

MACROFIBRAS SINTÉTICAS PARA EL REFUERZO DE HORMIGÓN

Giaccio, Graciela M., Bossio, María E., Monetti, Diego H., Morea, Francisco, Torrijos, María C., y 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. zerbino@ing.unlp.edu.ar

Resumen

Dentro del proyecto "Hormigón y desarrollo sustentable" 11/1146 se realizan estudios tendientes a la caracterización y aprovechamiento del Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) y en particular al uso de nuevas macrofibras sintéticas para la construcción civil. En este trabajo se muestran algunas de las líneas de investigación en marcha que incluyen estudios de la adherencia fibra-matriz, de la fluencia en flexión de elementos en estado fisurado sometidos a diferentes ciclos de cargas, y el uso de fibras para el refuerzo tipo overlay sobre sustratos de hormigón y de concreto asfáltico considerando la aplicación del HRF para la rehabilitación de caminos. En cada caso se describen las variables en estudio, se muestran algunos resultados comparando la respuesta del hormigón simple o reforzado con fibras de acero y se indican las conclusiones y líneas de trabajo futuro.

Palabras Claves: hormigón con fibras, fibras sintéticas, cargas de larga duración, reparaciones

Introducción

El Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) es un material de alta performance que posibilita la obtención de estructuras y elementos más durables así como la realización de reparaciones y refuerzos. Recientemente se han desarrollado macrofibras sintéticas para el refuerzo de morteros y hormigones que compiten con las tradicionales fibras de acero en muchas aplicaciones. Las macrofibras sintéticas se utilizan en losas sobre el piso (pavimentos y playas de estacionamiento, caminos, pisos domésticos, aplicaciones vinculadas con la agricultura, etc.), en hormigón proyectado y construcción in situ, revestimiento de túneles; muros y estructuras para contención de aguas, elementos premoldeados, tanques de almacenamiento, tuberías y paneles para viviendas.

Entre las necesidades de estudio aparece la de valorar su adherencia. El mecanismo de falla del HRF se basa en la resistencia al arrancamiento de las fibras. En las fibras de acero intervienen la des-adhesión fibra-matriz y la fricción por deslizamiento, pero el principal mecanismo es el entrecruzamiento mecánico generado por la conformación de la fibra. Naaman & Najm (1) estudiaron fibras de acero lisas y conformadas encontrando que en las fibras con gancho decrece la carga a medida que el gancho se endereza al deslizar. En general la carga de arrancamiento crece al disminuir la relación agua/cemento, pero este factor juega un rol menor en el mecanismo de des-adhesión (2,3). En matrices de muy alta resistencia la carga de arrancamiento crece con la resistencia de la matriz tanto para fibras lisas, con extremos planos o con ganchos, siempre que no rompan las fibras (4). Los estudios sobre la respuesta de macrofibras sintéticas son mucho más recientes y limitados; en comparación con las fibras de acero, se encontraron mayores desplazamientos para la carga pico y menores deslizamientos a mayor velocidad de carga (5). Existe gran variedad de macrofibras sintéticas (6-8).

La segunda línea de trabajo surge del hecho de que, aunque muchas veces se especifica un HRF con el propósito de mejorar la vida en servicio de las estructuras, la información existente sobre el comportamiento en el tiempo del HRF en estado fisurado es bastante limitada. Esto es particularmente de interés en el caso de las macrofibras sintéticas donde su respuesta diferida podría constituir un impedimento para su uso. Actualmente para la

caracterización mecánica y diseño estructural del HRF se emplea el concepto de tensión residual, que representa la capacidad portante del HRF cuando las fisuras han alcanzado determinada magnitud; ajustándose de este modo a diversas condiciones de servicio. La norma EN 14651 incluye cuatro tensiones residuales para aperturas de fisuras entre 0,5 y 3,5 mm (9) mientras que la norma ASTM C-1609 (10) define dos tensiones residuales que se calculan para flechas iguales a 1/600 y 1/150 de la distancia entre apoyos. Existen recomendaciones para el diseño estructural (11) donde se considera la posibilidad de fisuración en servicio pero no se toma en cuenta el comportamiento en el tiempo del material fisurado. Tampoco lo tienen en cuenta el ACI 360R-10 (12) ni el nuevo fib Model Code 2010 (13) que sólo indica que la performance a largo plazo del HRF podría estar afectada por las deformaciones diferidas. Por esto motivo se deben conocer las condiciones de estabilidad del HRF bajo cargas de larga duración en estado fisurado.

La tercera línea se refiere al uso de fibras para reparaciones y refuerzos. Los pavimentos de hormigón son estructuras propensas a la fisuración, tanto a edad temprana como en servicio, debido a su gran superficie expuesta y a las solicitaciones que reciben por acción del clima y las cargas del tránsito. La incorporación de fibras aparece como una de las mejores alternativas técnico-económicas para mejorar la performance del hormigón en virtud de la respuesta post-fisuración que le confiere al material. Además de nuevos pavimentos, una de las aplicaciones del HRF donde compiten las macrofibras sintéticas con las fibras de acero es la construcción de overlays tipo whitetopping sobre antiguos pavimentos (14). Las fibras permiten reducir el espesor del refuerzo y ejercen una acción de costura tanto sobre las juntas constructivas como sobre eventuales fisuras, incrementando la vida en servicio y prestaciones generales del pavimento (15). La respuesta del overlay está íntimamente ligada al nivel de adherencia con el sustrato.

Parte experimental

Se describe a continuación la metodología utilizada y las variables analizadas en cada línea de trabajo sobre macrofibras sintéticas; las acciones se desarrollan en forma conjunta entre el Depto de Construcciones y el LEMIT, complementando la disponibilidad de equipos.

Para estudiar la adherencia fibra-matriz se realizaron de ensayos de arrancamiento tipo pull-out, empleando probetas compuestas por una única fibra inserta en una matriz de mortero. La Figura 1 muestra las distintas fibras, las probetas utilizadas y detalles del desarrollo de un ensayo. Dentro del amplio programa experimental desarrollado se consideraron como variables el tipo de fibra, el nivel de resistencia de la matriz (mortero) y la presencia de daño en la matriz. Se seleccionaron seis macrofibras sintéticas (M1 a M6) y como referencia dos fibras de acero conformadas (S1 y S2) y la misma fibra S1 con el extremo cortado (S1c) de forma tal de anular el efecto de anclaje mecánico.

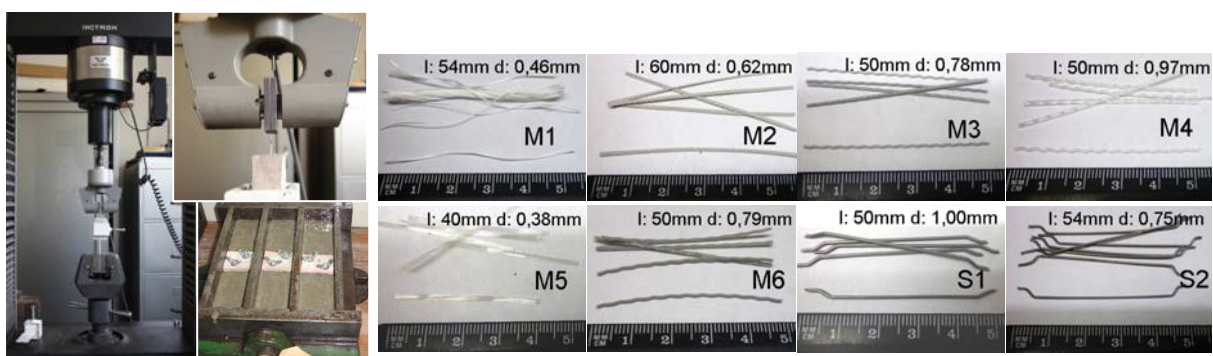


Figura 1. Ensayos de adherencia.

Se han desarrollado estudios de fluencia en flexión de HRF en estado fisurado sobre 4 HRF con respuestas postpico bien diferenciadas. El HRF A es un caso apropiado para pisos industriales con un postpico con endurecimiento; el HRF B es apto para reparación o refuerzo de elementos estructurales, aquí luego de la primera fisura existe una caída progresiva de la capacidad portante; el HRF C es una mezcla con una mínima capacidad residual que podría usarse para el control de fisuras por retracción y el HRF D es un ejemplo típico de HRF para refuerzos de pavimentos tipo whitetopping. Los HRF A y B incorporaron 60 y 25 kg/m³ de fibras de acero conformadas de 50 mm de longitud y 0,75 mm de diámetro, los HRF C y D contenían 2,1 y 3 kg/m³ de diferentes macrofibras sintéticas de 50 mm de largo. La Figura 2 muestra las curvas tensión - apertura de fisura obtenidas en ensayos de flexión realizados según EN 14651 (9), para facilitar la comparación entre los HRF la tensión se expresa como porcentaje de la carga de primera fisura.

Para estudiar distintos niveles de daño (tamaño de fisuras) se utilizan vigas entalladas que se cargan en flexión en tres puntos mediante un sistema servo-hidráulico con control por lazo cerrado que utiliza la señal de un clip gage ubicado a ambos lados de la entalla, deteniendo el ensayo para aperturas entre 0,2 y 1,5 mm. Las vigas fisuradas se colocan en pórticos y se someten a diferentes regimenes de carga: cargas permanentes, eventos de carga y descarga, y cargas lentas progresivas. Para medir el crecimiento de la apertura de fisura (COD) se fijan planchuelas a ambos lados de la fisura ubicando un reloj comparador en uno de los extremos. A las vigas que permanecen estables transcurridos varios meses bajo cargas sostenidas se las carga en forma rápida hasta la rotura, a fin de determinar su capacidad de carga remanente. La Figura 3 muestra el montaje de los ensayos de fluencia.

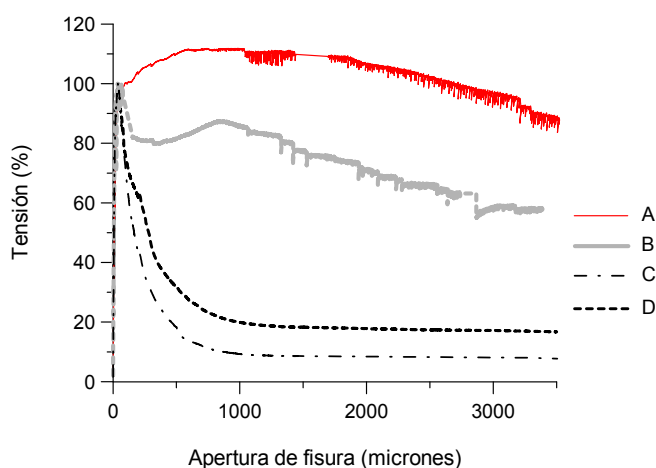


Figura 2. Curvas tensión – apertura de fisura obtenidas en ensayos de flexión bajo cargas rápidas de los HRF seleccionados.



Figura 3. Disposición de las vigas durante el desarrollo de los ensayos de fluencia en estado fisurado.

Considerando la aplicación del HRF para la rehabilitación de caminos se está analizando la respuesta mecánica de probetas compuestas sustrato-overlay sometidas a ensayos de flexión. Para localizar la falla se realiza una entalladura en el HRF midiendo la apertura de fisura mediante un extensómetro tipo clip gage, al mismo tiempo se registran las deflexiones y se observa el desarrollo de fisuras en la interfaz sustrato-overlay. Se analizan refuerzos de hormigones con fibras sintéticas y de acero, en diferentes contenidos, aplicados tanto sobre sustratos de concreto asfáltico como de hormigón simple. Se trataron las superficies del sustrato asfáltico a fin de modificar el grado de adherencia. Asimismo en sustratos de hormigón se eliminó la adherencia overlay-sustrato mediante un film plástico (Figura 4).

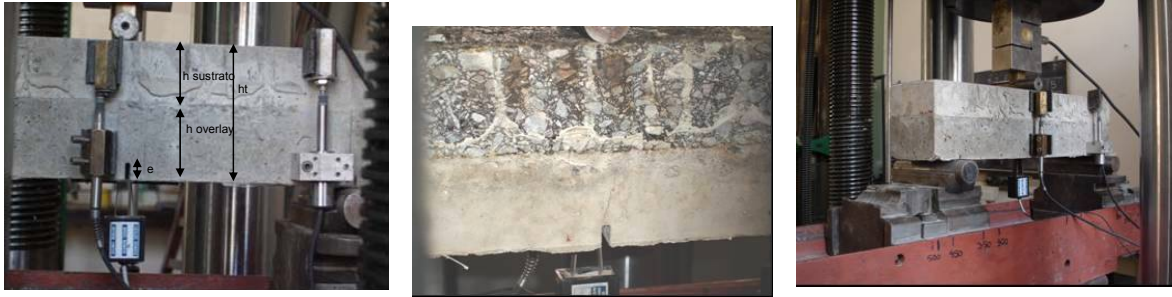


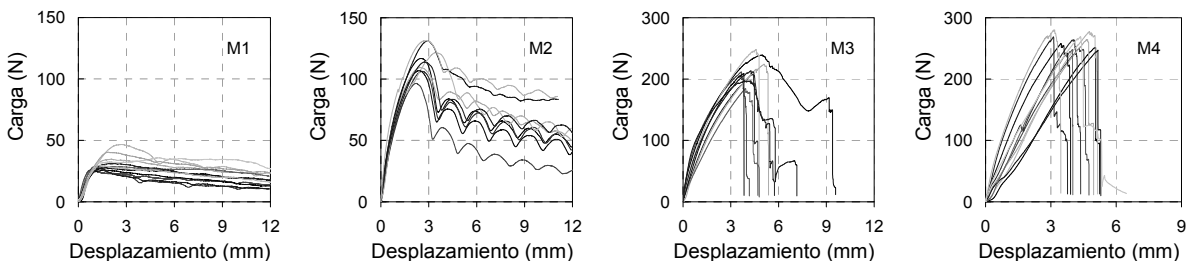
Figura 4. Ensayo de flexión sobre prismas compuestos sustrato-overlay.

Resultados y discusión

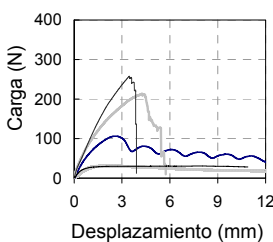
- Adherencia de macrofibras sintéticas

La Figura 5.a muestra respuestas carga-desplazamiento obtenidas en ensayos de distintas fibras, las curvas varían significativamente conforme las fibras analizadas. La Figura 5.b muestra la variación de la adherencia con la resistencia a compresión de la matriz. Con las fibras S1 y S2 existe un importante incremento de adherencia a medida que crece la resistencia de la matriz. En el caso de S1c (fibra de acero sin gancho) y M4 (macrofibra ondulada) el incremento de adherencia es moderado mientras que con las otras fibras sintéticas sólo se observan ganancias muy pequeñas de resistencia al arrancamiento cuando aumenta la resistencia del mortero. Mayores detalles se presentan en (16).

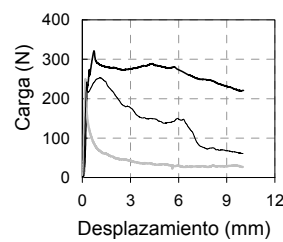
a.- Fibras sintéticas



a.- Fibras sintéticas



a.- Fibras de acero



b.-

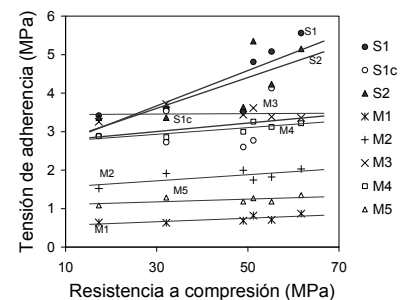


Figura 5. a) Respuestas carga-desplazamiento obtenidas en ensayos de arrancamiento de diferentes fibras; b) variación de la adherencia con la resistencia de la matriz.

- Respuesta bajo cargas de larga duración de HRF en estado fisurado

La Figura 6 muestra algunas de las respuestas observadas indicando la tensión aplicada y la evolución de la apertura de fisura (mayores detalles se presentan en (17)). Analizando las condiciones de estabilidad surge que:

- Con fibras de acero y postpico con endurecimiento (HRF A) la respuesta es estable si las cargas permanentes son menores al 80 % de f_{R4} y las fisuras preexistentes poseen anchos menores a 1 mm. Los eventos de carga y descarga provocan un crecimiento continuo de la apertura de fisura dependiendo los anchos remanentes del nivel de sollicitación aplicado. Incluso vigas con daños importantes (fisuras mayores a 1 mm) conservan su capacidad portante manifestando la estabilidad del HRF bajo cargas de larga duración. En el caso del hormigón sin endurecimiento (HRF B) el comportamiento fue similar, pero las respuestas estables se dieron para menores niveles de esfuerzo. La capacidad de carga decrece a mayor fisuración inicial y los eventos de carga-descarga generan un crecimiento continuo de COD y mayor ancho de fisura comparado con el HRF con endurecimiento. Aquí se recomienda que los esfuerzos no superen 50 % de f_{R4} .
- Con fibras sintéticas y muy baja capacidad residual (HRF C) se observó gran crecimiento del COD para bajos esfuerzos y gran influencia de los eventos de carga-descarga. La fisura preexistente resulta determinante, a diferencia de las fibras de acero donde para aperturas iniciales de 0,2 y 0,5 mm no se observaban mayores diferencias.
- Con macrofibras sintéticas (HRF D), una capacidad residual del orden del 20 % de la carga de fisuración del hormigón de base y un nivel de fisura inicial pequeño (0,2 mm), fue posible sobrellevar esfuerzos hasta un 70 % de f_{R4} , incluso frente a eventos de carga-descarga. La respuesta diferida disminuye notablemente para fisuras > 2 mm.

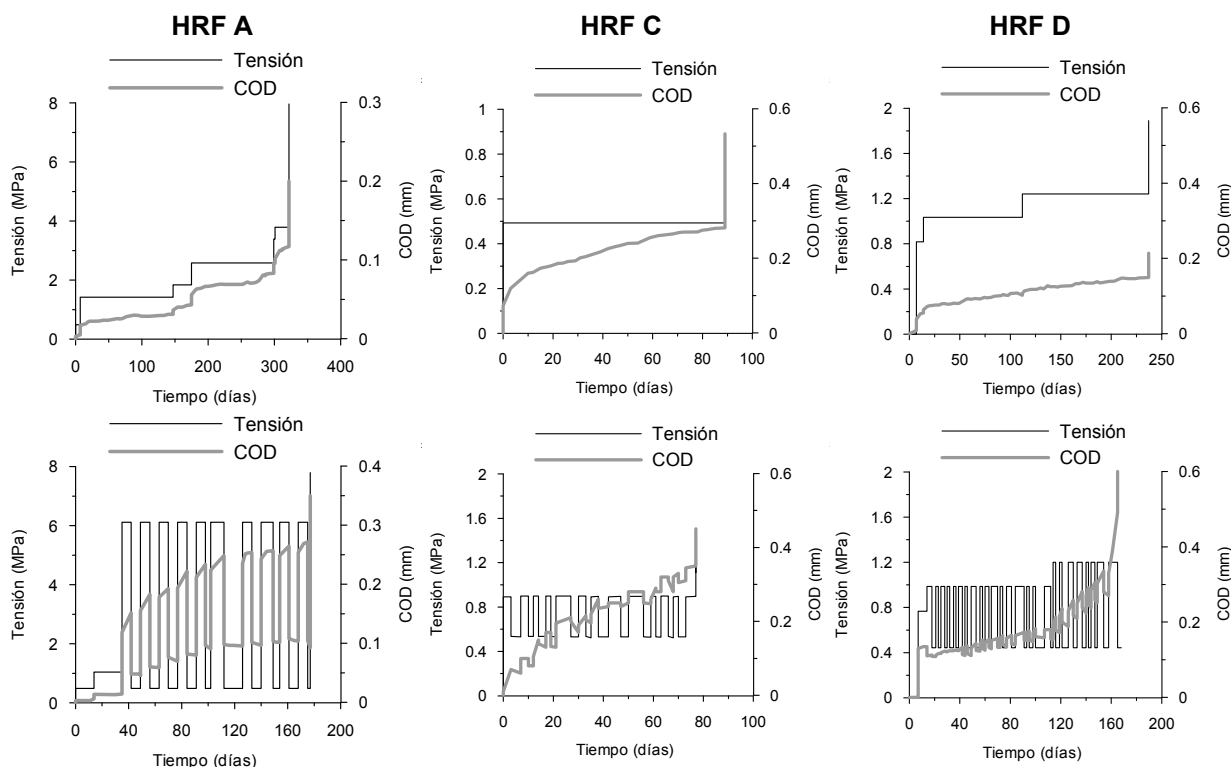


Figura 6. Ejemplos de ensayos realizados en diferentes HRF.

Los casos seleccionados cubren distintos tipos de HRF, dado que hay fibras diferentes, las conclusiones deben asociarse al tipo de postpico y no al tipo y contenido de fibras utilizado.

- Respuesta de probetas compuestas, refuerzos tipo overlay

La Figura 7 presenta algunos resultados recientes que comparan un sustrato de hormigón reforzado con un overlay de hormigón simple (B) y otro con fibras (F), y un concreto asfáltico con adherencia normal y modificada (e: escarificado) sobre el que se aplicaron overlays sin fibras (B), con fibras sintéticas (S) y con fibras de acero (A).

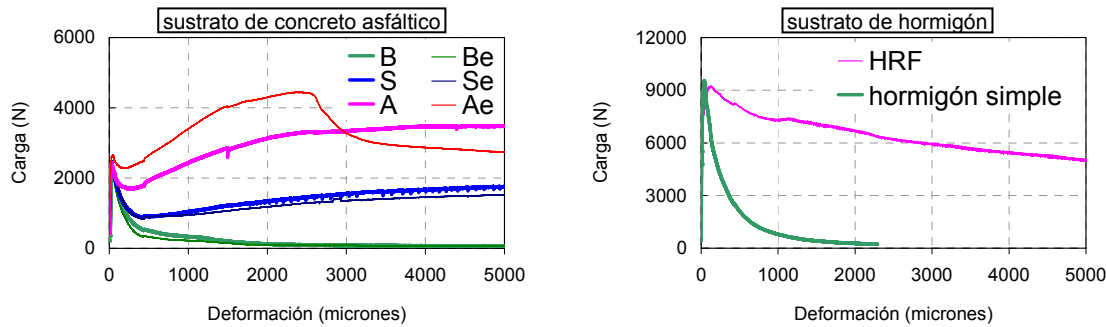


Figura 7. Curvas carga deformación en compuestos overlay – sustrato.

Conclusiones

Entre las conclusiones sobre el uso de macrofibras sintéticas se destacan las siguientes.

- Los niveles de adherencia de las macrofibras sintéticas oscilan entre 3 y 0,6 MPa. A diferencia de las fibras de acero conformadas, ante el aumento de la resistencia de la matriz los cambios de adherencia son pequeños.
- El nivel de fisuración inicial hace decrecer significativamente la respuesta diferida, en especial con las macrofibras sintéticas. Los eventos de carga-descarga incrementan las aperturas pero esto no incide en gran medida sobre las condiciones de estabilidad.
- Los estudios sobre compuestos overlay-sustrato muestran claramente la contribución de diferentes fibras en la capacidad residual.

Bibliografía

1. Naaman A., Najm H. 1991. Bond-slip mechanisms of steel fibers in concrete. *ACI Mat J* 88 (2): 135–145.
2. Chanvillard G., Aïtcin P. 1996. Pullout behavior of corrugated steel fibers. *Adv Cem Based Mat* 4: 28-41.
3. Markovich I., van Mier JG, Walraven J. 2001. Single fiber pullout from hybrid fiber reinforced concrete. *Heron* 26 (3).
4. Abu-Lebdeh T, Hamoush S, Heard W, Zornig B. 2011 Effect of matrix strength on pullout behavior of steel fiber reinforced very-high strength concrete composites. *Cons Build Mat* 25: 39–46.
5. Sandbakk, S., Døssland A. L., Kanstad, T. 2007. Pull-out testing of different fibre types. In *Nordic Concrete Federation, Workshop proc no. 6: FRC, Trondheim, November 15th, 2007: 23-32.*
6. Kaufmann J., Lubben J, Schwitter E. 2007. Mechanical reinforcement of concrete with bi-component fibers. *Composites: Part A*. 38: 1975–1984
7. Boshoff, W. P., Mechtcherine, V., van Zijl, G. P. A. G. 2009. Characterising the time-dependant behaviour on the single fibre level of SHCC. *Cem Concr Res* 39: 779–786.
8. Tagnit-Hamou A, Vanhove Y, Petrov N. 2005. Microstructural analysis of the bond mechanism between polyolefin fibers and cement pastes. *Cem Concr Res* 35: 364-370.
9. EN 14651:2005, Test method for metallic fibered concrete - measuring the flexural tensile strength CEN - European Committee for Standardization, Brussels, 2005, 1-17.
10. ASTM C 1609/C 1609M–07. Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading), *ASTM Standards, Vol.04.02, 2007.*
11. RILEM TC 162-TDF, Test and design methods for steel fiber reinforced concrete, σ - ϵ design method *Mater Struct V36, N262, 2003, 560-567.*
12. ACI 360R-10 Guide to Design of Slabs-on-Ground. ACI Committee 360, 2010.
13. fib Model Code 2010, First Complete Draft. Vol I, 318 p. *Int Fed of Structural Concrete, 2010.*
14. Miguez Passada D, González A, Violini D, Pappalardi M. Zerbino R. “Desarrollo e implementación de un hormigón reforzado con fibras sintéticas para la repavimentación de la ruta 24 de Uruguay”. 19 R. *Técnica AATH, 2012, Argentina. ISBN 978-987-21660-6-9, pp. 311-318.*
15. Bordelon AC, Roesler JR. Design with fiber-reinforcement for thin concrete overlays bonded to asphalt. *ASCE J of Transp Eng*, 2012.138:430-435.
16. Bossio, M.E., Giaccio, G., Torrijos, M.C. y Zerbino, R. Evaluación de la resistencia al arrancamiento de macrofibras sintéticas. 19 R. *Técnica AATH, 2012, Argentina.. 487-494.*
17. Monetti, D.H., Giaccio, G. y Zerbino, R. Efecto de eventos de carga y descarga en la respuesta de elementos fisurados de hormigón reforzado con fibras, 19 RT *AATH 2012, Argentina. pp.295-302.*