

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Respuesta frente a cargas estáticas y frente a explosiones en hormigones de alta resistencia reforzados con fibras

R. Zerbino ⁽¹⁾, G. Giaccio ⁽¹⁾, M. C. Torrijos ⁽¹⁾,
B. Luccioni ⁽²⁾, F. Isla ⁽²⁾, R. Codina ⁽³⁾ y D. Ambrosini ⁽³⁾,

⁽¹⁾ Facultad de Ingeniería, Univ. Nac. de La Plata. CONICET y LEMIT-CIC. Argentina

⁽²⁾ Instituto de Estructuras “Arturo M. Guzmán”, Univ. Nac. de Tucumán. CONICET. Argentina.

⁽³⁾ Facultad de Ingeniería, Univ. Nac. de Cuyo. CONICET. Argentina.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5240>

RESUMEN

Los Hormigones de Alta Resistencia Reforzados con Fibras aparecen como materiales promisorios para construir elementos de protección o estructuras expuestas a acciones extremas. Este trabajo analiza el efecto de la incorporación de diferentes contenidos y tipos de fibras de acero en hormigones autocompactantes de alta resistencia (resistencia media a compresión mayor a 100 MPa). Se analiza el efecto de distintos tipos y contenidos de fibras de acero sobre el comportamiento mecánico en flexión de prismas entallados y sobre la respuesta bajo cargas estáticas de losas cuadradas de 500 mm de lado y 50 mm de espesor. Luego se muestran resultados de las mismas losas al ser sometidas a cargas explosivas que evidencian la potencialidad del material ante acciones extremas; el refuerzo con fibras mantuvo la integridad de las piezas con una reducción significativa del daño y el cuadro de fisuración manifiesta gran capacidad de absorción de energía.

PALABRAS CLAVE: Hormigón de alta resistencia, fibras de acero, tenacidad.

1.- INTRODUCCIÓN

La extensión de la vida en servicio constituye un ítem prioritario en la ingeniería civil, ya que posee un impacto directo en el bienestar de la sociedad y contribuye al desarrollo sustentable. Tanto las tareas de mantenimiento como de reconstrucción de las construcciones civiles implican el uso de recursos importantes que alcanzan muchas veces magnitudes comparables a la construcción de nuevas estructuras.

Muchos edificios y puentes no han sido diseñados para soportar acciones sísmicas, en ocasiones aparecen cambios de destinos o incrementos en los niveles de cargas, o la posibilidad de que las construcciones resulten expuestas a cargas extremas como explosiones o impactos de origen accidental o intencional. Para reforzar estas estructuras se deben emplear materiales con una capacidad de deformación que les permita disipar gran cantidad de energía antes de la rotura, impidiendo el colapso catastrófico en el caso de cargas extremas; esto implica no sólo elevada resistencia sino también ductilidad, resistencia al descascaramiento o la erosión, favorecer la formación de múltiples fisuras finas y capacidad para mantener integridad.

Ante esta situación, los Hormigones de Alta Resistencia Reforzados con Fibras (HARRF) y en particular los Autocompactantes resultan especialmente aptos para la realización de reparaciones y refuerzos, ya que pueden ser empleados en pequeños espesores donde no podrían ubicarse las barras convencionales con el recubrimiento necesario; a la vez, las fibras limitan los anchos de fisuras, lo que genera efectos positivos para las estructuras en lo relacionado con las propiedades de transporte y la durabilidad.

Sumadas a las ventajas de los hormigones con fibras convencionales, el HARRF suele presentar una respuesta post-pico con endurecimiento generando en muchos casos cuadros de fisuración múltiple bajo cargas de tracción [1]. Por ello se han desarrollado fibras especialmente diseñadas para este material, mejorando el tipo de acero (se ha observado que en niveles de alta resistencia las fibras de acero convencional, en especial en el extremo de anclaje, pueden cortarse) [2-3]; asimismo puede ser eficiente el uso de fibras cortas cuando los agregados pueden fracturarse o el uso de combinaciones híbridas entre fibras largas y cortas. En un paso más avanzado, el post-pico con endurecimiento y fisuración múltiple se intensifica en los Hormigones de Ultra Alta Resistencia Reforzados con Fibras (HUARRF) donde incluso se incorporan microfibras de acero y resultan particularmente adecuados para sobrellevar cargas extremas [4-7].

Este trabajo muestra resultados experimentales obtenidos en un proyecto que tiene por objetivo explorar las ventajas del uso de capas delgadas de HARRF y HUARRF como materiales de reparación y refuerzo. Dada la similitud con el material original de las estructuras, el refuerzo puede formar parte integral de toda una estructura con escaso efecto intrusivo y buena compatibilidad en sus propiedades termo-mecánicas. En este caso se muestra el efecto sobre las propiedades mecánicas, en especial en su resistencia residual a flexotracción, de incorporar distintos tipos y contenidos de fibras de acero en matrices con resistencias a compresión superiores a 100 MPa (HARRF); finalmente se muestran ejemplos de la respuesta de estos HARRF al ser expuestos frente a cargas explosivas.

2.- MATERIALES Y MEZCLAS

Se elaboraron dos series de hormigones autocompactantes de alta resistencia empleando materiales y proporciones similares, a los que se les incorporaron diferentes tipos y contenidos de fibras de acero de alto carbono. En todos los casos se fabricaron muestras del hormigón sin fibras como referencia.

Se utilizaron como materiales cemento portland tipo CPN50, microsílíce (ms), filler calcáreo (f), arena silícea natural y piedra partida granítica de 12 mm de tamaño máximo; se emplearon como aditivos un plastificante retardador y un superfluidificante de alto rango de base copolímero modificado. El origen de la microsílíce fue diferente en ambas series. Se seleccionaron fibras tipo “hooked-end” con diferencias en la longitud y aspecto geométrico, tipo de acero y conformación del gancho en el extremo (3D, 5D). En la Tabla 1 se presentan la identificación de los hormigones, el contenido de cemento (CUC) y de microsílíce, las relaciones agua/ligante ($a/c+ms$) y filler/cemento (f/c), las características de las fibras empleadas y los resultados de la resistencia a compresión de cada hormigón ($f'c$) determinada sobre cubos de 70 mm de arista. En la Fig. 1 se muestran las diferentes fibras.

Tabla 1. Mezclas: características de las fibras usadas y resistencia a compresión.

	Serie 1				Serie 2				
	B1	C40	D40	D80	B2	E40	E80	F40	F80
a/c+ms		0,21				0,24			
f/c		0,07				0,07			
CUC (kg/m ³)		740				730			
ms (kg/m ³)		73				60			
Fibras	-	C	D	D	-	E	E	F	F
f _t (N/mm ²)		>3000	>2300	>2300		>2300	>2300	>2500	>2500
tipo de gancho	-	3D	5D	5D	-	3D	3D	3D	3D
largo	-	30	60	60	-	30	30	60	60
l/d	-	80	65	65	-	75	75	85	85
kg/m ³	-	40	40	80	-	40	80	40	80
f'c (MPa)	125,8	144,2	126,0	148,8	117,5	116,0	110,0	114,0	113,0

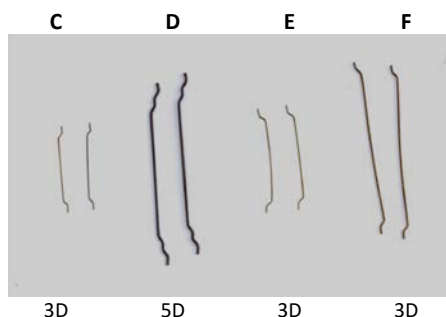


Figura 1. Fibras empleadas.

En ambas series se elaboró un hormigón de base al que luego se le incorporaron diferentes tipos y contenidos de fibras. En la serie 1, además del hormigón de referencia B1, se elaboraron tres hormigones con 40 u 80 kg/m³ de fibras (C40, D40 y D80); la serie 2 incluye al hormigón de referencia B2 y a los HARRF E40, E80, F40 y F80. En estado fresco, los hormigones B1 y B2 alcanzaron valores de diámetro de escurrimiento iguales a 690 y 580 mm, y tiempos t₅₀ iguales a 7,7 y 6,0 s respectivamente. Como era de esperar en los HARRF se redujeron los diámetros de extendido pero los mismos en todos los casos superaron los 500 mm y permitieron el llenado de las probetas asegurando su compacidad.

Para la caracterización en flexión se moldearon con cada mezcla tres prismas de 430 mm de largo, 75 mm de ancho y 50 mm de altura. Para el ensayo los prismas fueron girados 90°, se

realizó una entalla de 18 mm sobre el centro de la cara traccionada y se aplicó carga al centro de una luz de 350 mm. La velocidad de ensayo se controló mediante un extensómetro tipo clip gage fijo a ambos lados de la entalla que mide la apertura de la boca de fisura (CMOD). Así se siguieron los lineamientos generales de la norma EN14651 [8] manteniendo la relación altura/luz y entalla/altura [9]; como resultados se determinaron la tensión de primera fisura (f_L) y las resistencias residuales f_{R1} y f_{R3} , correspondientes a aperturas de fisura en la viga estándar iguales a 0,5 mm y 2,5 mm. A la vez y considerando que en muchos casos se verifica un post-pico con endurecimiento se calculó la tensión máxima (f_{max}) como otro parámetro del ensayo de flexión.

Al mismo tiempo se moldearon losas de 500 x 500 x 50 mm (de igual espesor que los prismas). Para cada mezcla, dos losas fueron ensayadas siguiendo los lineamientos de la recomendación EFNARC [10]; el ensayo, bajo condiciones de deformación controlada, aplica una carga en el centro de la losa a través de una placa cuadrada de acero de 100 mm de lado y mide la deformación al centro de la cara inferior mediante un LVDT, para evaluar la energía acumulada durante el proceso. Otras tres losas de cada mezcla fueron destinadas a ensayos frente a cargas explosivas de diferente intensidad, detalles de los mismos se indican en Luccioni et al. [11].

Finalizados los ensayos, se realizó un conteo de la densidad de fibras sobre las superficies de fractura de los prismas y sobre cortes en ambas direcciones en el caso de las losas.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra las curvas tensión-CMOD obtenidas de los ensayos de flexión más representativas de cada hormigón. La Tabla 2 presenta para cada mezcla los valores promedio de las tensiones de primera fisura (f_L), máxima (f_{max}) y residuales (f_{R1} y f_{R3}) junto con la densidad de fibras medida en la superficie de fractura al finalizar los ensayos. En el caso de las losas incluye la carga máxima (P_{max}), la energía (E) calculada a partir del área bajo la curva hasta una flecha de 25 mm y la densidad de fibras promedio de ambas direcciones.

Considerando los HARRF de la serie 1 (Fig. 2a) se observa que todos tienen un post-pico con endurecimiento, las tensiones residuales en D80 son un 40% mayor que las del hormigón D40 que incorpora la mitad de dosis de las mismas fibras. El hormigón C40 que posee 40 kg/m³ de fibras más cortas tiene mayores tensiones residuales para aperturas de fisuras pequeñas (f_{R1}) que D40. Para mayores aperturas de fisuras las fibras más largas brindan mayor capacidad residual. En la Fig. 1b se muestran las curvas de los hormigones de la serie 2. Se puede observar que los hormigones E y F también tienen un post pico con endurecimiento. En ambos casos, las tensiones residuales de los que tienen la mayor dosis de fibras (E80 y F80) son un 30 y 35 % mayores que las de E40 y F40 respectivamente; en estos HARRF, tanto con fibras cortas como largas, las tensiones residuales se mantienen relativamente constantes hasta grandes aperturas de fisura. En la Tabla 2 se observa en los HARRF con fibras 5D elevadas tensiones residuales para grandes CMOD que pueden asociarse a una mayor resistencia al arrancamiento.

Cabe indicar que en todos los casos, aún para bajos contenidos de fibras, luego de la primera fisura se produjo una respuesta con endurecimiento. No se observaron fibras cortadas, algunos ganchos estaban deformados y otros no. Se destaca que, a pesar de que las probetas estaban entalladas y eso define el plano de fractura, en los HARRF con 80 kg/m^3 de fibras se desarrolló un cuadro de fisuración múltiple lo que pone en evidencia el marcado control de fisuras resultante del alto contenido de fibras.

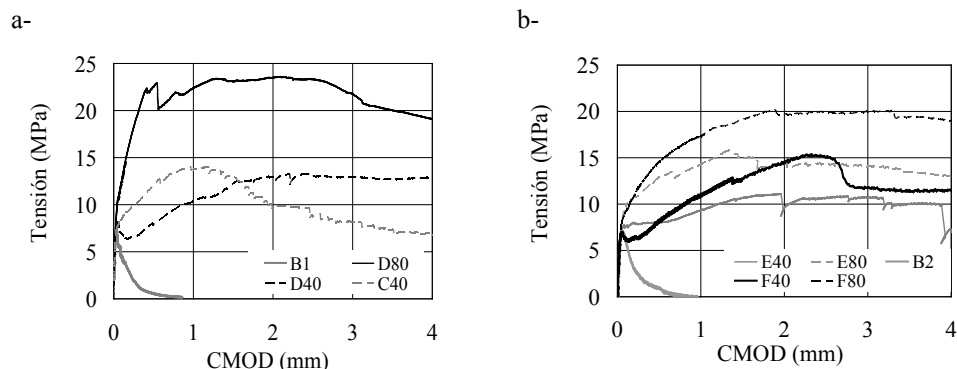


Figura 2. Curvas tensión-CMOD en ensayos de flexión sobre prismas entallados. a-Serie 1 b-Serie 2.

Tabla 2. Resultados ensayos de flexión sobre vigas y losas.

Vigas	B1	C40	D40	D80	B2	E40	E80	F40	F80
f_L (MPa)	7,5	8,8	8,1	9,9	7,6	7,6	8,4	7,6	7,6
f_{max} (MPa)	7,5	14,9	12,8	23,1	7,6	11,1	15,9	12,0	18,5
f_{R1} (MPa)	-	13,5	9,4	21,5	-	7,3	13,1	7,0	13,9
f_{R3} (MPa)	-	8,7	12,7	21,0	-	9,6	14,5	11,3	17,6
fibras/mm ²	-	0,023	0,007	0,018	-	0,016	0,039	0,009	0,019
Losas									
P_{max} (kN)	13	34	29	41	18	31	47	31	37
E (J)	18	552	624	794	21	569	774	680	910
fibras/mm ²	-	0,026	0,006	0,012	-	0,030	0,044	0,008	0,021

La Figura 3 muestra el efecto de la densidad de fibras en la capacidad resistente medida en los ensayos de flexión para todos los hormigones estudiados. Se observa que, como es lógico, la tensión de primer pico (f_L) no varía con la densidad de fibras, mientras que las tensiones máximas y residuales aumentan a medida que crece el número de fibras en la superficie de fractura. Para igual densidad de fibras las tensiones máximas y residuales de los hormigones con fibras más largas son mayores que en el caso de las fibras más cortas.

Comparando fibras 5D y 3D de similar longitud, se observa que a igual densidad de fibras los hormigones con fibras 5D (D40 y D80) poseen mayores tensiones máximas y residuales que los hormigones con fibras 3D (F40 y F80), si bien existen diferencias en la resistencia de la matriz entre las series 1 y 2, esto parece confirmar una mayor eficiencia de estas fibras atribuible al tipo de acero empleado y al mayor trabajo que demandan para deformar y arrancar el doble gancho.

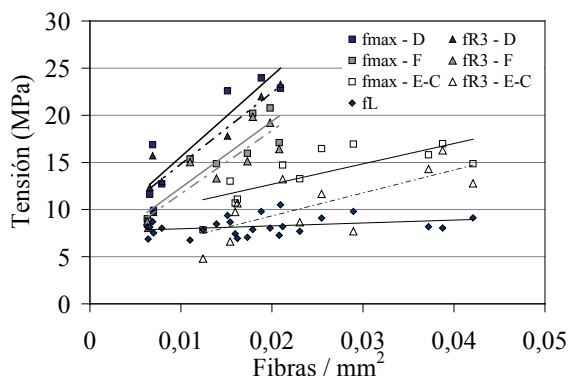


Figura 3. Variación de las tensiones de primer pico, máxima y residuales (f_L , f_{max} , f_{R1} y f_{R3}) con la densidad de fibras.

En la Figura 4 se presentan las curvas carga-flecha obtenidas de los ensayos realizados sobre las losas. Se observa que el comportamiento de los hormigones es acorde a la dosis y tipo de fibras empleados, sin embargo se nota una menor variación por efecto del contenido de fibras respecto al observado en los ensayos de flexión. Con respecto a la forma de falla, en el caso del hormigón simple las losas muestran una abrupta caída de resistencia que corresponde a la aparición de la primera fisura de flexión y luego un segundo pico que indica cuando la losa se fisura en la dirección ortogonal. Por el contrario los HRF luego de la primera fisura mantienen una gran capacidad portante gracias al desarrollo de fisuras en varias direcciones, la muestra puede sobrellevar grandes deformaciones manteniendo capacidad portante, a medida que se desarrolla el ensayo se observan fisuras en la zona inferior, a veces con grandes espesores pero no se manifiestan en la cara superior. Además se manifiesta la deformación en una marcada elevación de los ángulos de las losas.

En lo relativo al aspecto de las losas al finalizar los ensayos estáticos, en las losas sin fibras las caras de fractura están bien definidas, mientras que en los HARRF el cuadro de fisuración fue muy extendido y las losas mantuvieron su integridad; evidenciando su gran capacidad de absorción de energía. La Fig. 5 compara los distintos HARRF en términos de la evolución de la energía acumulada durante el ensayo, mientras que en la Fig. 6 se presentan fotografías de la cara traccionada de las losas de la serie 2 luego de ser ensayadas.

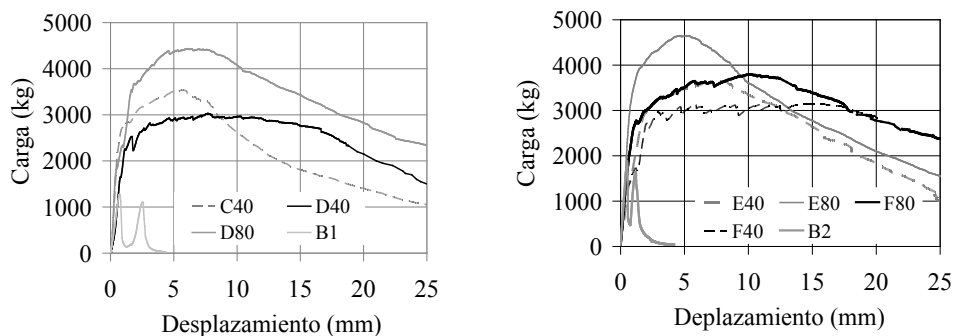


Figura 4. Curvas carga-desplazamiento obtenidas sobre ensayos estáticos de las losas.

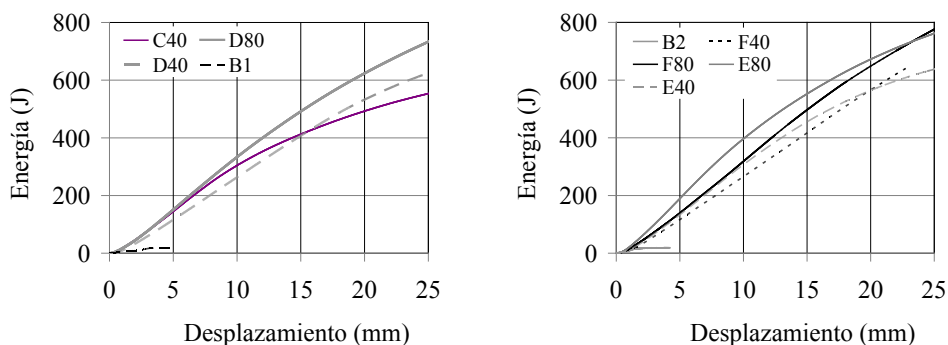


Figura 5. Curvas energía acumulada-desplazamiento obtenidas sobre ensayos estáticos de las losas.



Figura 6. Fotografías de la cara traccionada de las losas.

Una de las mayores potencialidades que brindan los HARRF se refiere a su empleo como elementos de refuerzo o protección frente a cargas extremas como impactos o explosiones. Tres losas de cada hormigón fueron destinadas a este tipo de pruebas. Se ubicaron en un marco similar al de los ensayos estáticos pero con una restricción en las esquinas para evitar su desplazamiento, y se detonaron cargas de diferente magnitud ubicadas sobre el centro de las placas, algunas apoyadas y otras a distintas alturas [11].

A modo de ejemplo en la Fig. 7 se muestra el aspecto de las losas correspondientes a los hormigones de la serie 2 luego de ser sometidas a una explosión de significativa magnitud (carga explosiva equivalente a 488 g de TNT a 0,27 m de altura). Los resultados obtenidos fueron muy alentadores en lo relativo a los beneficios que derivan de la incorporación de fibras, e indican que pueden existir diferencias entre fibras largas y cortas como también que merecen estudiarse alternativas de uso de mezclas híbridas. La apertura de fisuras, la zona de erosión y las flechas disminuyeron con el incremento de la dosis de refuerzo; mientras las losas sin fibras fueron completamente destruidas y los fragmentos se esparcieron a varios metros de distancia, las fibras preservaron la integridad de las losas, incluso la adición de sólo 0,5 % en volumen de fibras fue suficiente para modificar el cuadro de falla. Comparando con el hormigón sin fibras, la incidencia de las fibras en la formación del cráter que genera la explosión resulta menos importante que en los cambios observados en la respuesta a flexión.

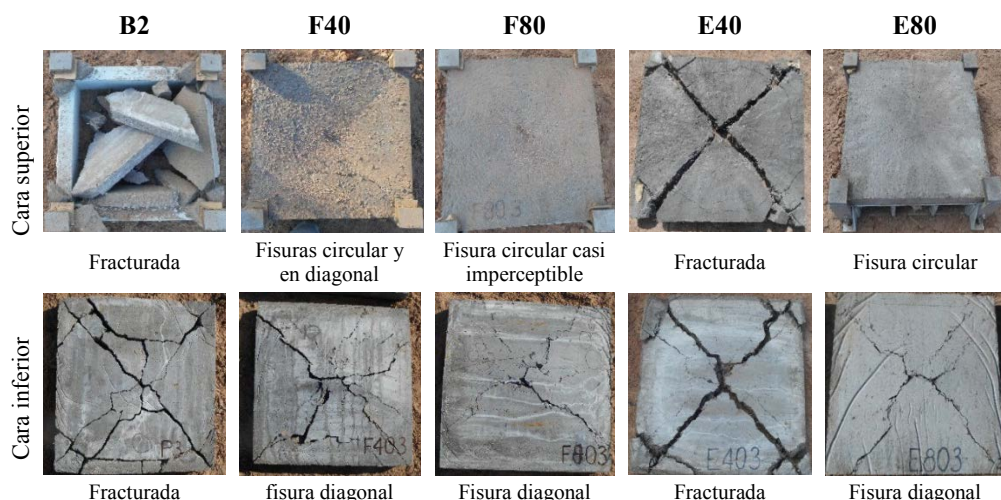


Figura 7. Fotografías de las caras superior e inferior de losas correspondientes a los hormigones de la serie 2 luego de ser sometidas a explosiones.

4.- CONCLUSIONES

Se estudiaron los beneficios derivados de la incorporación de diferentes dosis y tipos de fibras de acero de alta resistencia en hormigones con resistencias a compresión mayores a 100 MPa. El estudio forma parte de un proyecto que explora las ventajas del uso de capas delgadas de HARRF y HUARRF como materiales de reparación y refuerzo.

Los resultados indican que:

- Las fibras dieron lugar respuestas post-pico con endurecimiento, con grandes incrementos en la capacidad residual y tenacidad; incluso en prismas entallados se observó fisuración múltiple que evidencia la capacidad de control de fisuras, principalmente para altas dosis de fibras (1% en volumen).
- Esta respuesta característica también se observó en losas ensayadas bajo cargas estáticas que evidencian una gran capacidad de absorción de energía.
- Como era de esperar al aumentar la densidad de fibras aumentan las tensiones residuales de los hormigones. Este aumento fue mayor cuando se utilizaron fibras más largas y más aún en el caso de las fibras donde el gancho en su extremo ha sido optimizado con el fin de mejorar su resistencia al arrancamiento.

Cabe comentar que los HARRF resultan especialmente adecuados para sobrellevar acciones extremas con explosiones o impactos, y que incluso bajas dosis de fibras son capaces de preservar la integridad de los elementos estructurales modificando el cuadro de falla. Sin embargo se observaron diferencias entre dosis similares de fibras de distinta longitud lo que merece ser estudiado con mayor profundidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación de los proyectos PICT-2013-1740 2014-17, 11/I188 Secyt UNLP 2014-17 y CONICET PIP 2015-17, y a los técnicos Anabela Gerez y Pablo Bossio por su colaboración en el desarrollo del programa experimental. Asimismo se agradece a las firmas Cementos Avellaneda SA, Ferrocement SA, Sika Argentina SAIC, y Bekaert SA por su colaboración en el suministro de materiales para la fabricación de los hormigones.

REFERENCIAS

- [1] Giaccio, G, and Zerbino, R., 'Fiber reinforced high strength concrete: evaluation of failure mechanism' in High-Performance Concrete Performance and Quality of Concrete Structures, 3rd Int Conf, Recife, PE, Brazil, 2002, (Ed: V.M. Malhotra et al, ACI Int, SP-207, 2002) 69-90.
- [2] Isas Pedraza, D.R., Torrijos, M.C., Giaccio, G., Zerbino, R., Luccioni, B. and Sfer, D., 'Hormigones autocompactantes con fibras: respuesta mecánica de losas sometidas a cargas puntuales y vigas delgadas', in BAC2010 - 2º Cong Ibérico sobre betão auto-compactável, Guimarães, 2010.

- [3] Bernard, E.S., 'Age-dependent Changes in Post-cracking Performance of Fibre Reinforced Concrete for Tunnel Segments' in 15th Australasian Tunnelling Conf 2014, paper 129.
- [4] Corinaldesi V. and Moriconi G., 'Mechanical and thermal evaluation of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concretes for engineering applications', *Construction and Building Materials* **26** (2012) 289–294.
- [5] Habel, K. and Gauvreau P., 'Response of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) to impact and static loading', *Cement & Concrete Composites* **30** (2008) 938–946.
- [6] Su-Tae Kang and Jin-Keun Kim, 'The relation between fiber orientation and tensile behavior in an Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (UHPFRCC)', *Cement and Concrete Research* **41** (2011) 1001–1014
- [7] Caverzan A., Cadoni E. and di Prisco M., 'Tensile behaviour of high performance fibre-reinforced cementitious composites at high strain rates', *International Journal of Impact Engineering* **45** (2012) 28-38.
- [8] EN 14651. Precast concrete products - test method for metallic fibre concrete - Measuring the flexural tensile strength. European Standard, 2005.
- [9] Giaccio, G., Tobes, J.M., Zerbino, R., 'Use of small beams to obtain design parameters of fibre reinforced concrete', *Cement Concrete Composites* **30** (4) (2008) 297-306.
- [10] EFNARC (1996) European specification for sprayed concrete, 30p. ISBN: 095224831X. www.efnarc.org/pdf/euroConcreteSpesEng.pdf
- [11] Luccioni, B, Isla F., Codina R., Ambrosini D., Zerbino R., Giaccio G., Torrijos M.C., 'Effect of steel fibers on static and blast response of high strength Concrete', *International Journal of Impact Engineering* **107** (2017) 23-37.