3m}$ [MPa]	Clase de HRF [1]
RC	42.1 (0.04)	3.71 (0.10)	-	-	-
S-25	43.7 (0.04)	4.51 (0.12)	3.22 (0.10)	2.90 (0.02)	3c
S-50	42.9 (0.04)	4.69 (0.04)	5.08 (0.02)	4.53 (0.11)	5b
G-6	45.5 (0.03)	4.51 (0.02)	1.63 (0.19)	0.76 (0.13)	1.5a
G-12	44.3 (0.02)	4.96 (0.01)	2.89 (0.09)	1.70 (0.13)	2.5a
P-5	39.9 (0.07)	3.65 (0.04)	1.62 (0.10)	1.64 (0.17)	1.5c
P-10	46.8 (0.05)	4.30 (0.07)	2.84 (0.12)	4.02 (0.17)	2.5e

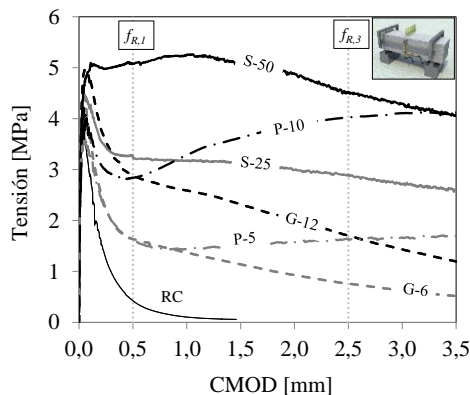


Figura 2. Curvas tensión - apertura de fisura (CMOD) sobre probetas entalladas (EN 14651 [8]).

2.4 Instrumentación de los ensayos sobre vigas de hormigón armado

La Fig. 3 muestra la configuración de carga y dispositivos de ensayo para el seguimiento de la evolución de las fisuras en los ensayos sobre vigas de hormigón armado. A un lado se dispuso un marco de carga fijo sobre cada apoyo a nivel del eje neutro de la viga, con capacidad de rotar en un extremo y desplazarse horizontalmente en el otro, sobre el cual se fijó un transductor tipo LVDT para valorar la flecha al centro. Asimismo se dispuso otro LVDT para medir la extensibilidad a lo largo del tercio medio a la altura de la fibra más traccionada (así se mide la suma del total de anchos de fisura en dicho tramo). Los ensayos se desarrollaron con control de desplazamiento del cabezal de la máquina. Se realizaron escalones de carga hasta valores establecidos y a llegar a los mismos se identificaron las fisuras, determinando su largo y su espesor. El proceso se repitió hasta superar la carga máxima y luego de ellas se tomaron algunas medidas adicionales. El ensayo se detuvo luego de alcanzar el colapso por trituración en la capa comprimida.

Control de fisuración en vigas de hormigón armado reforzado con diferentes fibras...

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

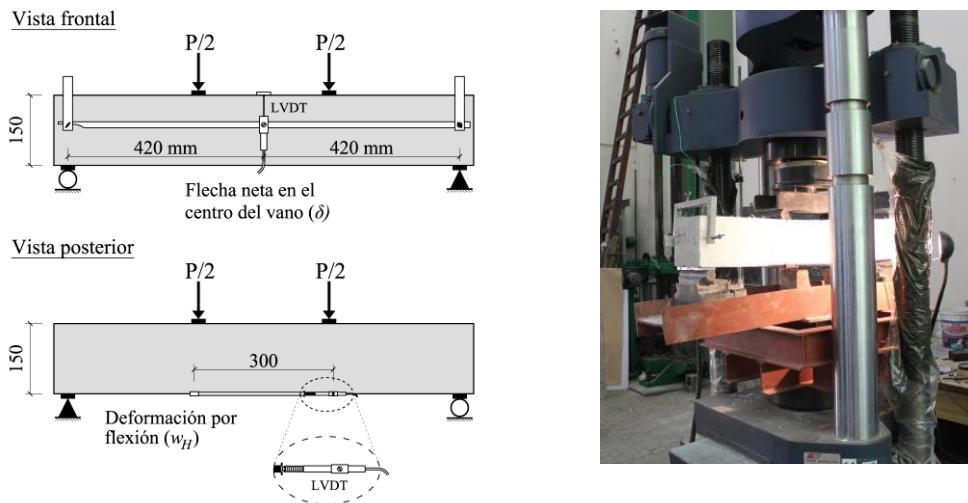


Figura 3. Ensayos sobre vigas de hormigón armado.

3.- RESULTADOS Y DISCUSION

Todas las muestras analizadas mostraron una falla típica en flexión para este tipo de armaduras. La Fig. 4 muestra curvas promedio carga – flecha obtenidas con las vigas armadas preparadas con el hormigón de base (RC) y con aquellos que incorporan 25 o 50 kg/m³ de fibras de acero (las curvas se dibujan hasta 10 mm para mostrar con mayor detalle la parte inicial). Se observa, como era de esperar, poco efecto de las fibras previo al inicio de las fisuras; luego para una carga del orden de 13 kN se aprecia un cambio de pendiente y a medida que aumenta la cantidad de fibras crece la rigidez. Se produjo un crecimiento estable de fisuras entre 40 y 60 kN aproximadamente. A mayores cargas las barras entran en fluencia, y el punto donde esto comienza depende de la tenacidad del hormigón. La capacidad de carga en este estado crece al aumentar la tenacidad del material (RC < S25 < S50) lo que se atribuye a la capacidad residual post fisuración provista por las fibras sobre cada fisura. Esta respuesta demuestra una influencia neta de las fibras de acero sobre el SLS en términos de rigidez post fisuración y sobre el ULS en términos de carga máxima.

Las curvas en el caso de las fibras poliméricas y con las macrofibras de vidrio fueron cualitativamente similares pero las diferencias por efecto del contenido de fibra fueron menores, lo que indica una pequeña influencia tanto sobre SLS como sobre ULS. No obstante se observó mayor efecto con el HRF P-10, que se coincide con la mayor tenacidad de este HRF (Fig. 2), en este sentido es posible que los incrementos puede estar ligados directamente a la tenacidad del material y no al tipo y dosis de fibras. El amplio rango de tenacidad considerado permite entonces un análisis profundo del fenómeno. La flecha para la cual se observó la fluencia fue similar en todos los HRF.

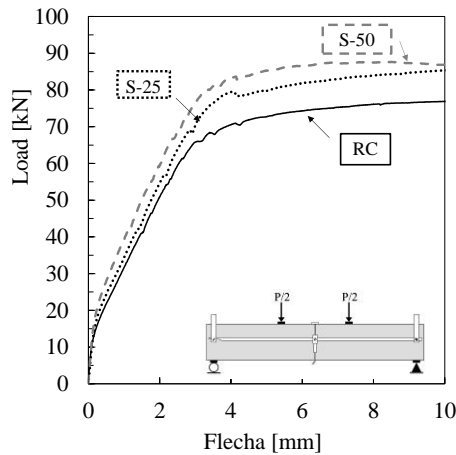


Figura 4. Curvas promedio carga – flecha al centro de la luz para vigas de hormigón armado preparadas con el hormigón de base (RC) y con 25 (S-25) o 50 (S-50) kg/m³ de fibras de acero.

Tabla 4. Resultados de los ensayos sobre vigas de hormigón armado.

Hormigón	P_{cr} [kN]	δ_{P40} [mm]	$w_{max40\text{ kN}}$ [mm]	$w_{max56\text{ kN}}$ [mm]	s_{rm} [mm]	P_{max} [kN]	δ_u [mm]
RC	13,0 (0,10)	1,43 (0,10)	0,15 (0,00)	0,22 (0,13)	88 (0,20)	77,5 (0,03)	15,7 (0,06)
S-25	12,9 (0,21)	1,26 (0,04)	0,10 (0,00)	0,17 (0,17)	69 (0,14)	85,4 (0,04)	15,8 (0,18)
S-50	13,9 (0,02)	1,03 (0,07)	0,07 (0,43)	0,13 (0,22)	62 (0,06)	87,9 (0,01)	14,1 (0,19)
G-6	11,8 (0,06)	1,31 (0,13)	0,10 (0,50)	0,17 (0,15)	71 (0,09)	79,5 (0,04)	15,5 (0,06)
G-12	12,7 (0,14)	1,27 (0,05)	0,10 (0,00)	0,15 (0,00)	64 (0,13)	78,0 (0,02)	13,8 (0,14)
P-5	13,3 (0,04)	1,30 (0,07)	0,13 (0,22)	0,22 (0,13)	69 (0,16)	79,0 (0,05)	15,9 (0,20)
P-10	13,8 (0,11)	1,20 (0,05)	0,15 (0,33)	0,20 (0,00)	63 (0,01)	82,4 (0,03)	17,6 (0,06)

En la Tabla 4 se resumen los principales resultados obtenidos a partir de los ensayos sobre vigas de hormigón armado. Se incluyen la carga de inicio de la fisuración (P_{cr}), la flecha para una carga de 40 kN (δ_{P40}), el ancho máximo de fisura (w_{max}) para 40 y 60 kN, el espaciamiento medio de fisuras (s_{rm}) evaluado en el período de fisuración estable, la carga máxima (P_{max}) y la flecha máxima de la viga (δ_u). Se indican entre paréntesis los coeficientes de variación. En ninguno de los HRF se evidencia una relación entre el inicio del estado de fisura estable y la tenacidad del material, y dicho estado se produjo aproximadamente entre

40 y 60 kN aunque sea la tenacidad de los materiales era distinta. Esto coincide con lo observado por Tiberti et al [6] al estudiar tensores de HRF.

En la Fig. 5 se muestra para el caso de las fibras de acero el efecto de la resistencia residual $f_{R,1}$ sobre el ancho de fisura y sobre la extensibilidad de las vigas en el tercio medio para niveles de carga de 40 y 56 kN. Se puede apreciar que la apertura de fisura, un parámetro fundamental en SLS se reduce claramente al aumentar la tenacidad del HRF. La suma de las aperturas es menor en HRF evidenciando menor deformación de las armaduras para una dada carga.

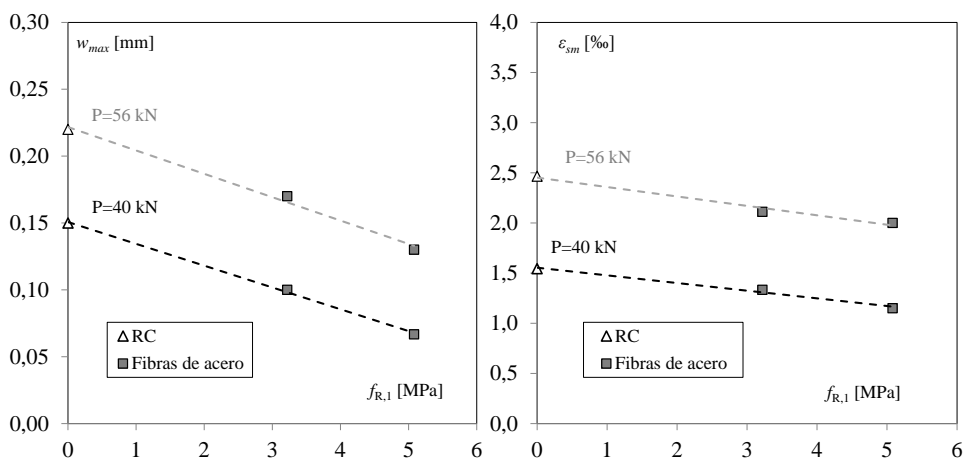


Figura 5. Efecto de la resistencia residual $f_{R,1}$ sobre el ancho de fisura (izquierda) y sobre la extensibilidad de las vigas en el tercio medio (derecha) para diferentes niveles de carga, en vigas de hormigón armado preparadas con RC, S-25 y S-50.

En la Fig. 6 se observa como las fibras dan lugar a una reducción del ancho medio de fisuras, las tensiones residuales transmitidas por las fibras sobre las fisuras reducen el tamaño de la zona de transmisión, esta reducción resulta linealmente relacionada con $f_{R,1}$; los resultados con HRF preparados con fibras poliméricas y de vidrio se ajustaron a esta tendencia por lo que en principio no depende del tipo de fibras. La reducción en el espaciamiento también se produjo para bajos valores de con $f_{R,1}$. Esto lleva a tener en los HRF un cuadro de fisuras diferente respecto a los elementos de RC con más fisuras pero más pequeñas.

Además como se demostró en la Fig. 5 la suma total de las fisuras para una carga dada es menor en el HRF con las consecuentes menores deformaciones de la armadura longitudinal. Esto lleva a tener otro beneficio en SLS que es la mayor rigidez postfisurativa y consecuentemente una menor deformación (flecha en el tercio medio).

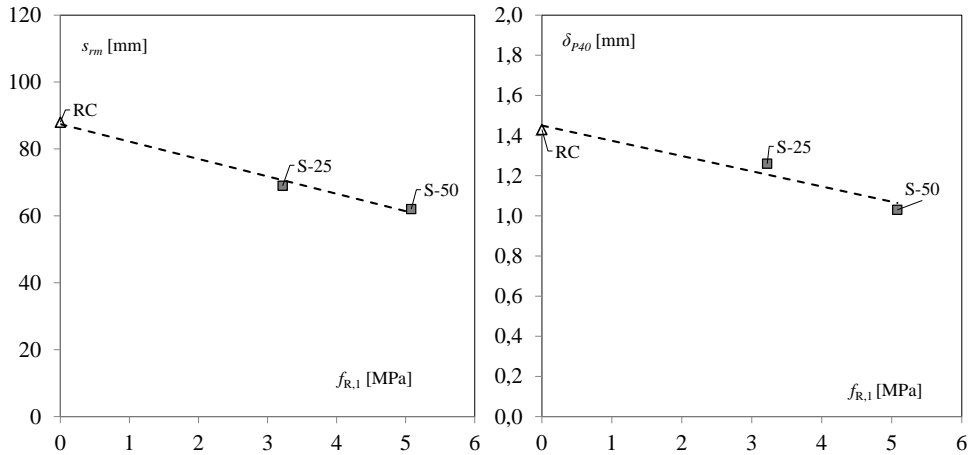


Figura 6. Efecto de la resistencia residual $f_{R,1}$ sobre el espaciamiento medio de fisuras en la etapa de fisuras estabilizadas (izquierda) y sobre la flecha post-fisuración (derecha), en vigas de hormigón armado preparadas con RC, S-25 y S-50.

En la Fig. 6 también se verifica que la flecha también decrece en función de $f_{R,1}$, en una relación lineal, el efecto parece significativo para $f_{R,1} > a 2,5$ MPa. Por debajo de este valor la reducción está en el orden del 5% y puede entonces ser descartada, se vieron efectos significativos con las fibras de acero y con las de G y P en altos contenidos. También se observó que esta reducción no depende del tipo de fibra sino de la tenacidad del material.

4.- CONCLUSIONES

Se estudió el efecto de la presencia de fibras de acero, macrofibras poliméricas y macrofibras de vidrio sobre el proceso de fisuración de vigas de hormigón armado sometidas a esfuerzos de flexión. Como conclusiones surge que:

- Las probetas adoptadas para este estudio permitieron analizar la influencia de diferentes tipos y proporciones de fibras en el proceso de fisuración de vigas de hormigón armado;
- Las fibras de acero fueron muy efectivas tanto en estado límite de servicio (SLS) como en estado límite último (ULS) para mejorar la tenacidad post fisuración en flexión;
- En SLS se observa una relación lineal entre la tenacidad post fisuración y la capacidad residual del HRF en términos de $f_{R,1}$, lo que indica que es más importante la capacidad residual del material que el tipo o contenido de fibras empleadas;
- Se redujeron los espesores de fisuras en SLS en un 40% para 50 kg/m^3 de fibras de acero y el espaciamiento de fisuras en el orden del 30% lo que implica efectos muy positivos para la durabilidad de las estructuras en ambientes agresivos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al LEMIT-CIC por el apoyo para el desarrollo del trabajo de tesis y en particular a Anabela Gerez, Pablo Bossio y Agustín Rosetti por su colaboración durante el desarrollo del programa experimental.

REFERENCIAS

- [1] Fédération Internationale du Béton, '*Fib Model Code for Concrete Structures 2010*', (2012).
- [2] Mitchell, D., Abrishami, H.H. 'Influence of steel fibres on tension stiffening', *ACI Structural Journal* **94**(6) (1997) 769-773.
- [3] Bischoff, P.H. 'Tension stiffening and cracking of steel fibre reinforced concrete', *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE* **15**(2) (2003) 174-182.
- [4] Noghabai, K. 'Effect of Tension Softening on the Performance of Concrete Structures. Experimental, Analytical and Computational Studies (Doctoral Thesis)', Div. of Structural Engineering, Lulea University of Technology (1998) 186pp.
- [5] Vandewalle, L. 'Cracking behaviour of concrete beams reinforced with a combination of ordinary reinforcement and steel fibers', *Materials and Structures* **33** (2000) 164-170.
- [6] Tiberti, F., Minelli, G., Plizzari, G. 'Cracking behavior in reinforced concrete members with steel fibers: a comprehensive experimental study', *Cement and Concrete Research* **68** (2015) 24-34.
- [7] Meda, A., Minelli, F., Plizzari, G. 'Flexural behaviour of RC beams in fibre reinforced concrete', *Composites Part B: Engineering* **43**(8) (2012) 2930-2937.
- [8] EN 14651 'Precast concrete products - test method for metallic fibre concrete - Measuring the flexural tensile strength', European Standards (2005).