

## TENACIDAD Y RESPUESTA FRENTE A CARGAS EXPLOSIVAS EN HORMIGONES DE MUY ALTA RESISTENCIA REFORZADOS CON FIBRAS

Graciela Giaccio<sup>1</sup>, Raúl Zerbino<sup>2</sup>, María Celeste Torrijos<sup>2</sup>,  
Bibiana Luccioni<sup>3</sup>, Facundo Isla<sup>3</sup>, Ramón Codina<sup>4</sup>, Daniel Ambrosini<sup>4</sup>,  
LEMIT-CIC, 52 e/121 y 122, La Plata, Argentina, ggiaccio@ing.unlp.edu.ar

**Palabras claves** Hormigón de muy alta resistencia, fibras de acero, explosiones, tenacidad.

### RESUMEN

El Hormigón de Muy Alta Resistencia Reforzado con Fibras aparece como un material promisorio para construir elementos de protección o estructuras expuestas a acciones extremas. Este trabajo muestra el efecto de la incorporación de fibras en un hormigón con una resistencia a compresión mayor a 100 MPa. Se comparan mezclas de hormigón simple y 4 hormigones que incorporan 40 u 80 kg/m<sup>3</sup> de dos fibras de acero de diferente longitud. Luego de describir la obtención del material y la caracterización en flexión y compresión, se muestra la respuesta bajo cargas estáticas y frente a explosiones de losas cuadradas de 500 mm de lado y 50 mm de espesor. Los resultados 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 un cuadro de fisuración que manifiesta gran capacidad de absorción de energía.

### INTRODUCCIÓN

A fines del siglo pasado, ante el desarrollo del Hormigón de Alta Resistencia (HAR) se comienzan a incorporar fibras al material para aportar ductilidad y tenacidad a una matriz notablemente más frágil en términos relativos que la del hormigón convencional dando lugar a Hormigones de Alta Resistencia Reforzados con Fibras (HARRF). En HAR el cuadro de fisuración resulta menos tortuoso y suele atravesar los agregados provocando una rotura abrupta; si bien la acción de las fibras no suele incrementar la resistencia a compresión, lo hace en mayor medida que lo habitualmente observado en un hormigón de resistencia convencional (1,2). Analizando mezclas con resistencias a compresión entre 60 y 80 MPa se encontró que para una misma dosis de refuerzo crece la efectividad de las fibras en flexión con respecto a lo observado en niveles de resistencia convencional, pudiendo dar lugar a endurecimiento con fisuración múltiple. Sin embargo, con fibras de acero de bajo carbono puede ocurrir la rotura de las fibras con la consecuente disminución de tenacidad; como es de esperar este mecanismo se presenta

<sup>1</sup> Investigador CIC. LEMIT - Facultad de Ingeniería UNLP, La Plata, Argentina.

<sup>2</sup> Investigador CONICET. LEMIT - Facultad de Ingeniería UNLP, La Plata, Argentina.

<sup>3</sup> Investigador CONICET. Instituto de Estructuras, FACET, UNT, Tucumán Argentina.

<sup>4</sup> Universidad de Cuyo, CONICET, Facultad de Ingeniería, Mendoza, Argentina.

con mayor probabilidad a medida que aumenta la resistencia de la matriz (3, 4) por lo cual en HARRF es menester el empleo de fibras de acero de alta resistencia.

En la actualidad existe profundo interés en el uso de materiales de altas prestaciones para el refuerzo y rehabilitación de estructuras existentes así como para la construcción de nueva infraestructura (5). La reparación y refuerzo de estructuras de hormigón armado frente al riesgo sísmico, cambios de destinos o incrementos en los niveles de carga o la posibilidad de exposición frente a cargas extremas como explosiones o impactos aparecen como casos típicos. Para ello los materiales de refuerzo deben tener elevada resistencia y ductilidad. El HARRF presenta características tales como un postpico con endurecimiento y un cuadro de fisuración múltiple bajo cargas de tracción que lo hacen particularmente apto para reforzar elementos estructurales (1-7). A la vez dada su similitud con el material original de las estructuras, puede formar parte integral de la misma con escaso efecto intrusivo. La reparación o refuerzo con HARRF es en general considerablemente más económica que el uso de otras técnicas de refuerzo y puede ser aplicada a cualquier edificación de hormigón armado, sea un monumento de valor histórico, un edificio público como una escuela o un edificio residencial.

Este trabajo analiza el efecto de la incorporación de distintas dosis de dos fibras de acero de alta resistencia de diferente longitud en una matriz de hormigón con una resistencia a compresión mayor a 100 MPa. Se describen los materiales empleados para su obtención y sus propiedades mecánicas frente a sollicitaciones de flexión y compresión. Luego y, a modo de ejemplo de su potencial capacidad frente a acciones extremas, se muestra la respuesta de pequeñas losas delgadas frente a cargas estáticas convencionales y frente a explosiones de diferente intensidad.

## PROGRAMA EXPERIMENTAL

### Materiales y mezclas

Empleando un mismo hormigón autocompactante de base, se elaboraron cuatro HARRF incorporando 40 o 80 kg/m<sup>3</sup> de fibras de acero de alto carbono de alta resistencia tipo hooked-end. En primer lugar se empleó una fibra de 60 mm de longitud y 0,7 mm de diámetro (F40 y F80) y en una segunda serie se repitió el procedimiento utilizando una fibra más corta, de 30 mm de longitud y 0,4 mm de diámetro (E40 y E80); como referencia se prepararon, en cada caso, muestras con el hormigón sin fibras (F0 y E0). Para fabricar el hormigón se emplearon como materiales 730 kg/m<sup>3</sup> de cemento portland CPN50, 73 kg/m<sup>3</sup> de microsilíce, 48 kg/m<sup>3</sup> de filler calcáreo, 490 kg/m<sup>3</sup> de arena silíceo natural y 860 kg/m<sup>3</sup> de piedra partida granítica de 12 mm de tamaño máximo; además se incorporaron un aditivo un plastificante retardador (1,0 kg/m<sup>3</sup>) y un superfluidificante base copolímero modificado (8,9 kg/m<sup>3</sup>). La relación agua/ligante fue igual a 0,24.

El hormigón sin fibras tuvo alta fluidez, gran capacidad de llenado y compactación, alcanzando un diámetro de extendido de 580 ± 30 mm y un tiempo T<sub>50</sub> de 6 ± 1 s. Como era de esperar en los HARRF el extendido se redujo y fue del orden de 510 ± 30 mm, pero se mantuvieron las condiciones para asegurar un llenado y compactación eficientes. El aire incorporado en todos los casos fue igual a 3,8 ± 0,2 %.

La Figura 1 muestra el aspecto del hormigón fresco y el llenado de las probetas que se realizó sin requerir vibrado ni otros elementos adicionales para garantizar la compactación, poniendo en evidencia la autocompactabilidad de las mezclas, tanto el hormigón de base como los HARRF. Todas las probetas fueron curadas durante 28 días en cámara húmeda y luego permanecieron al aire 4 meses en ambiente de laboratorio, al cabo de dicho lapso se realizaron todos los ensayos.



Figura 1: Elaboración de las muestras.

Para evaluar la resistencia a compresión se moldearon cubos de 70 mm de arista, y en la primera serie cilindros de 100x200 mm para evaluar la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad. La caracterización en flexión se realizó sobre prismas de 430 mm de largo, 75 mm de ancho y 50 mm de altura (igual a la de las losas). Para el ensayo los prismas fueron girados 90°, sobre el centro de la cara traccionada se realizó una entalla de 18 mm y se aplicó carga al centro de una luz de 350 mm. Sobre la entalla se ubicó un extensómetro para controlar la velocidad de ensayo. 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 iguales a 0,5 mm y 2,5 mm.

Con cada hormigón se moldearon losas cuadradas de 550 mm de arista y 50 mm de espesor, tres de ellas se destinaron a ensayos bajo cargas explosivas de diferente intensidad y sobre las otras se evaluó la respuesta carga – desplazamiento en flexión siguiendo los lineamientos de la recomendación EFNARC (10). En los ensayos estáticos se empleó un sistema Instron controlando la velocidad de desplazamiento y se midió la deformación registrada por un LVDT sito en el centro de la cara inferior. La aplicación de la carga se realizó a través de una placa cuadrada de acero de 100 mm de lado ubicada en el centro de las losas. Para los ensayos bajo cargas explosivas las losas se apoyaron en un marco similar al de los ensayos estáticos. Se detonaron cargas ubicadas sobre el centro de las placas a distintas distancias; el ensayo I corresponde a una pequeña carga apoyada mientras que los ensayos II y III corresponden a cargas elevadas y de magnitud creciente. La Figura 2 muestra una losa en el ensayo estático y la disposición de las cargas en los ensayos con explosivos.



Figura 2: Ensayo de losas. cargas estáticas (izquierda); y disposición de los explosivos sobre la losa (centro) y elevados (derecha).

### Respuesta bajo cargas estáticas

La resistencia a compresión sobre cubos alcanzó valores de 121, 114, 113 MPa para F0, F40, F80 y de 114, 116 y 110 MPa para E0, E40 y E80 respectivamente. Dado que todas las muestras contienen el mismo hormigón de base, las pequeñas diferencias se atribuyen a que las fibras disminuyeron la compactación en estos moldes de pequeño tamaño. La resistencia a compresión de los cilindros fue 114, 109 y 109 MPa para F0, F40, F80, y el módulo de elasticidad igual a 39,6, 39,2, 40,9 GPa respectivamente.

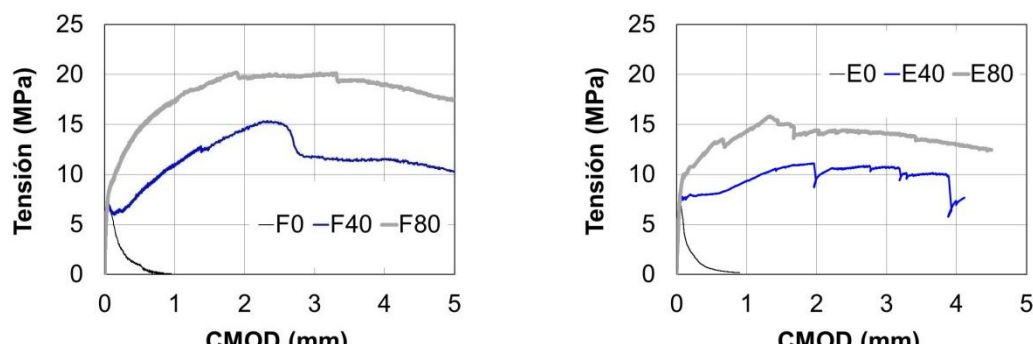


Figura 3: Respuestas típicas tensión – apertura de fisura en ensayos de flexión.

La Figura 3 presenta la respuesta tensión – apertura de fisura (CMOD) en flexión correspondientes a las Series F (fibras de 60 mm) y E (fibras de 30 mm). El hormigón sin fibras (F0, E0) presentó una respuesta frágil con una brusca caída de la carga luego del primer pico, y la falla se caracteriza por una única fisura central muy definida. En los HARRF la capacidad residual luego del primer pico fue notable y como era de esperar depende del tipo y dosis de fibras. No se observaron fibras cortadas, algunos ganchos estaban deformados y otros no. Luego de la primera fisura se produjo en todos los casos, aún para bajos contenidos de fibras, una respuesta con endurecimiento. 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<sup>3</sup> 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. La Tabla 1 resume los resultados de los ensayos de flexión indicando los valores promedio de tensión de primera fisura ( $f_L$ ), tensión máxima ( $f_{max}$ ) y resistencias residuales  $f_{R1}$  y  $f_{R3}$ . Asimismo se indica la densidad de fibras en las superficies de fractura calculadas a partir del conteo de fibras al finalizar el ensayo de los prismas.

Tabla 1. Resultados de los ensayos de flexión en prismas.

HUAR		$f_L$ (MPa)	$f_{max}$ (MPa)	$f_{R1}$ (MPa)	$f_{R3}$ (MPa)	Densidad (fibras/mm <sup>2</sup> )
F0	Promedio	7,3	7,3	-	-	-
	Desv Std	0,5	0,5	-	-	-
	COV (%)	8	8	-	-	-
F40	Promedio	7,6	12,0	7,0	11,3	0,009
	Desv Std	0,9	3,6	2,4	3,4	0,004
	COV (%)	12	30	34	30	40
F80	Promedio	7,6	18,5	13,9	17,6	0,019
	Desv Std	0,5	2,3	1,7	2,2	0,002
	COV (%)	6	13	12	13	9
E0	Promedio	7,6	7,6	-	-	-
	Desv Std	0,01	0,01	-	-	-
	COV (%)	0,2	0,2	-	-	-
E40	Promedio	7,6	11,1	7,3	9,6	0,016
	Desv Std	0,6	2,2	1,8	1,8	0,004
	COV (%)	8	20	25	19	22
E80	Promedio	8,4	15,9	13,1	14,5	0,039
	Desv Std	0,6	1,1	0,2	1,8	0,002
	COV (%)	7	7	1	12	6

Mientras las curvas tensión-CMOD fueron prácticamente coincidentes en el caso del hormigón sin fibras, como era de esperar existió cierta dispersión en el caso de los HARRF. Como es habitual la dispersión aumenta en los HARRF con menores contenidos de fibras, lo que se evidencia en los COV. Otros autores han atribuido la variabilidad en los resultados de los ensayos de flexión en hormigón con fibras convencional a diferencias en la densidad de fibras en la zona de fractura (11,12). La distribución de fibras depende de la geometría de las fibras, del tamaño de probeta, de la dosis de fibras y del método de llenado y se acentúa en el caso de elementos delgados (11, 13, 14). La Figura 4 muestra la variación de los parámetros resistentes obtenidos en los ensayos de flexión en función de la densidad de fibras. Se aprecia cómo las propiedades residuales dependen directamente de la densidad mientras que la tensión de primera fisura no resulta mayormente afectada.

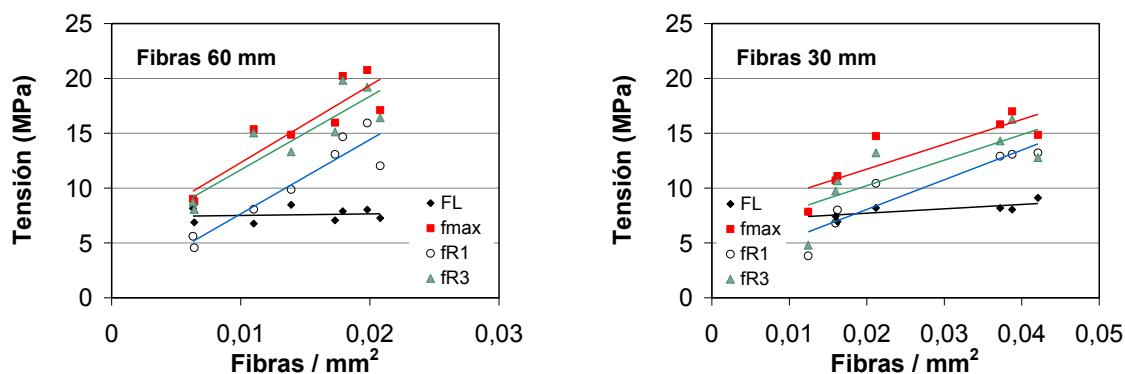


Figura 4: Efecto de la densidad de fibras sobre los parámetros resistentes.

La Figura 5 presenta la respuesta de los hormigones en el ensayo estático de losas; el hormigón sin fibras muestra 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. Los HARRF con 40 kg/m<sup>3</sup> de refuerzo se fisuran aproximadamente para la misma carga (primer pico) pero luego mantienen su capacidad portante gracias al desarrollo de fisuras en varias direcciones. En el caso de F80 y E80 luego de la fisuración inicial no se percibe caída de resistencia sino sólo un pequeño cambio de rigidez, luego sigue creciendo la carga sin grandes desplazamientos. En el caso de las fibras más largas (F80) se alcanza la carga máxima para una flecha mayor a 10 mm, manteniendo una capacidad residual que prácticamente duplica la capacidad resistente del hormigón sin fibras. En E80 el pico de carga se produce a un desplazamiento claramente menor. En lo relativo al aspecto de las caras de las losas al finalizar los ensayos estáticos, en las losas sin fibras existió una fractura bien definida, 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.

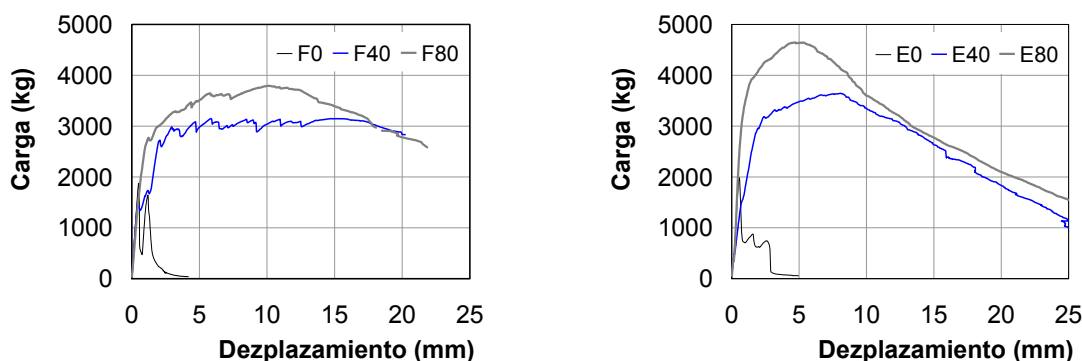


Figura 5. Curvas carga – desplazamiento en el ensayo estático de losas.

## Respuesta ante cargas explosivas

Para los ensayos con cargas explosivas las losas se apoyaron sobre un marco metálico reforzado como se ilustra en la Figura 2, dejando una luz libre de 0,46 m. Se realizaron tres tipos de ensayos utilizando un gel explosivo con una equivalencia de TNT de 65%. En el ensayo I se utilizó una carga explosiva equivalente a 49 g de TNT apoyada sobre la losa, en el ensayo II la carga equivalente a 244 g de TNT se ubicó elevada 0.24 m y en el ensayo III se usó una carga equivalente a 488 g de TNT ubicada a 0.27 m de altura. En la Figura 6 se muestra el aspecto de las caras superior e inferior de cada losa luego del ensayo. La Figura 6.a corresponde a la carga tipo I, la Figura 6.b a la carga II y la Figura 6.c corresponde a la carga III. Se muestra inicialmente la columna del hormigón sin fibras y a continuación las placas de F40, F80; E40 y E80.

Las losas sin fibras se comportaron de modo extremadamente frágil, quebrándose para todos los casos de cargas explosivas. El efecto de la magnitud creciente de la carga explosiva se puso en evidencia en la posición final de las partes de la losa. A pesar de presentar daño, salvo un caso (E40-III), las losas de HARRF mantuvieron su integridad gracias al efecto de costura de las fibras. La forma de rotura cambió al alejar la carga de la superficie de las placas y al aumentar el nivel de carga. El daño, caracterizado por la fisuración y la pulverización del material, disminuyó con el contenido de fibras. También se observó que para la carga III la deflexión residual (flecha del punto medio) de las placas disminuyó con el contenido de fibras. La forma de rotura de las placas con fibras bajo cargas explosivas elevadas se caracteriza por una disposición de fisuras diagonales, dicho cuadro de fisuración resulta similar al observado bajo cargas estáticas. Las fibras más largas fueron más eficientes que las fibras cortas para controlar las fisuras por flexión. En ningún caso las placas reforzadas con las fibras más largas se fracturaron como las de hormigón simple mientras que para la carga III (más intensa), las losas reforzadas con 40 kg/m<sup>3</sup> de fibras cortas sí se fracturaron. En contraposición las fibras más cortas controlaron mejor el estallido explosivo (spalling) producido por tensiones de tracción en la parte posterior de las losas, lo cual se evidencia en el tamaño del cráter.





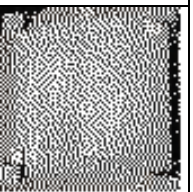





	Sin fibras	F40	F80	E40	E80
Cara superior					
	Fracturada	Fisuras 0.1mm, cráter de 50x60 mm, prof.10 mm	Fisuras 0.1mm, cráter de 40x55 mm, prof.7 mm	Fisuras 0.1mm, cráter de 35x35 mm, prof.3 mm	Fisura 0.05mm, cráter de 35x30 mm, prof.2 mm
Cara inferior					
	Fractura, cráter 230x260 mm, prof.50 mm	Fisuras 0,3mm, cráter de 165x160 mm, prof.40 mm	Fisuras 0,1mm, cráter de 150x150 mm, prof.35 mm	Fisuras 0,2 mm, cráter de 80x10 mm, prof.5 mm	Fisuras 0,1mm, cráter de 20x8 mm, prof.3 mm
Laterales	Fracturada	Fisura vertical 0,1 mm	Sin signos	Fisura vertical 0,1 mm	Sin signos

Figura 6.a. Explosiones tipo I (carga apoyada sobre la losa).



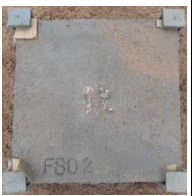


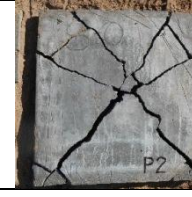




	Sin fibras	F40	F80	E40	E80
Cara superior					
	Fracturada	Fisuras 0.1mm, pequeño cráter de 15x15 mm, prof.3 mm	Sin signos	Sin signos	Sin signos
Cara inferior					
	Fracturada	Fisuras en diagonal de 2.5 mm, cráter de 35x 35 mm, prof.10 mm	Fisuras 0,2 mm	Fisuras 1,4 mm	Fisuras 0,2 mm,
Laterales	Fracturada	Sin signos	Sin signos	Fisura 0,2 mm	Fisura 0,1 mm

Figura 6.b. Explosiones tipo II (carga elevada de intensidad menor).











	Sin fibras	F40	F80	E40	E80
Cara superior					
	Fracturada	Fisuras circular y en diagonal de 2mm, cráter 20x20 mm prof.3 mm	Fisura circular de 0,1 mm casi imperceptible	Fracturada	Fisura circular 0,1 mm
Cara inferior					
	Fracturada	Ancha fisura diagonal de 10 mm	Fisura diagonal 4 mm	Fracturada	Fisura diagonal 3,5 mm
Laterales	Fracturada	Fisura diagonal 2 mm	Fisura diagonal 1 mm	Fracturada	Fisura diagonal 1,5 mm

Figura 6.c. Explosiones tipo III (carga elevada de intensidad mayor).

## CONCLUSIONES

Se estudió el efecto de la incorporación de diferentes dosis y largos de fibras de acero en un hormigón con resistencia a compresión mayor a 100 MPa. Se concluye que:

Las fibras dieron lugar a 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.

La respuesta frente a explosiones fue significativamente mejorada por las fibras, 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, 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. El efecto de las fibras en la formación del cráter posterior fue menos importante que en la respuesta a flexión.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación de los proyectos PICT-2013-1740 2014-17, 11/1188 Secyt UNLP 2014-17 y CONICET PIP 2015-17.

## REFERENCIAS

- (1) Giaccio, G, Zerbino, R. "Fiber reinforced high strength concrete: evaluation of failure mechanism" High-Performance Concrete Performance and Quality of Concrete Structures. 3<sup>rd</sup> Int Conf, Recife, PE, Brazil. Ed: V.M. Malhotra et al, ACI Int, SP-207, 2002, 69-90.
- (2) Giaccio, G., Zerbino, R., Gettu, R. 1999, "Hormigones de alta performance con fibras de acero para aplicaciones estructurales" Revista Hormigón 33, AATH, 53-63.
- (3) Isas Pedraza, DR, Torrijos, MC Giaccio, G, Zerbino, R. Luccioni, B. Sfer, D. "Hormigones autocompactantes con fibras: respuesta mecánica de losas sometidas a cargas puntuales y vigas delgadas", BAC2010 - 2º Cong Ibérico sobre betão auto-compactável, Guimarães, 2010.
- (4) Bernard, "Age-dependent Changes in Post-cracking Performance of Fibre Reinforced Concrete for Tunnel Segments" 15th Australasian Tunnelling Conf 2014, paper 129.
- (5) Shah A, Ribakov Y, 'Recent trends in steel fibered high-strength concrete', Materials and Design 32, 2011, 4122–4151.
- (6) Caverzan A, Cadoni E, di Prisco M. "Tensile behaviour of high performance fibre-reinforced cementitious composites at high strain rates", Int J of Impact Eng, 45, 2012, pp. 28-38.
- (7) Coughlin AM, Musselman ES, Schokker AJ, Linzell DG "Behavior of portable fiber reinforced concrete vehicle barriers subject to blasts from contact charges", Int J of Impact Eng, 37, 2010, 521–529.
- (8) EN 14651 (2005): Test method for metallic fibered concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual), 18p.
- (9) Giaccio, G, Tobes, JM, Zerbino, R. "Use of small beams to obtain design parameters of fibre reinforced concrete", Cement Concrete Comp, 30 (4), 2008, 297-306.
- (10) EFNARC (1996): European specification for sprayed concrete, 30p. [www.efnarc.org/pdf](http://www.efnarc.org/pdf).
- (11) Boscato G, Russo S. "Experimental investigation on repair of RC pavements with SFRC". Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II. 2009, 1285-9.
- (12) Özcan DM, Bayraktar A, Sahin A, Haktanir T, Türker T. "Experimental and finite element analysis on the steel fiber-reinforced concrete (SFRC) beams ultimate behaviour". Construction and Building Materials 2009; 23.1064–77.
- (13) Zerbino R, Tobes JM, Bossio ME, Giaccio G. "On the orientation of fibres in structural members fabricated with selfcompacting fibre reinforced concrete". Cement Concrete Comp 34, 2012, 191-200.
- (14) Torrijos, MC, Barragán, B., Zerbino R. "Placing conditions, mesostructural characteristics and post-cracking response of fibre reinforced self-compacting concretes", Construction and Building Materials, V 24, 2010, pp 1078–1085.