

HORMIGONES REFORZADOS CON MACROFIBRAS DE VIDRIO

Monetti Diego H., Torrijos María C., Giaccio Graciela M., Zerbino Raúl L.

Departamento Construcciones de la Facultad de Ingeniería Calle 115 y 48 La Plata, y Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT-CIC), Calle 52 entre 121 y 122 La Plata. dmonetti@ing.unlp.edu.ar

Palabras Claves: hormigón reforzado con fibras, macrofibras de vidrio, fluencia, orientación.

INTRODUCCIÓN

El Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) es un material de alto desempeño. En la actualidad existe una amplia variedad de fibras no metálicas con capacidad estructural (macrofibras sintéticas y macrofibras de vidrio) que se suman a las tradicionales fibras de acero. Es conocido que existe una estrecha relación entre el número de fibras en las superficies de fractura y los parámetros postpico del HRF; la eficiencia del refuerzo dependerá además del tipo de fibra y sus características geométricas, de la cantidad, distribución y orientación. En Hormigones Autocompactantes Reforzados con Fibras (HACRF) si bien existe una distribución tipo 2D similar a la del HRF vibrado, se reconoce la influencia de la velocidad de flujo y el efecto pared sobre la orientación (1-3). No existen mayores antecedentes sobre la orientación de las macrofibras de vidrio en mezclas de alta fluidez. Por otro lado las macrofibras de vidrio dan lugar a una respuesta residual diferente a otros tipos de fibras, con resistencias residuales significativas para pequeñas aperturas de fisuras que permiten la transferencia de carga en las juntas o en zonas fisuradas de elementos estructurales como losas sobre el piso. Ante esta aplicación resulta de interés el estudio del comportamiento de elementos fisurados ante cargas de larga duración.

El trabajo analiza la tendencia a la orientación de este tipo de fibras y su vinculación con los parámetros de resistencia y tenacidad previstos en la norma EN 14651 (4), como así también, la respuesta en el tiempo del HRF fisurado.

EXPERIENCIAS

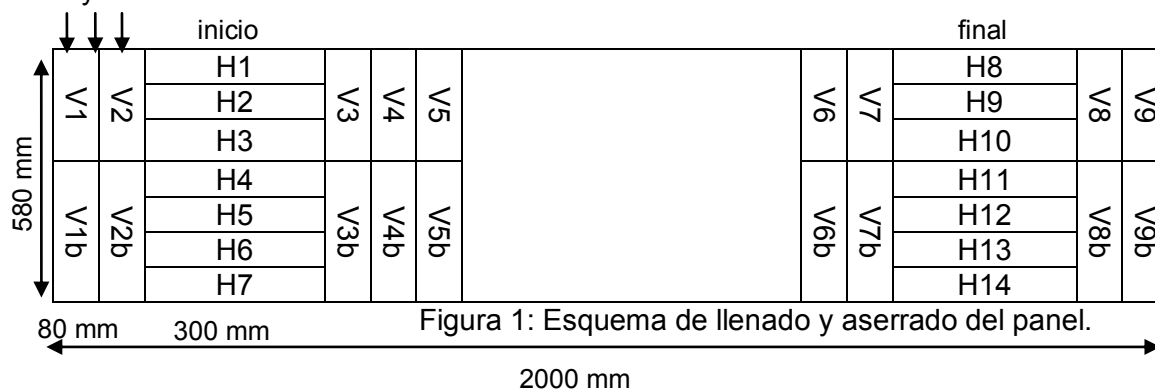
Estudio de la orientación de las fibras en elementos delegados

Se elaboraron dos HACRF incorporando macrofibras de vidrio multifilamento de 36 mm de largo y relación longitud/diámetro 67. El primero incorporó 5 kg/m^3 (HACRFV-5) de fibras en un hormigón de base de relación agua/ligante 0,40 preparado con cemento portland normal, filler calcáreo y cenizas volantes, arena silíceo natural y piedra partida granítica de 19 mm de tamaño máximo. El diámetro de escurrimiento fue igual a 650 mm sin fibras y sólo se redujo a 620 mm al incorporar las fibras mostrando que las mismas resultan compatibles con este tipo de mezclas. El escurrimiento con anillo alcanzó un diámetro de 610 mm y se redujo a 530 mm en el HACRF con algunos signos de bloqueo. El segundo HACRF incorporó 10 kg/m^3 (HACRFV-10) de fibras a un hormigón de base con relación agua/ligante 0,35, preparado con cemento portland con filler calcáreo, cenizas volantes, arena silíceo natural y piedra partida granítica de 12 mm de tamaño máximo; en este caso el diámetro de escurrimiento fue de 610 mm.

En ambos casos se moldeó un panel de 580 mm de altura, 2000 mm de largo y 80 mm de espesor para estudiar la distribución de las fibras y sus efectos sobre las propiedades mecánicas residuales, cilindros de 100x200 mm para ensayos de compresión, y prismas de 150 x 150 x 600 mm que fueron entallados y ensayados hasta una apertura de fisura de 3,5 mm de acuerdo a la norma EN 14651. Cada panel fue aserrado para obtener vigas de aproximadamente 80x80x300 mm en direcciones paralela y perpendicular a la dirección de

moldeo (figura 1). Se denominan vigas V a las paralelas a la dirección de moldeo y H a las aserradas en dirección perpendicular; a su vez las vigas V se cortaron en dos partes, a la mitad inferior se la identifica con la letra b. Las pequeñas vigas se ensayaron a flexión con control de la velocidad de apertura de fisura (CMOD) siguiendo los lineamientos de la norma EN 14651, con una luz de 270 mm y una entalla de 13 mm para mantener constantes las relaciones luz/altura y profundidad de entalla/altura de la citada norma. De este modo los parámetros residuales resultan similares a los que se obtendrían en vigas estándar de 150 mm de altura, si los mismos se calculan a igual rotación; para ello se corrigen las deformaciones por el factor $150 \text{ mm} / h \text{ (mm)}$ y luego se calculan los parámetros postpico como indica la norma. En este trabajo se analizan la tensión máxima (f_M) que coincide con la tensión de primera fisura, y las resistencias residuales f_{R1} y f_{R3} , correspondientes a aperturas de fisura iguales a 0,5 mm y 2,5 mm en la viga estándar. La afectación de estos resultados por “efecto tamaño” no resulta significativa. Finalmente, para estudiar la orientación y distribución de las fibras se contó el número de ellas en las superficies fracturadas de las vigas. Nótese que las vigas se aserraron en dos direcciones perpendiculares entre sí y en distintas posiciones a lo largo y alto del panel.

Inicio y dirección de llenado



Estudio del efecto de las cargas de larga duración en HRF en estado fisurado

Los estudios bajo cargas de larga duración se desarrollaron sobre probetas moldeadas en obra correspondientes a un HRF utilizado para la construcción de un piso industrial en Ituzaingó, provincia de Buenos Aires (6). El HRF se elaboró con relación agua/cemento 0,49, 340 kg/m^3 de cemento, 20 kg/m^3 de microsíllice, 830 kg/m^3 de arena y 1050 kg/m^3 de piedra (tamaño máximo 19 mm), como aditivos se introdujo un expansor (20 kg/m^3), un reductor de contracción ($5,1 \text{ kg/m}^3$) y una combinación de reductores de agua de medio y alto rango, que permitieron incorporar 10 kg/m^3 de fibras y obtener un HRF bombeable con un asentamiento promedio de 18 cm. A los 28 días la resistencia a compresión fue igual a 48,4 MPa, el módulo de rotura a 6 MPa y la resistencia residual para una apertura de fisura de 0,5 mm igual a 2 MPa. El piso se construyó en cuatro jornadas. De los prismas moldeados para el control de calidad en cada jornada, cuatro vigas se utilizaron para la caracterización mecánica del HRF siguiendo la norma europea EN 14651 y una para los estudios de fluencia. La metodología de fluencia se inicia con un ensayo de prefisuración hasta alcanzar una apertura de fisura (CMOD) de 0,2 mm, un límite acorde con los tolerados en usos convencionales para pavimentos y algunos pisos industriales. Luego las vigas se retiraron de la máquina de ensayo y se ubicaron en pórticos donde mediante un sistema de palancas se aplicaron cargas sostenidas. Se registraron las variaciones de apertura de fisura mediante un comparador mecánico. La tensión máxima aplicada en los pórticos se definió como el 70% de la tensión aplicada al momento de detener el ensayo de fisuración inicial

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades residuales y orientación de las fibras en elementos delegados de HACRF

La resistencia a compresión del HACRFV-5 fue 41 MPa y el módulo de rotura 4,3 MPa; en el HACRFV-10 ascendieron a 46 MPa y 5,2 MPa respectivamente. En la Figura 2 se presentan curvas típicas tensión - apertura de fisura (CMOD) de las vigas de dichos hormigones. Como es característico de este tipo de macrofibras el HRF posee elevada capacidad residual para aperturas pequeñas, y luego un marcado decrecimiento.

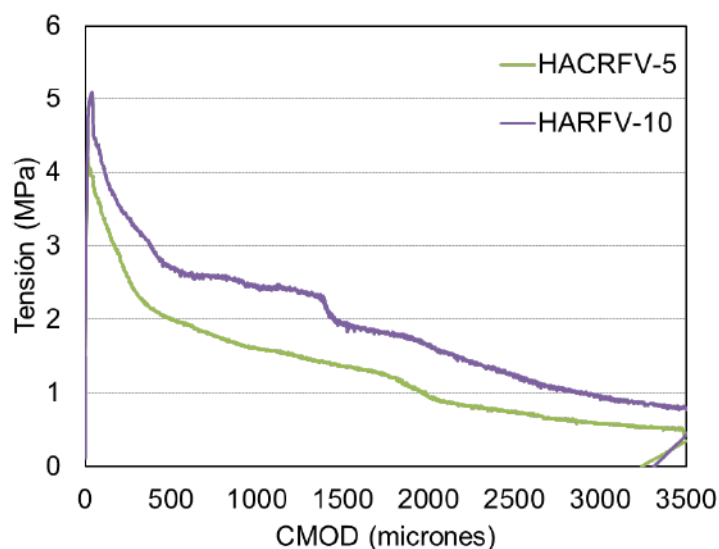


Figura 2. Curvas típicas Tensión-CMOD

La Figura 3 representa las curvas tensión - CMOD de cada una de las vigas del hormigón HACRFV-5. En general, las vigas H presentan mayor capacidad post pico que las vigas V, lo que permite inferir que las fibras se orientan preferentemente en la dirección del flujo; además se observa un mejor comportamiento en las vigas de la zona donde se inició el llenado del panel (H1-H7) respecto de las vigas H8-H14. A su vez las vigas aserradas de la parte inferior del panel (H6-7 y H12-14) presentan mayores tensiones máximas y capacidad residual que las otras vigas horizontales de la zona superior, el efecto es más notorio en las vigas del final del panel (H12-14). Es interesante notar que para otros tipos de fibra no se suelen observar modificaciones en la resistencia de primera fisura que se corresponde muchas veces con la resistencia del hormigón de base; este no parece ser el caso para las macrofibras de vidrio. En las vigas V las tensiones residuales son menores que las de las vigas H, y ligeramente mayores en las vigas de la mitad superior de la placa respecto a las de la mitad inferior (Vb), verificando la mayor orientación en dirección horizontal en la zona inferior del panel. Un comportamiento similar fue encontrado con otros tipos de fibras (8).

En el HACRFV-10 la capacidad residual fue mayor pero los efectos de orientación y distribución de las fibras verifican tendencias similares a las observadas para HACRFV-5: un mejor comportamiento en las vigas H obtenidas en la zona donde se inició el llenado del panel respecto de las del final del panel y la menor capacidad residual de las vigas V, en especial de las Vb. Para este contenido de fibras la capacidad residual de las vigas V no parece estar tan afectada y resulta más cercana (aunque inferior) a la de las vigas H. La resistencia de primera fisura tiende a crecer en las vigas con mayor capacidad residual.

La Figura 4 muestra la variación de la densidad de fibras en los paneles. La orientación adquirida por las fibras se debe principalmente a la influencia de las paredes del molde. En las vigas V, en los planos verticales, la densidad disminuye en el centro del panel y aumenta hacia los bordes, poniendo en evidencia un "efecto pared" en el inicio y final del molde. Al

discriminar entre el recuento de fibras en las vigas V superiores (V) e inferiores (Vb) se observa que la densidad de fibras es mayor en las V, dado que la base del panel orienta a las fibras en su dirección. El comportamiento es similar en ambos HACRFV. En las vigas H se verifica que la densidad de fibras es mayor cerca del piso del molde y disminuye con la altura. En ambos hormigones este efecto es mayor en las vigas aserradas al final del panel (H8-H14). En HACRFV-5, en el inicio del panel, la densidad de fibras en el borde superior (H1) es un 10% menor que en el borde inferior (H7), y hacia el final del panel en el borde superior (H8) la densidad de fibras es un 64% menor. En HACRFV-10 estas diferencias son aún mayores, iguales a 30% y 74% respectivamente. Considerando el efecto del flujo, las vigas aserradas al inicio del panel (H1-H7) presentan mayor densidad de fibras que las aserradas al final (H8-H14). En HACRFV-5 la densidad varía entre 0,55-0,82 f/cm² en H1-H7 y en H8-H14 entre 0,17-0,56 f/cm². En HACRFV-10 las densidades ascienden a 0,85-1,43 f/cm² para H1-H7 y a 0,29-1,19 f/cm² para H8-H14. La orientación de las fibras en las vigas H se puede explicar por el efecto pared producido por la base del panel (H7 y H14) y por la velocidad del flujo que es mayor al inicio del mismo y va disminuyendo hacia el final. La orientación de las fibras justifica el comportamiento diferencial de las vigas en flexión.

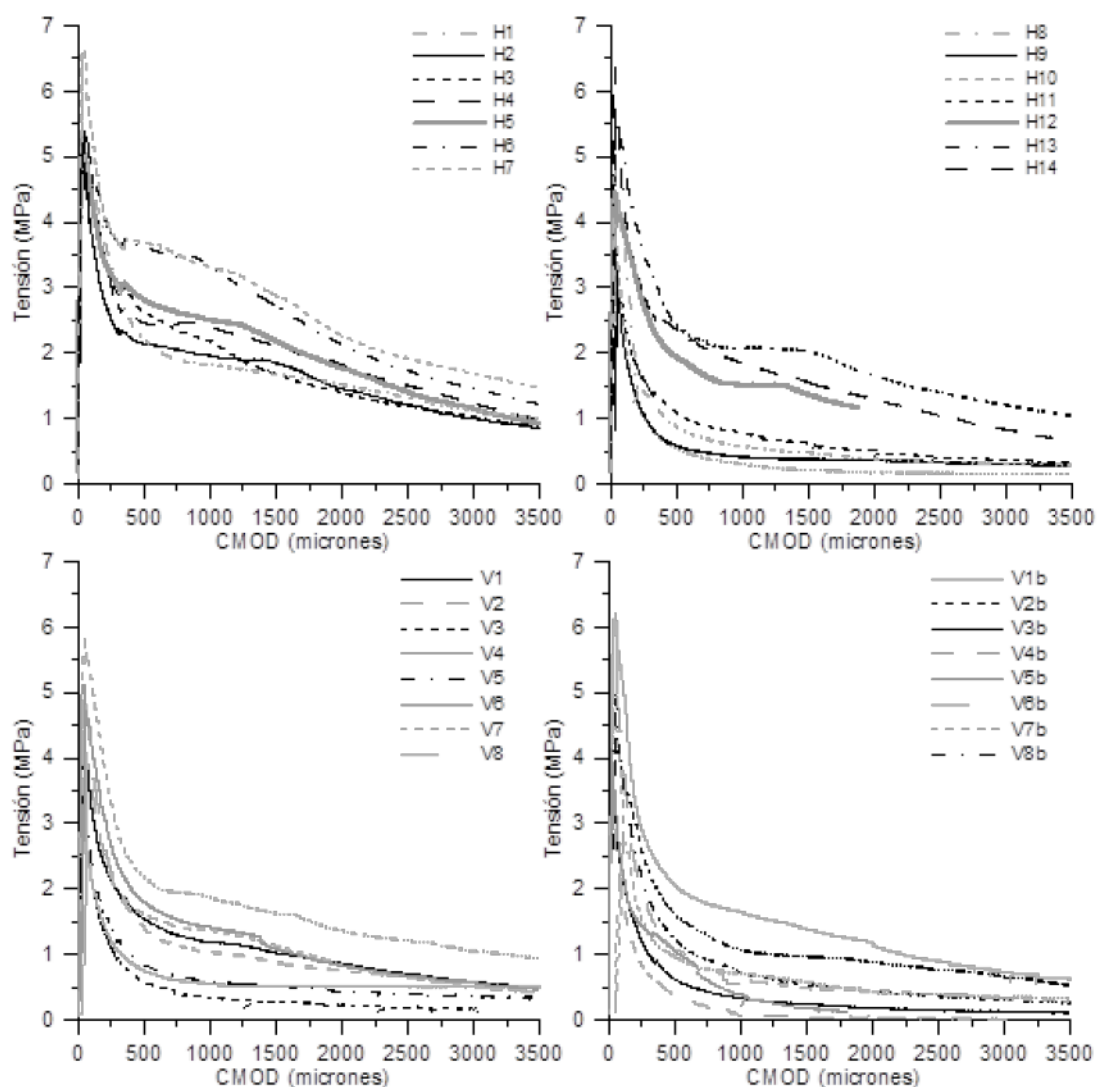


Figura 3: HACRFV-5: curvas tensión-apertura de fisura (CMOD).

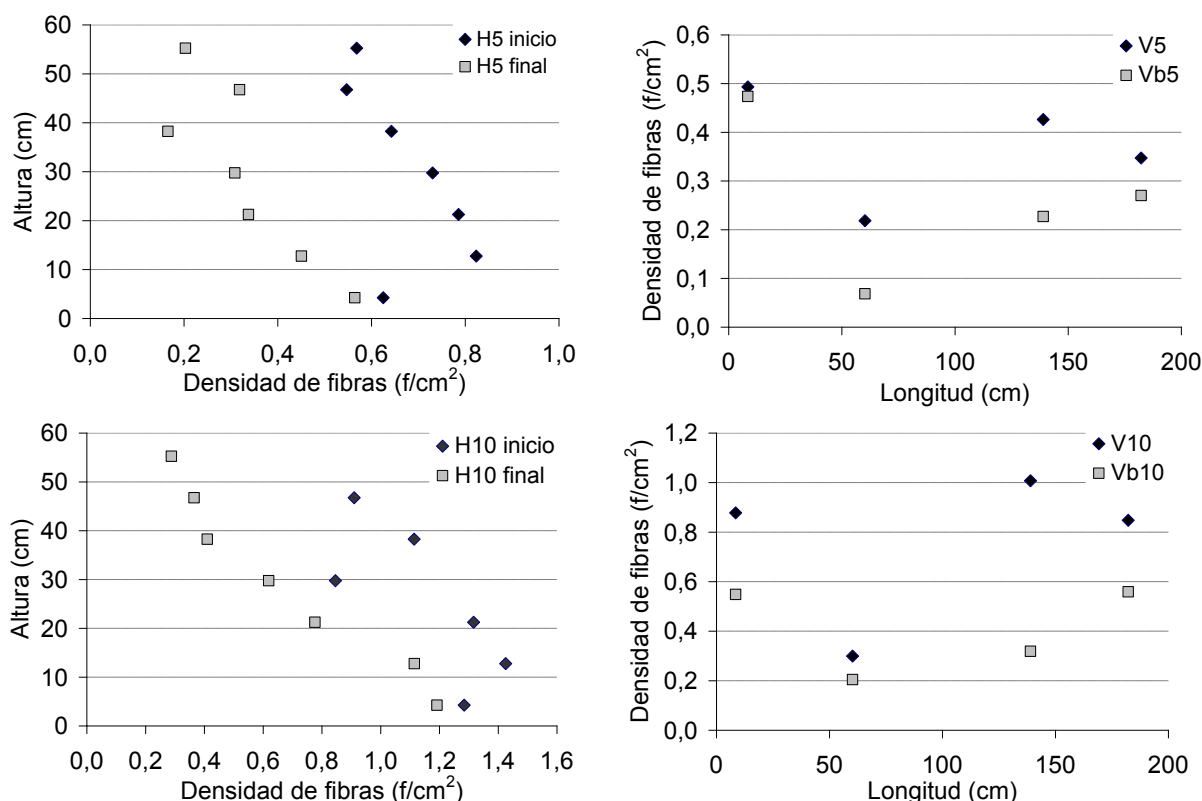


Figura 4: Variación de la densidad de fibras. Arriba: HACRFV-5, abajo: HACRFV-10.

Fluencia en estado fisurado de hormigones con macrofibras de vidrio.

Los valores promedio de la resistencia de primera fisura (f_L) y las resistencias residuales (f_{R1} , f_{R2} , f_{R3} , f_{R4}) obtenidos en los ensayos de caracterización de las vigas moldeadas en obra fueron iguales a 4,6, 1,7, 1,0 0,6 y 0,4 respectivamente, destacando una muy baja variabilidad a lo largo de las cuatro jornadas.

La Tabla 1 sintetiza los ensayos de larga duración incluyendo la identificación de cada viga, la tensión nominal aplicada, el tiempo bajo carga y la apertura alcanzada, y la velocidad en el tramo de velocidad de apertura constante (etapa 2 de creep). La Figura 5 muestra la evolución de la apertura de fisura. Las tasas de crecimiento de fisura calculadas para este HRF de vidrio se asemejan o incluso están por debajo de las obtenidas con fibras de acero y son muy inferiores a las que mostraron las macrofibras sintéticas obtenidas en estudios previos (7). Esto resulta muy significativo teniendo en consideración el pequeño tamaño de fisuras tolerado tanto para pisos industriales (<0,2mm), como para pavimentos de hormigón, permitiendo un crecimiento de fisura muy lento durante el rango aceptado para la vida útil.

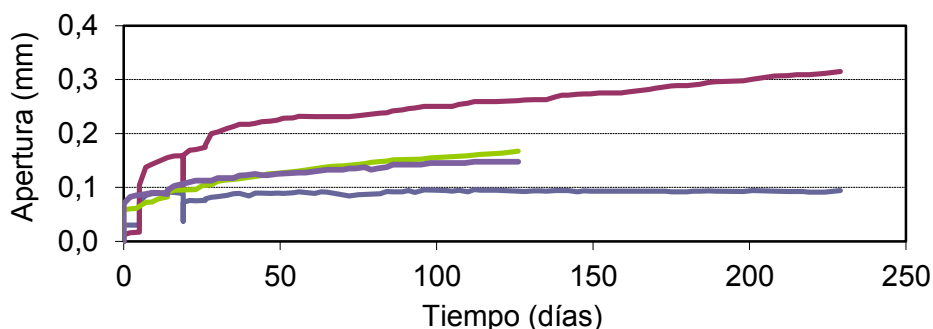


Figura 5. Curvas típicas Apertura de fisura- tiempo y tensión-tiempo

Tabla 1- Ensayos de larga duración

Viga	Tensión máx (MPa)	tensión (% f_{R1})	Tiempo bajo carga (días)	apertura máx (mm)	Velocidad (micrones/día)
A	1,8	116	126	0,17	0,52
B	2,3	141	229	0,10	0,02
C	1,8	98	126	0,15	0,29
D	2,2	124	229	0,32	0,49

CONCLUSIONES

- Se verifica una orientación del refuerzo que se debe principalmente a la influencia de las paredes del molde y a la velocidad de flujo del hormigón. La orientación de las fibras explica el comportamiento diferencial en los ensayos de flexión. Las vigas aserradas en dirección horizontal coincidente con el eje del panel (H) presentan mejor respuesta post pico que las vigas en dirección vertical (V). Comparando la zona superior e inferior del panel las vigas V de la mitad superior muestran tensiones residuales ligeramente mayores que las correspondientes a las vigas de la mitad inferior (Vb).
- Al igual que para otros tipos de fibras las tensiones residuales crecen con la densidad de fibras; pero los HRF con macrofibras de vidrio muestran como característica distintiva un aumento de la tensión de primera fisura con la densidad de fibras.
- Estudios de fluencia en estado fisurado muestran que para aperturas de fisura iniciales de 0,2 mm se observa una respuesta estable para un nivel de sollicitación igual al 70 % de la tensión final alcanzada en el proceso de prefisuración.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Torrijos MC, Barragán B, Zerbino R. Placing conditions, mesostructural characteristics and post-cracking response of fibre reinforced self-compacting concretes, *Construction and Building Materials* 2010, 24: 1078–1085.
- (2) Stähli P, van Mier JGM. Manufacturing, fibre anisotropy and fracture of hybrid fibre concrete. *Engng Fract Mech* 2007; 74: pp. 223–242.
- (3) Vandewalle L, Heirman G, Rickstal FV. Fibre orientation in self-compacting fibre reinforced concrete. In: Gettu R, editor. *Proceedings of 7th Int. RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete*. India: Chennai 2008. p. 719-728.
- (4) EN 14651:2005, "Test Method for Metallic Fibered Concrete - Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality (LOP), Residual)" CEN - European Committee for Standardization, Brussels, (2005), 1-17.
- (5) Monetti, D.H., Giaccio, G. y Zerbino, R. "Comportamiento post fisuración de vigas de hormigones reforzados con fibras sometidas a cargas de flexión". IV Cong. Int. de Tecnología del Hormigón; 18 Reunión Técnica AATH, (2010), 121-128.
- (6) Zerbino R., Giaccio G., Barragán B. y Peyrú E., "Hormigones Reforzados con Macrofibras de Vidrio", VI Congreso Internacional – 20ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina De Tecnología Del Hormigón (AATH), (2014)
- (7) Zerbino R., Monetti, D.H., Giaccio G., "Creep Behaviour of Steel and Macro-Synthetic Fibre Reinforced Concrete: Analysis of Creep Rate", en evaluación para publicación.
- (8) Zerbino R., Tobes J.M., Bossio M.E., Giaccio G., "On the orientation of fibres in structural members fabricated with self compacting fibre reinforced concrete", *Cement & Concrete Composites* 34 (2012) pp. 191–200.