

INCORPORACIÓN DE FIBRAS Y CONTROL DE FISURACIÓN EN VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO

Bossio, Pablo¹, Rossetti, Agustín², Vivas, Juan C.³, Torrijos, María C.⁴, Giaccio, Graciela⁵, Conforti, Antonio⁶ y Zerbino, Raúl⁴

¹Facultad de Ingeniería UNLP, Personal de Apoyo CIC-LEMIT, ²CIC-LEMIT, ³ CONICET-Facultad de Ingeniería UNLP-LEMIT, ⁴CONICET-LEMIT-Facultad de Ingeniería UNLP, ⁵CIC-LEMIT-Facultad de Ingeniería, ⁶DICATAM-Universidad de Brescia, Italia.

RESUMEN

El uso de fibras en elementos estructurales de hormigón armado favorece la resistencia al corte y el control del ancho de fisuras con sus consecuentes ventajas sobre la vida en servicio y la durabilidad. Este trabajo forma parte de un proyecto de cooperación entre el LEMIT-CIC y el DICATAM (Brescia) destinado a analizar la influencia del tipo y contenido de fibras sobre el control de fisuras en vigas de hormigón armado. Se analiza la distribución de fisuras, la forma de rotura y la capacidad de carga para diferentes cuantías de armadura. En este artículo se estudian hormigones con fibras de acero y se observa que las fibras pueden mejorar la tenacidad post fisuración en flexión tanto en estado límite de servicio como en estado límite último, y reducir espesores y espaciamiento de fisuras en estado límite último mejorando la durabilidad de estructuras expuestas en ambientes agresivos.

Palabras claves: Hormigón armado; fibras de acero; control de fisuras; flexión.

INTRODUCCIÓN

Actualmente se reconocen las ventajas del uso de Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) en elementos estructurales combinado con barras de armadura convencional. Las fibras dan lugar a efectos positivos: contribuyen a la resistencia al corte permitiendo sustituir total o parcialmente los estribos y controlan el espaciamiento y el espesor de fisuras con sus consecuentes ventajas en lo concerniente a la vida en servicio y la durabilidad.

El *Model Code 2010* [1] introduce al HRF como material estructural y brinda reglas de diseño. Las propiedades que imparten las fibras se traducen en la capacidad residual del HRF que se determina siguiendo la norma EN 14651 [2] y en base a la cual se establece la clase de HRF [1]; de este modo es posible valorar la tenacidad que diferentes tipos de fibras (de acero, poliméricas, de vidrio u otras) confieren al HRF. Existen otras normas y recomendaciones sobre el diseño de HRF en elementos estructurales [3-4], sin embargo dado que la mayoría de ellas se refieren o han surgido del análisis de resultados obtenidos con HRF de acero, es de interés estudiar qué ocurre con otras fibras.

Entre los beneficios del uso combinado de HRF en hormigón armado se observó que en Estado Límite de Servicio (ELS) las fibras controlan las flechas y las fisuras, esto se debe a que mejoran la transferencia de esfuerzos entre las barras de acero y el hormigón, lo que da lugar a un cuadro de fisuras más difuso [5-6]. En Estado Límite Último (ELU) la contribución de las fibras se relaciona más con la resistencia al corte y en algunos casos, aunque con menor relevancia, con mejoras en la capacidad resistente a flexión.

Este trabajo se inserta dentro de una línea de investigación sobre los beneficios que brinda el uso de HRF en lo concerniente a la extensión de la vida en servicio y durabilidad de las estructuras de hormigón. Forma parte de un proyecto de cooperación entre el LEMIT-CIC (La Plata) y el DICATAM (Brescia, Italia) donde se analiza la influencia del tipo y contenido de fibra sobre el control de fisuración en flexión en elementos de hormigón armado [7]. El programa considera diferentes cuantías de armadura analizando la distribución y propagación de fisuras durante la carga así como la forma de rotura. Incluye hormigones con distintos tipos y contenidos de fibras (de acero, macrofibras poliméricas, macrofibras de vidrio) y mezclas sin fibras como referencia. En este artículo se describe la metodología de investigación propuesta junto con algunos resultados obtenidos con HRF de acero. Se aprecia el efecto de las fibras sobre la tenacidad post fisuración en flexión y la relación entre dicha tenacidad y la resistencia residual del HRF.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Se estudiaron vigas de hormigón armado con tres cuantías de armadura principal, que se fabricaron con un hormigón de base sin fibras o con el mismo hormigón al que se le incorporaron diferentes dosis de fibras de acero.

Materiales y mezclas

Se estableció como consigna que el hormigón tuviera una resistencia media a compresión del orden de 40 MPa al momento del ensayo. Se emplearon cemento CP40 ($390 \pm 20 \text{ kg/m}^3$), arena silíceo natural y piedra partida granítica de tamaño máximo 12 mm. Se elaboraron HRF con 25 y 50 kg/m^3 de fibras de acero con ganchos en sus extremos de 50 mm de longitud y 1 mm de diámetro (relación de esbeltez 50), cuya resistencia a tracción supera los 1100 MPa. También se estudió un hormigón sin fibras (RC) como referencia. En cada caso se adicionó una pequeña dosis de superfluidificante para lograr una consistencia adecuada para compactar mediante vibrado externo.

Para cada tipo de hormigón y cuantía se fabricaron 3 vigas de hormigón armado de 150 x 150 x 900 mm según se describe en el siguiente apartado. Además, para realizar la caracterización del hormigón al momento del ensayo, se moldearon tres vigas de 150 x 150 x 600 mm y al menos tres cilindros de 100 x 200 mm para determinar la resistencia residual en flexión y la resistencia a compresión respectivamente. Todas las probetas se desmoldaron a las 24 horas, se curaron durante 28 días en cámara húmeda y luego se dejaron al aire en ambiente de laboratorio. La edad de ensayo fue cercana a 60 días con el fin de evitar que durante los ensayos, que demandaban varios días, se generaran cambios atribuibles a diferencias en la edad o el contenido de humedad de las muestras.

En una primera etapa se emplearon barras de 10 mm como armadura ($\rho = 0,87 \%$) y luego se repitieron las mezclas para otras dos cuantías de armadura (0,55 y 1,27 %), empleando barras de 8 o 12 mm respectivamente. En ambas etapas se reiteraron los ensayos de caracterización en flexión y compresión. La Tabla 1 presenta las mezclas elaboradas, identificadas por la etapa (1 o 2) y el tipo y dosis de fibra, de este modo 1-S-25 corresponde al hormigón de la primera etapa con 25 kg/m^3 de fibras.

Tabla 1: Hormigones elaborados.

Identificación	1-RC	1-S-25	1-S-50	2-RC	2-S-25	2-S-50
Etapa	Primera ($\rho = 0,87 \%$)			Segunda ($\rho = 0,55$ y $1,27 \%$)		
Fibras de acero (kg/m^3)	0	25	50	0	25	50
f'_{cm} (MPa)	42,1	43,7	42,9	46,2	45,2	46,8
E (GPa)	39,7	39,2	39,2	37,4	37,4	37,0
f_L (MPa)	3,7	4,5	4,7	4,5	5,1	5,4
f_{R1} (MPa)	-	3,2	5,1	-	3,9	5,9
f_{R3} (MPa)	-	2,9	4,5	-	3,5	5,5
Clase de HRF	-	3c	5b	-	3c	5c

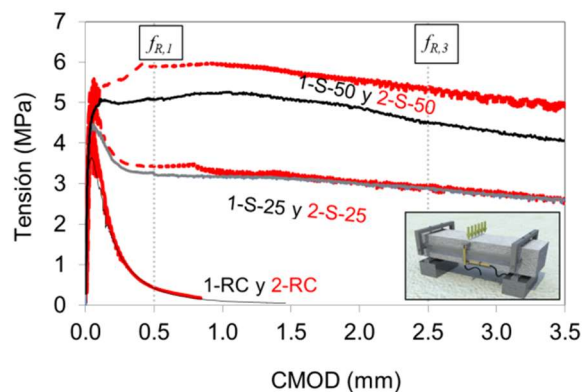


Figura 1: Curvas tensión - apertura de fisura (CMOD) sobre probetas entalladas

La caracterización en flexión se realizó según la norma EN14651 [2]. La Figura 1 muestra una curva tensión - apertura de fisura (CMOD) correspondiente a cada hormigón; se aprecia la respuesta para diferentes dosis de fibras, como así también la del hormigón sin fibras. Por su parte la Tabla 1 presenta los valores promedio de resistencia a compresión (f'_{cm}) y módulo de elasticidad (E) y los correspondientes a la tensión de primera fisura (f_L), representativa de la resistencia a flexión de la matriz, y las resistencias residuales para aperturas de fisura 0,5 y 2,5 mm (f_{R1} y f_{R3}), en base a las cuales se caracteriza un HRF. En cada caso se indica la clase de HRF siguiendo el criterio del *fib* Model Code [1].

Vigas de hormigón armado y detalles de ensayo

Se fabricaron vigas de 150 x 150 x 900 mm para realizar ensayos de flexión en 4 puntos sobre una luz de 840 mm. Las mismas incluyeron como armadura principal dos barras de acero tipo ADN420 de 8, 10 o 12 mm de diámetro (refuerzo a flexión, $\rho = 0,55$, $0,87$ o $1,27 \%$); en los extremos se incluyeron estribos de 6 mm de diámetro distanciados cada 50 mm o cada 40 mm en el tercer caso, de forma tal de evitar roturas por corte (Figura. 2). Es interesante destacar que tanto en las vigas de hormigón armado como en los prismas usados para la caracterización en flexión la orientación de las fibras es similar; esto hace más confiable la comparación de los resultados del proceso de fisuración en las vigas de hormigón armado con la capacidad residual del HRF medida en ensayos normalizados.

En el ensayo de las vigas de hormigón armado se registraron la flecha y la extensibilidad en el tercio medio y se realizó un seguimiento del cuadro de fisuras. Para medir la flecha se dispuso un marco en un lateral de la viga, fijo a nivel del eje neutro en coincidencia con cada apoyo, con capacidad de rotar en un extremo y desplazarse horizontalmente en el otro, sobre el cual se fijó un transductor tipo LVDT. Para medir la extensibilidad se

ubicó otro LVDT a la altura de la fibra más traccionada que permite medir el total de anchos de fisura en el tercio medio. Las cargas se aplicaron en forma escalonada hasta valores preestablecidos, en cada escalón se identificaron las fisuras, determinando su longitud y espesor. Superada la carga máxima se tomaron algunas medidas adicionales y el ensayo se detuvo luego de alcanzar el colapso por fractura en la capa comprimida. La Figura 3 muestra imágenes de las armaduras, aspectos del hormigón fresco y del llenado. Asimismo se aprecia el montaje de las vigas para el ensayo y los dispositivos para medir las deformaciones.

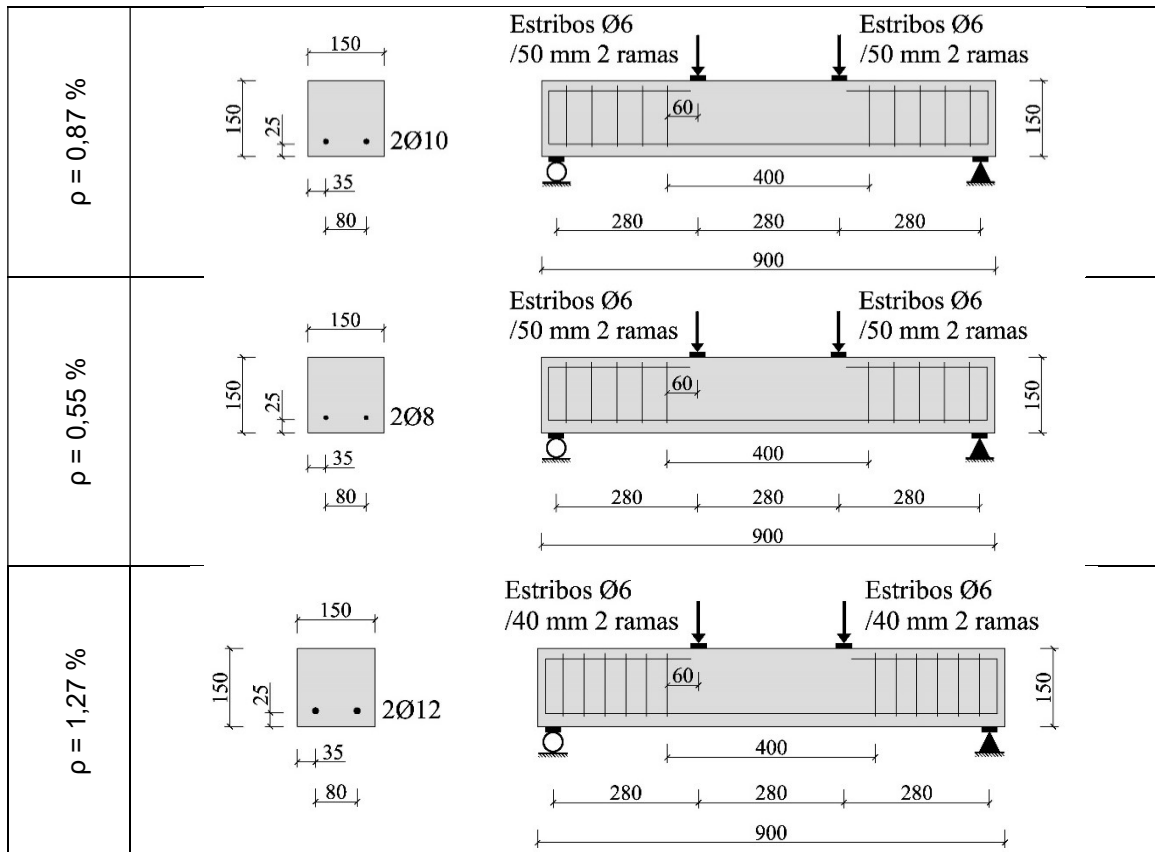


Figura 2: Detalles de armadura y configuración de carga de las vigas de hormigón armado (medidas en mm).



Figura 3: Hormigonado y dispositivos para el ensayo de las vigas de hormigón armado.

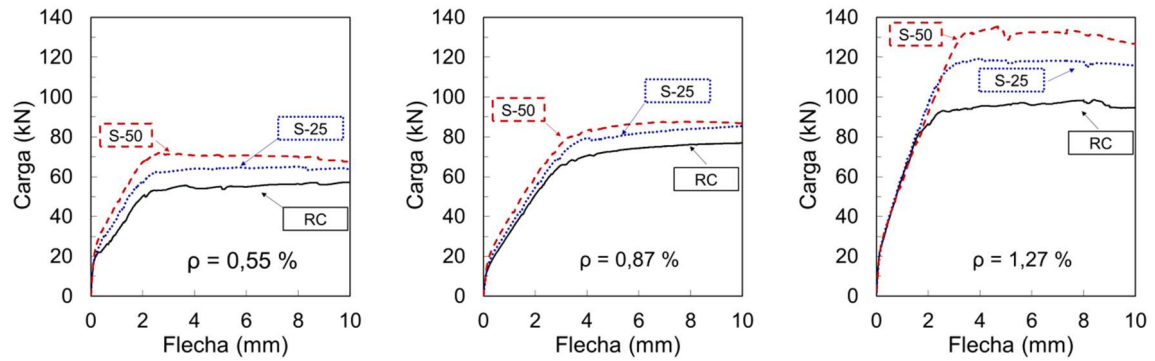


Figura 4: Curvas carga – deformación en vigas de hormigón armado en el hormigón de referencia y en HRF de acero: $\rho = 0,55\%$ (izq), $0,87\%$ (centro) y $1,27\%$ (der).

RESULTADOS

Curvas carga – deformación en vigas de hormigón armado

La Figura 4 muestra, para cada una de las cuantías de refuerzo estudiadas, las 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/m^3 de fibras de acero (sólo se dibujan hasta 10 mm para mostrar en mayor detalle la parte inicial). Pevio al inicio de las fisuras, como es lógico, no se aprecia un efecto de las fibras; cuando se fisura la viga, aparece un cambio de pendiente siendo mayor la rigidez a medida que aumenta la cantidad de fibras, durante ese período las fisuras crecen en forma estable. Por ejemplo, para $\rho = 0,87\%$ el primer cambio de pendiente se produjo a una carga próxima a 13 kN y el crecimiento estable de fisuras se desarrolló hasta cerca de 60 kN. Superada esta etapa las barras entran en fluencia y la carga para la cual esto comienza depende de la tenacidad del hormigón ($\text{RC} < \text{S}25 < \text{S}50$); el aumento se atribuye a la capacidad residual post fisuración provista por las fibras sobre cada fisura. En consecuencia surge que las fibras de acero poseen influencia sobre el ELS en términos de rigidez post fisuración y sobre el ELU en términos de carga máxima. Un comportamiento análogo se verificó en la segunda etapa, donde la influencia de las fibras aumenta al reducirse la armadura longitudinal. A partir de lo observado, surge la importancia de cuantificar la influencia del HRF en función del porcentaje de armadura presente en la estructura, así como analizar una posible influencia sobre la ductilidad de las muestras (localización de fisuras).

Desarrollo de la fisuración en vigas de hormigón armado

Durante los ensayos se midió la evolución de las fisuras. La Figura 5 presenta ejemplos de la variación del ancho de fisura en función de las flechas para cada una de las cuantías estudiadas de los hormigones RC y S-50. En las fotos se observan las fisuras relevadas sobre las caras laterales y la base de las vigas al finalizar el ensayo. Todas las vigas mostraron un colapso en flexión caracterizado por la fractura del hormigón luego de que la armadura longitudinal entrara en fluencia.

Asimismo, la mayoría de las vigas que incorporaron 50 kg/m^3 de fibras mostraron una clara localización de fisura luego de la fluencia de la armadura. Dicho fenómeno, a pesar de no reducir la ductilidad de la estructura en sí, fue más evidente y significativo a menor cantidad de armadura. Las Tablas 2 a 4 sintetizan los resultados e incluyen: la carga de inicio de fisuración (P_{cr}), la flecha para un dado escalón de carga (26, 40 o 55 kN, con el fin de considerar una tensión en las barras cercana a 300-350 MPa representativa del ELS), el ancho máximo de fisura (w_{max}) para un nivel de carga correspondiente a tensiones de 450-500 MPa, el espaciamiento medio de fisuras (s_{m}) durante el período de fisuración estable, la carga máxima (P_{max}) y la flecha correspondiente (δ_u).

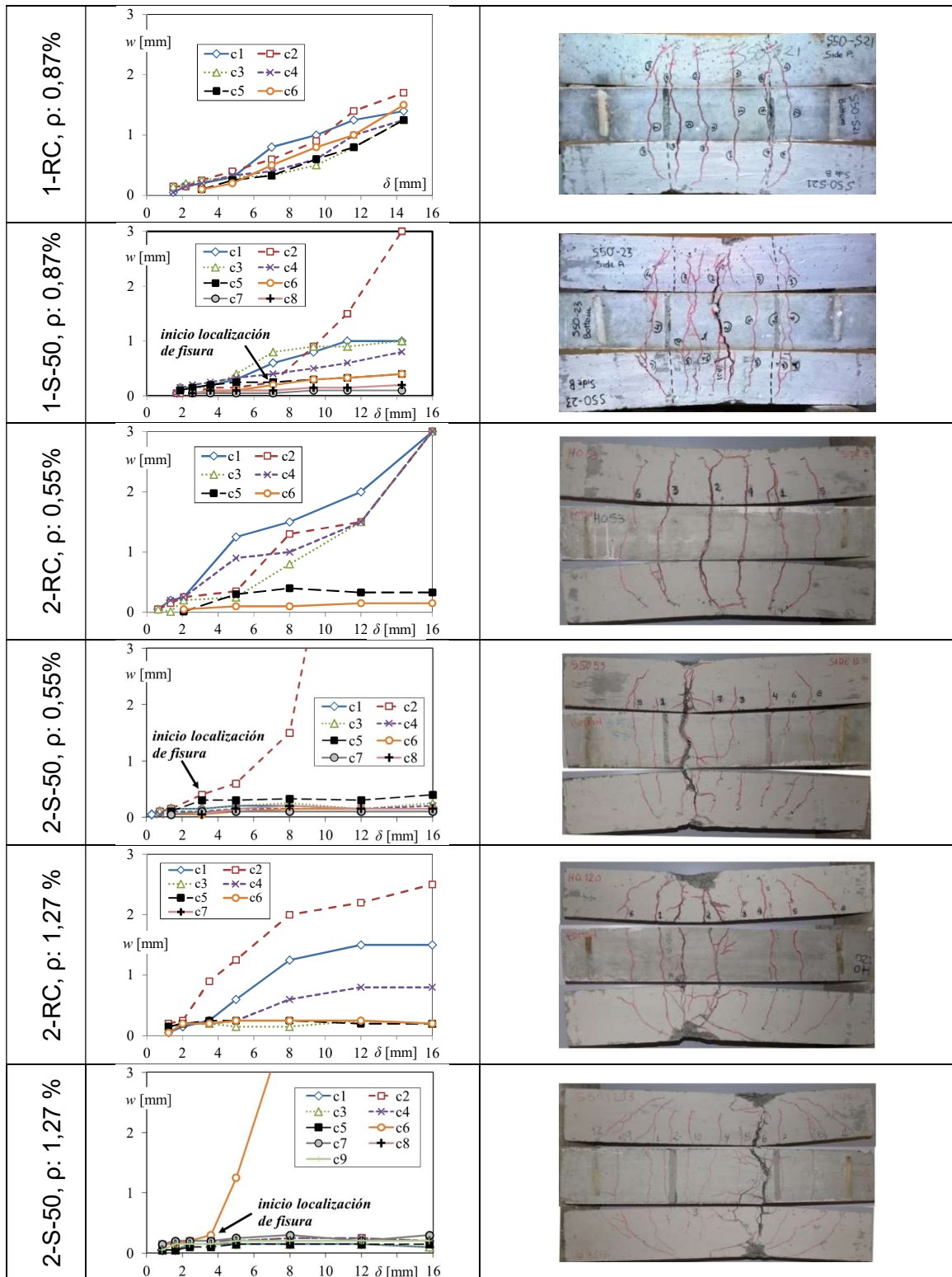


Figura 5: Variación del ancho de fisuras (w) en función de la flecha (δ) durante la carga. Cada curva corresponde a la evolución de una fisura (c_i) numerada según el orden de aparición.

Los coeficientes de variación se indican entre paréntesis. En general no se verificó una relación entre la tenacidad del hormigón y el inicio de la fisuración estable, el cual para cada cuantía se produjo aproximadamente en el mismo intervalo aunque la tenacidad era distinta. Algo similar fue observado en estudios sobre tensores de HRF [8]. La Figura 6 compara, en forma preliminar, los resultados de las vigas armadas RC, S-25 y S-50.

Tabla 2: Resultados de los ensayos para $\rho = 0,87 \%$ [7].

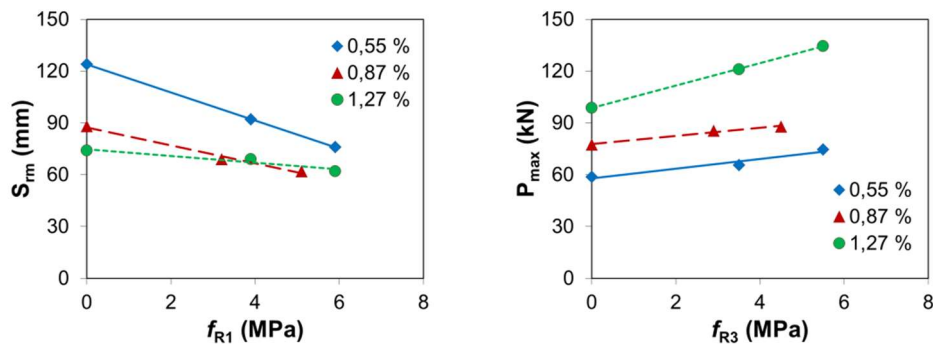
Hormigón	P_{cr} (kN)	δ_{P40} (mm)	W_{max56} kN (mm)	S_{rm} (mm)	P_{max} (kN)	δ_u (mm)
1-RC	13,0 (0,10)	1,43 (0,10)	0,22 (0,13)	88 (0,20)	77,5 (0,03)	15,7 (0,06)
1-S-25	12,9 (0,21)	1,26 (0,04)	0,17 (0,17)	69 (0,14)	85,4 (0,04)	15,8 (0,18)
1-S-50	13,9 (0,02)	1,03 (0,07)	0,13 (0,22)	62 (0,06)	87,9 (0,01)	14,1 (0,19)

Tabla 3: Resultados de los ensayos para $\rho = 0,55 \%$.

Hormigón	P_{cr} (kN)	δ_{P26} (mm)	W_{max37} kN (mm)	S_{rm} (mm)	P_{max} (kN)	δ_u (mm)
2-RC	17,2 (0,02)	0,63 (0,10)	0,20 (0,00)	124 (0,24)	58,7 (0,01)	21,1 (0,03)
2-S-25	16,7 (0,11)	0,38 (0,25)	0,15 (0,00)	92 (0,11)	65,5 (0,02)	21,2 (0,05)
2-S-50	16,5 (0,06)	0,24 (0,27)	0,10 (0,71)	76 (0,08)	74,6 (0,01)	19,8 (0,04)

Tabla 4: Resultados de los ensayos para $\rho = 1,27 \%$.

Hormigón	P_{cr} (kN)	δ_{P55} (mm)	W_{max78} kN (mm)	S_{rm} (mm)	P_{max} (kN)	δ_u (mm)
2-RC	18,3 (0,06)	0,94 (0,39)	0,23 (0,16)	74 (0,08)	98,6 (0,04)	13,2 (0,15)
2-S-25	16,6 (0,06)	0,89 (0,11)	0,18 (0,16)	69 (0,06)	121,0 (0,09)	13,6 (0,17)
2-S-50	16,9 (0,18)	0,91 (0,08)	0,18 (0,20)	62 (0,02)	134,4 (0,01)	14,5 (0,24)

**Figura 6:** Efecto de la resistencia residual sobre diferentes parámetros medidos en vigas de hormigón armado: espaciamento medio de fisuras (izq) carga máxima (der.)

Se aprecian, para diferentes cuantías de armadura, el efecto de la resistencia residual f_{R1} sobre el espaciamento medio de fisuras en la etapa estabilizada y el efecto de la resistencia residual f_{R3} sobre la carga máxima. Analizando en forma conjunta los datos de las tablas y la Figura 6 se observa que las fibras modifican el comportamiento en ELS reduciendo apertura y espaciamento de las fisuras. Estas reducciones dependen no solo de la resistencia residual del HRF sino también de la cuantía de armadura. De hecho, tal influencia se reduce claramente al aumentar la armadura. Sin embargo, en la mayoría de los casos la reducción es significativa y podría implicar efectos muy positivos para la durabilidad de las estructuras en ambientes agresivos. En lo concerniente al ELU, se observa que las fibras aumentan la capacidad última, y que dicho incremento varía entre

12 y 27 % para la cuantía 0,55 % y entre 23 y 36 % para la cuantía 1,27 %. El comportamiento en ELU de las vigas RC también requiere una discusión sobre la ductilidad. Al comparar las distintas series, no surgen evidencias de reducción de ductilidad a causa de la localización de fisuras observada para altos contenidos de fibras. En los ensayos donde se produjo la localización (especialmente con 50 kg/m³ de fibras) la flecha última fue comparable a las muestras de referencia. Además, después de la localización las vigas de HRF mostraron mayores aperturas de fisura que las RC (aunque el espesor de fisura no es un parámetro importante en ELU).

CONCLUSIONES PRELIMINARES

Como parte de un proyecto de cooperación entre el LEMIT-CIC (La Plata) y el DICATAM (Brescia, Italia) donde se analiza la influencia del tipo y contenido de fibra sobre el control de fisuración en flexión en elementos de hormigón armado, en este artículo se muestran resultados obtenidos en vigas con distintas cuantías de armadura incorporando fibras de acero. Entre las conclusiones preliminares se destacan:

- Las probetas adoptadas permitieron analizar la influencia de la dosis de fibras de acero en el proceso de fisuración de vigas de hormigón armado dentro de un amplio rango de armadura longitudinal (0,55 a 1,27%), representativo de numerosas aplicaciones.
- Se verifica que las fibras de acero son muy efectivas tanto en estado límite de servicio como en estado límite último para mejorar la tenacidad post fisuración.
- La presencia de fibras de acero conduce a reducciones en el espesor y el espaciado de las fisuras en estado límite de servicio, lo que implica efectos muy positivos para la durabilidad de las estructuras en ambientes agresivos.

AGRADECIMIENTOS

A los proyectos CONICET PIP 112-201501-00861 (Avances en hormigones reforzados con fibras) y UNLP PPID2016 (Control de la fisuración en hormigones reforzados con fibras y UNLP 11/I188 (Hormigones reforzados con fibras y su contribución al desarrollo sostenible). Al personal del LEMIT-CIC y a los alumnos M. Pokorny Alfaro, N. Lizarralde, B. Alvarez y L. Bortolussi por su colaboración en el desarrollo del programa experimental.

REFERENCIAS

- [1] Fédération Internationale du Béton, "Fib Model Code for Concrete Structures 2010", (2012).
- [2] EN 14651 "Precast concrete products - test method for metallic fibre concrete - Measuring the flexural tensile strength", European Standards (2005).
- [3] CNR DT 204, (2006), "Guidelines for the Design, Construction and Production Control of Fibre Reinforced Concrete Structures", National Research Council of Italy, pp. 59.
- [4] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) Guideline. (2012), "German Committee for Reinforced Concrete, Steel fibre reinforced concrete; design and construction, specification, performance, production and conformity, execution of structures", draft. Nov 2012, pp. 48.
- [5] Bischoff, P.H. "Tension stiffening and cracking of steel fibre reinforced concrete", Journal of Materials in Civil Engineering ASCE 15 (2) (2003) 174-182.
- [6] Meda, A., Minelli, F., Plizzari, G. "Flexural behaviour of RC beams in fibre reinforced concrete", Composites Part B: Engineering 43 (8) (2012) 2930-2937.
- [7] Fasciolo M., Conforti A., Torrijos M.C., Zerbino R., Plizzari G. "Control de fisuración en vigas de hormigón armado reforzado con diferentes fibras" en HAC2018, Valencia, <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5502>.
- [8] Tiberti, F., Minelli, G., Plizzari, G. "Cracking behavior in reinforced concrete members with steel fibers: a comprehensive experimental study", Cement and Concrete Res 68 (2015) 24-34.