

Uso de macrofibras sintéticas en hormigón

RAÚL ZERBINO³³

Introducción: planteo del problema

El hormigón representa uno de los materiales más utilizados por el ser humano en todo el mundo. Entre los materiales que emplea la ingeniería civil se destaca por varias cualidades, es capaz de resistir la acción del agua sin un serio deterioro y permite moldear elementos estructurales con gran variedad de formas y tamaños; no menos importante es que representa el material más económico y rápidamente disponible en las obras y que comparado con otros materiales requiere menores insumos de energía, y finalmente puede incorporar grandes cantidades de desperdicios o subproductos, lo que considerando aspectos ecológicos, lo hará cada vez más atractivo en el futuro.

Sin embargo, el hormigón que es un material frágil, o si se quiere cuasifrágil, se caracteriza por contener microfisuras y en ocasiones fisuras en su interior, lo que constituye un aspecto determinante de la respuesta de los elementos estructurales. Las fisuras se producen no sólo por acción de las cargas, sino que el mismo desarrollo del proceso de hidratación del cemento genera cambios de volumen que se intensi-

fican con el secado (contracción) o los saltos térmicos pueden dar lugar a la aparición de micro o macrofisuras ante las restricciones externas. A la vez la exposición a altas temperaturas o el desarrollo de reacciones deletéreas pueden generar niveles de fisuración aún mayores.

Las micro y macrofisuras preexistentes poseen una incidencia directa en el mecanismo de rotura del material. No menos importante es que tales fisuras adquieren un rol determinante sobre la durabilidad de las estructuras de hormigón, tanto en elementos simples como armados.

¿Por qué incorporar fibras?

Desde la antigüedad se emplearon diferentes tipos de fibras en materiales frágiles, como fibras de vegetales para reforzar la arcilla cocida o cabellos de animales en morteros de albañilería. La misma naturaleza nos brinda ejemplos de materiales reforzados con fibras a través de elementos simples como un nido de hornero. En muchos materiales de ingeniería se incorporan fibras para reforzar diversas matrices como resinas poliéster, epoxi, metálicas y cerámicas; los materiales a base de cemento portland también se deben incluir es esta lista.

Al incorporar fibras que aportan resistencia a tracción dentro de una matriz frágil de un compuesto como el hormigón, se genera una substancial mejora de la capacidad de carga post-fisuración. La Figura 108 muestra el efecto sobre la respuesta tensión de tracción-deformación de la incorporación de dosis crecientes de fibras en el hormigón. Cuando no hay fibras, una vez alcanzada la carga pico se genera rápidamente una fisura y decrece abruptamente la capacidad de carga. Ya una pequeña dosis de fibras provoca que, aunque prácticamente no crece la carga máxima, aparezca lo que se conoce como “capacidad residual”, esto es, durante el post pico el material mantiene capacidad de transferir esfuerzos a medida que se deforma. A lo largo de este proceso, que en general se concentra en una fisura

principal, se produce el arrancamiento de las fibras. En el caso de que la cantidad de fibras (o su efectividad) sea mayor se puede producir un mecanismo de fisuración múltiple durante el cual se van generando fallas de adherencia y puede incluso crecer la capacidad de carga hasta un punto a partir del cual predomina el arrancamiento de las fibras y decrece la capacidad residual, pero ya con deformaciones (y tamaño de fisuras) substancialmente mayores. A medida que avanza el proceso descrito, crece la apertura de fisuras pudiendo alcanzar varios milímetros. Cuando las fibras dan lugar a un incremento de la capacidad de carga luego del primer pico, tal respuesta se conoce como “post pico con endurecimiento”.

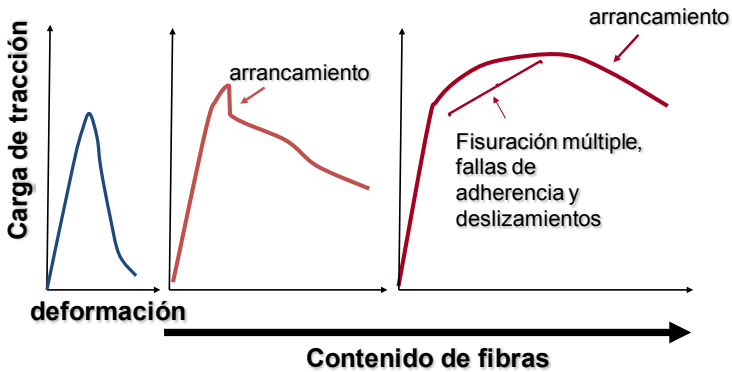


Figura 108. Influencia de la incorporación de volúmenes crecientes de fibras en la respuesta carga-deformación en tracción de un hormigón de cemento portland. Elaboración propia.

Como se verá más adelante las propiedades mecánicas que confieren las fibras al hormigón se valoran habitualmente a partir de ensayos de flexión donde se registra la curva carga-desplazamiento (o carga-apertura de fisura que es similar). El área bajo la curva es representativa de la capacidad residual y del incremento en tenacidad que genera el refuerzo. A medida que el refuerzo es más efectivo, sea por mejora en el material de la fibra, por su mayor adherencia o

mayor aspecto geométrico (relación longitud/diámetro), o por haber incorporado mayor volumen de refuerzo, mayores serán los beneficios alcanzados.

En síntesis, el efecto de incorporar fibras redundante directamente en el control de los procesos de fisuración a que puede estar sometido el hormigón, lo que provoca fundamentalmente incrementos en tenacidad y capacidad residual post pico, en menor medida en la resistencia a tracción y prácticamente no modifica la resistencia a compresión. Al mismo tiempo las fibras inciden directamente en el control de los efectos que provoca la contracción en las estructuras de hormigón, evitando la aparición de fisuras o minimizando su espesor o generando un cuadro de fisuración múltiple.

Tipos de fibras para refuerzo de morteros y hormigones, y sus aplicaciones

A lo largo del siglo XX se han empleado en materiales a base de cemento portland distintos tipos de fibras que incluyen fibras de acero, vidrio, carbón, polipropileno, polietileno, acrílicas, naturales, etc. Entre ellas las más utilizadas fueron las de acero, pero en los últimos 10 o 15 años se producen avances muy importantes en el campo de las fibras sintéticas que se pueden incorporar al hormigón. En efecto, hasta entonces las fibras sintéticas servían principalmente para controlar la fisuración del hormigón fresco. A medida que se desarrollaron fibras poliméricas de mayor resistencia, adherencia y en especial mayor rigidez, comenzaron a constituir una alternativa para algunas aplicaciones donde la acción de las fibras se produce en el hormigón en estado endurecido, las cuales antes estaban limitadas a las fibras de acero. Estas fibras sintéticas “estructurales” hoy las conocemos por macrofibras sintéticas y su variedad, campos de aplicación y eficiencia crecen en forma constante.

En la actualidad se diferencian y destacan los siguientes tipos de fibras para uso en hormigón:

Fibras de acero: Existen fibras de acero con diversas resistencias y capacidades de deformación (alargamientos). Poseen variadas formas y tamaños, en general se prefieren secciones variables y onduladas sea en toda su longitud o sólo en sus extremidades, a fin de aumentar el anclaje mecánico. El contenido empleado en hormigón oscila entre 20 y 100 kg/m³. Estas fibras se emplean en losas sobre el piso (pisos industriales, caminos, aeropuertos y *overlays*), losas sobre pilas o columnas, en ocasiones pueden permitir el reemplazo parcial o total de armaduras convencionales en muros; fundaciones de casas, muros de seguridad ante impactos. También se utilizan en elementos premoldeados, segmentos para túneles, tanques de almacenamiento de aguas o tuberías (formas, fatiga, durabilidad), en hormigón proyectado para revestimiento de túneles o estabilizado de taludes, en refuerzos y reparaciones y en estructuras expuestas a impactos y explosiones. También existen fibras de acero mucho más pequeñas y delgadas destinadas al refuerzo de matrices de muy alta resistencia (Concrete Society, 2007a).

Microfibras sintéticas: Hace muchos años que se emplean fibras sintéticas, en general de polipropileno, para usos no estructurales. Aparecieron como una alternativa para los productos tradicionalmente elaborados con asbesto-cemento como placas delgadas, tanques, revestimientos, etc. En hormigón, el uso de micro fibras (con diámetros menores a 0,3 mm y una longitud del orden de 10 mm) se orienta principalmente a reducir o controlar la fisuración en estado fresco por ejemplo para atenuar los efectos de la contracción plástica. También se han utilizado en hormigón proyectado para estabilización de rocas, canales y reparaciones de hormigón deteriorado. Otra aplicación son las estructuras expuestas a altas temperaturas o incendios donde el uso de fibras sintéticas permite eliminar o minimizar los riesgos de estallido o desprendimiento del material. En general las dosis empleadas son bajas y próximas a unos 0,6 kg/m³.

Macrofibras sintéticas: En la última década se han desarrollado fibras sintéticas de mayor rigidez (módulo de elasticidad cercano a 10 GPa) que permiten la transferencia de esfuerzos en el hormigón endurecido una vez que se produce una fisura. Existe una gran variedad de macrofibras disponibles y se utilizan en dosis que suelen variar entre 2 y 8 kg/m³. Compiten con las fibras de acero en aplicaciones donde es admisible cierta apertura de fisuras y no se requiere un post pico con “endurecimiento”. En este caso pueden ser incluso más eficientes que las de acero; y además no se degradan por efecto de la corrosión. Entre las aplicaciones destacadas de las macrofibras sintéticas se destacan las losas sobre el piso, como la construcción de pavimentos y playas de estacionamiento donde se destacan las mejoras que generan en zonas expuestas a sales descongelantes, caminos, pisos y el refuerzo de losas de apoyo de las vías de trenes donde no aparecen los efectos magnéticos que pueden provocar el refuerzo con acero. También se emplean mucho en hormigón proyectado para la construcción de túneles y obras de minería; donde pueden reemplazar y ser convenientes que las de fibras de acero por su resistencia a los ambientes agresivos y porque generan menor desgaste en los equipos. En cuanto a construcción *in situ* además del revestimiento de túneles, aparecen aplicaciones en ambiente marino, muros en general y estructuras para contención de aguas. Finalmente se han utilizado en premoldeados como baldosones para veredas, tanques, tuberías y paneles para viviendas, donde su facilidad para reforzar elementos de formas variadas, su resistencia a la fatiga y las mejoras en durabilidad aparecen como las principales motivaciones para su elección (Concrete Society, 2007b) (Figura 109).



*Figura 109. Macrofibras sintéticas para el refuerzo de hormigones.
Elaboración propia.*

Microfibras y macrofibras de vidrio: También desde hace tiempo existen microfibras de vidrio resistentes a los álcalis del cemento para el refuerzo de morteros. Actualmente se utilizan en dosis entre 0,3 y 0,6 kg/m³ para el refuerzo de hormigones en aplicaciones similares a las citadas para las microfibras sintéticas. Además, así como existen macrofibras sintéticas, más recientemente se han desarrollado macrofibras de vidrio para el refuerzo del hormigón, que se emplean en dosis entre 5 y 15 kg/m³. Dichas fibras aparecen como soluciones estructurales para viviendas en aplicaciones como losas sobre el piso, pisos ahuecados y cubiertas autonivelantes, a modo de ejemplo se han empleado exitosamente en reparaciones de autopistas en Alemania, reemplazando mallas de armadura convencionales.

Cabe destacar que no es correcto plantear el uso de fibras para reemplazar en forma directa todos los casos de uso de armaduras convencionales, sino que existen elementos estructurales donde el uso de fibras es particularmente beneficioso. Entre ellos se destacan las losas sobre el piso, los premoldeados, estructuras sometidas a acciones dinámicas o expuestas a procesos de contracción. Sin embargo, se pueden mencionar ciertas ventajas que pueden motivar la elección del hormigón reforzado con fibras (HRF) frente al hormigón armado convencional como la reducción en los costos de suministro y ahorro de tiempos de obra para la ubicación de las barras convencionales soldadas, beneficios de salud y seguridad en los operarios durante el manipuleo del refuerzo, la solución de problemas derivados de de-

fectos en la ubicación del refuerzo y los aumentos en la ductilidad o tenacidad estructural. Es importante agregar que, así como existen recomendaciones específicas para tomar en cuenta la contribución de las fibras en pisos industriales (TR 34, 2003), en la última versión del código modelo del *fib* se han incluido recomendaciones específicas para el cálculo estructural de hormigones con fibras (Féd. Int. du Béton, 2010)

Aplicación de macrofibras sintéticas en la reparación y refuerzo de obras viales

Además de lo antes comentado, se destaca el uso de macrofibras sintéticas para el refuerzo y reparación de obras viales, en particular la aplicación de *overlays* también conocido como *whitetopping*. A modo de ejemplo cabe citar que en el *Illinois Center for Transportation* se realizaron experiencias para desarrollar un criterio de diseño de este tipo de *overlays* (Bordelon y Roesler, 2011; Federal Highway Administration, 2008). De dicho trabajo surge que, a modo de ejemplo, para un mismo nivel de tránsito, el uso de macrofibras permite reducir los espesores de *overlay* de 15 a 10 cm para juntas separadas 1,80 m o de 10 a 7,5 cm si las juntas se realizan cada 1,20 m.

La Figura 110 muestra imágenes de una iniciativa pionera en la región basada en el uso de hormigones con macrofibras sintéticas: la construcción de un *whitetopping* para la reparación y refuerzo de la Ruta 24 en la República Oriental del Uruguay (Miguez Passada *et al.*, 2012).



Figura 110. Empleo de macrofibras sintéticas en un whitetopping adherido empleado para la reparación y refuerzo de la ruta 24 en la República Oriental del Uruguay. Elaboración propia.

Caracterización mecánica de hormigones con fibras

Un aspecto singular en el uso y aplicación de los HRF es valorar su respuesta post fisuración, esto es la capacidad de carga que imparten las fibras cuando se supera la resistencia a tracción del hormigón. La misma se realiza en la mayoría de los casos mediante ensayos de flexión sobre vigas y en ocasiones a partir del ensayo de paneles. Dichos ensayos resultan decisivos al momento de seleccionar el tipo y dosis de fibra a emplear y a partir de los mismos se obtienen los parámetros de diseño. Por tal motivo resulta de interés una breve síntesis de los ensayos más utilizados y los parámetros de caracterización mecánica obtenidos a partir de ellos.

Durante años se han discutido y desarrollado los métodos y criterios de caracterización de la tenacidad y capacidad residual del HRF. En muchos países se han elaborado normas de ensayo que utilizan básicamente el ensayo de flexión y difieren principalmente en los parámetros obtenidos y su forma de cálculo. Como medidas de la tenacidad se han utilizado índices adimensionales basados en la energía, medidas absolutas de la capacidad de absorción de energía, índices adimensionales basados en la resistencia, y los conceptos de resistencia equivalente y resistencia residual.

En la actualidad existe consenso acerca de que el ensayo de caracterización de un HRF debe realizarse en forma estable durante el post pico; las normativas más recientes adoptan un sistema de control de deformaciones por lazo cerrado, utilizando las medidas de flecha o de la apertura de fisura como señal de control. Entre los métodos existentes se destacan la norma japonesa JCI-SF4 (1984) y la norma ASTM C-1609 (2007) que, al igual que muchas otras, utilizan una configuración de carga en cuatro puntos y la norma europea EN14651/05 (2005) que emplea vigas con una entalladura en la zona traccionada y aplica la carga al centro de la luz. La Figura 111 muestra la configuración de carga y los dispositivos de ensayo para realizar las dos primeras, entre los que se destaca un marco de carga requerido para fijar los extensómetros que miden la flecha evitando de este modo el registro de deformaciones espurias en los apoyos. En cuanto a los parámetros obtenidos del ensayo en todos los casos se informe la tensión correspondiente al primer pico de carga y, en el caso que durante el post pico se alcance una carga mayor, la tensión máxima resultante. Para caracterizar la capacidad residual la norma japonesa calcula la tenacidad (TJCI) como área bajo la curva hasta una deformación límite (de 3 mm igual a 1/150 de la luz de ensayo) y en base a la misma calcula una resistencia equivalente (R_e) que representa el esfuerzo promedio que resistió la viga durante el postpico ($R_e = TJCI \text{ luz} / (d_{\text{limit}} \cdot bd^2)$). Por su parte la norma ASTM C-1609 valora la capacidad postpico en términos de “resistencia residual”, la misma

representa la tensión nominal de flexión que puede sobrellevar la viga fisurada para determinadas deformaciones, y calcula dos resistencias residuales (f_{600}^D y f_{150}^D) para flechas iguales $L/600$ y $L/150$ donde L , en general 450 mm, es la luz de ensayo.

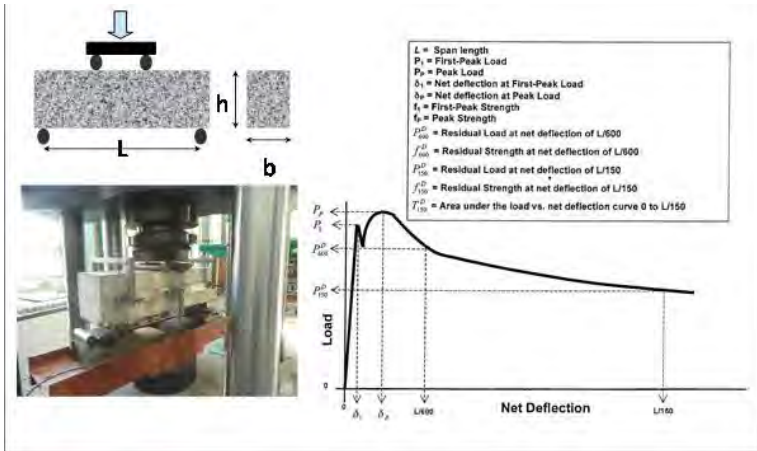


Figura 111. Configuración de carga y dispositivos en ensayos de flexión con cargas a los tercios. A la derecha parámetros obtenidos según la norma ASTM C-1609. Elaboración propia.

La Figura 112 muestra la configuración de carga y los dispositivos utilizados en un ensayo sobre vigas entalladas tal como lo propone la norma EN14651/05. En este caso, aunque también podría medirse la flecha utilizando un marco de carga similar al antes presentado, es posible simplificar notablemente el procedimiento de ensayo en base al registro de la apertura de fisura (*Crack Mouth Opening Displacement CMOD*) mediante un extensómetro tipo *clip gage* ubicado en la entalladura. Durante el post pico existe una relación lineal entre la deformación del CMOD y la flecha al centro de la viga. La norma EN14651/05 además de calcular la tensión de primera fisura (f_L) a partir de la carga de primer pico, define como parámetros residuales cuatro resistencias residuales f_{R1} , f_{R2} , f_{R3} , f_{R4} correspondientes a aperturas de fisura de 0,5, 1,5, 2,5 y 3,5 mm.

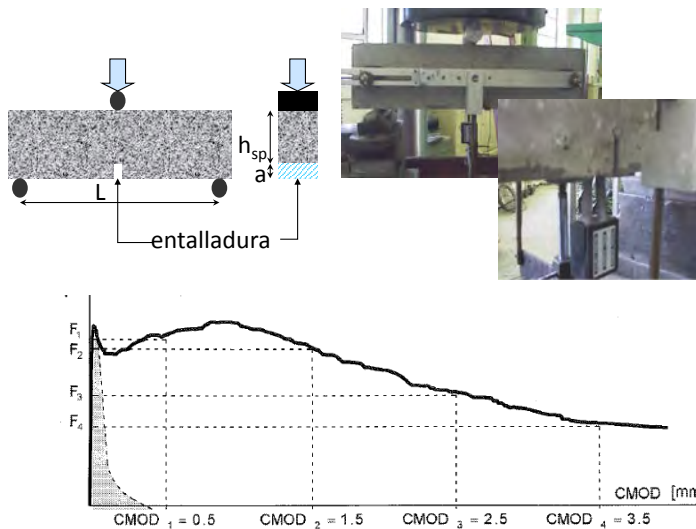


Figura 112. Ensayos de flexión sobre vigas entalladas (EN 14651).
Elaboración propia.

La Figura 113 muestra resultados de ensayos de flexión correspondientes a un hormigón con una resistencia media a compresión de 45 MPa al que se le incorporaron $3,8 \text{ kg/m}^3$ de macrofibras sintéticas. Es posible observar que la capacidad residual que provocan las fibras está directamente relacionada, además del tipo utilizado, con la cantidad de fibras que atraviesan las superficies de fractura y ejercen esa acción de costura y transferencia de esfuerzos. A modo de referencia se indica el número de fibras contado sobre la superficie de fractura una vez finalizado cada ensayo. Cabe comentar que en este caso por ejemplo se superan los niveles requeridos para uso en *overlays* tipo *whitetopping* como los establecidos para la Ruta 24 en Uruguay (Miguez Passada *et al.*, 2012), donde se requería para la

resistencia residual f_{150}^D un mínimo del 20% de la tensión de primera fisura. Conforme la norma japonesa en esa viga se obtuvo una resistencia equivalente de 1,2 MPa. A la derecha de la figura se muestra uno de los resultados de ensayo sobre vigas entalladas, se aprecia que en este caso se alcanzan tensiones residuales del orden de 1 MPa.

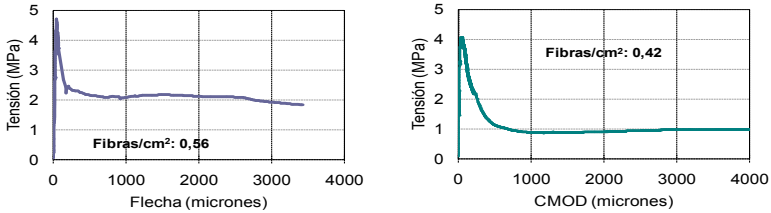


Figura 113. Ensayos de flexión de HRF reforzado con 3,8 kg/m³ de macrofibras sintéticas. Izquierda: según ASTM C-1609; derecha: según EN 14651. Elaboración propia.

Además de estos métodos, se suelen emplear ensayos sobre paneles para caracterizar la tenacidad y capacidad residual del HRF, en especial en el caso de hormigón proyectado. Entre ellos aparecen el panel apoyado en 3 puntos que indica la norma ASTM C 1550 y el panel apoyado en todo el borde propuesto por las recomendaciones de EFNARC. La Figura 114 muestra resultados obtenidos en base a este último ensayo sobre el mismo hormigón reforzado con macrofibras sintéticas antes presentado.

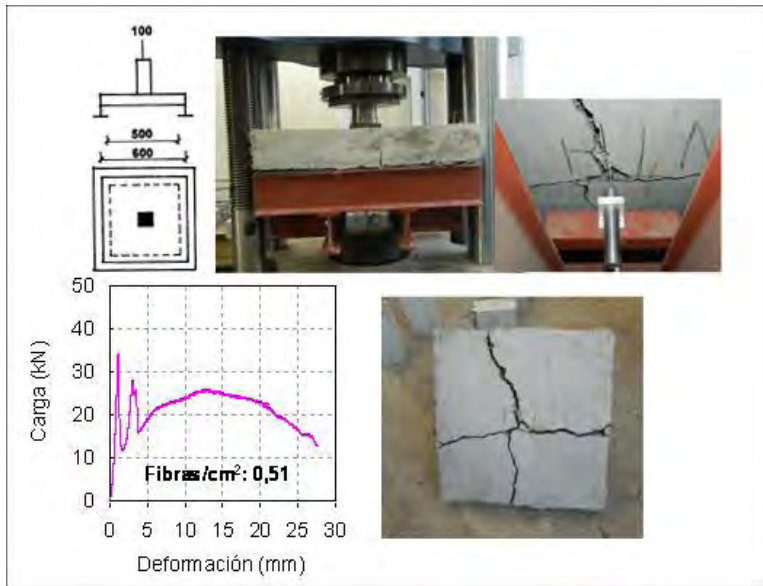


Figura 114. Ensayo de un panel reforzado con 3,8 kg/m³ de macrofibras sintéticas. Elaboración propia.

Necesidades y desafíos actuales

Antes de concluir es interesante remarcar cuáles son las necesidades y desafíos actuales en el tema de hormigones con fibras. Se han realizado avances muy importantes tanto en el desarrollo de los métodos y criterios de caracterización disponiéndose además de ensayos específicos de tracción directa y de corte que tienen en cuenta la capacidad post pico, como así también si existe el conocimiento suficiente para la elaboración del HRF.

Los avances generados hacen que en la actualidad resulte de interés el estudio y caracterización de nuevas fibras, particularmente de las numerosas variantes de macrofibras sintéticas que van mejorando

sus propiedades en forma permanente, y el desarrollo de criterios de diseño estructural con las mismas.

Otro aspecto refiere a la obtención, caracterización y aplicación de nuevos HRF, entre ellos se destacan los hormigones autocompactantes reforzados con fibras (HACRF) que han abierto nuevas posibilidades de aplicación al material.

Un tercer campo de interés lo constituye el estudio de la respuesta del HRF en estado fisurado. En efecto, si bien hay muchísima información relacionada con la caracterización mecánica de hormigones reforzados con diferentes fibras y su uso, se plantea la mayoría de las veces para controlar la propagación de fisuras, son contados los trabajos que informan acerca de la respuesta del HRF una vez que se han iniciado las fisuras. Este punto, que es de importancia para todo tipo de fibras, crece en interés en el caso de las macrofibras sintéticas.

Finalmente, ante los avances comentados en HRF que incluyen la caracterización a nivel material, el desarrollo de criterios de diseño y el conocimiento para la elaboración de mezclas, un área urgente requerida para un mayor y extendido empleo de estos sin duda hormigones de altas prestaciones, es la necesidad de desarrollar pruebas a escala real (*full-scale*) a partir de las cuales se pueda recomendar el uso de fibras en situaciones aún más audaces.

Conclusión

El HRF ofrece ventajas frente a muchos problemas que aparecen durante la construcción y vida en servicio de las estructuras. Su uso permite reducir espesores y, gracias al efecto costura, mantener en servicio elementos fisurados que en otros casos habrían acabado su vida útil.

Las fibras dan lugar a un material de altas prestaciones, incluso pueden obtenerse HACRF que ofrecen particulares ventajas para la realización de reparaciones y refuerzos.

Recientemente se han desarrollado y aplicado numerosos tipos de macrofibras sintéticas. Entre las aplicaciones destacadas del hormigón con macrofibras sintéticas aparece el refuerzo de pavimentos y pisos industriales, donde no sólo mejora la durabilidad, sino que posibilita mayor confort al usuario y menor mantenimiento. Se verifica que el HRF, aún con baja resistencia residual, es eficaz para el control de fisuras.

Bibliografía

- ASTM C 1609/C 1609M-07, (2007), “Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using beam with Third-Point Loading)”, ASTM Standards, Vol.04.02.
- Bordelon, A. C., and Roesler, J. R. (2011), “Design with Fiber-Reinforcement for Thin Concrete Overlays Bonded to Asphalt”. *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 2012.138:430-435.
- Concrete Society (2007a), “Guidance for the Design of Steel-Fibre-Reinforced Concrete”, A cement and concrete industry publication, Technical Report N°63, March 2007.
- Concrete Society (2007b), “Guidance on the use of Macro-synthetic-fibre-reinforced Concrete”, A cement and concrete industry publication, Technical Report N°65, April 2007.
- EN 14651 (2005): Test method for metallic fibered concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual), 18p.
- Féd. Int. du Béton (2010), *fib Model Code 2010*, Vol 1 y 2, ISBN: 978-2-88394-095-6 y 978-2-88394-096-3.
- Federal Highway Administration (2008), Design and Concrete Material Requirements for Ultra-Thin Whitetopping, Publication N° FHWA-ICT-08-016, USA, June 2008.

- JSCE-SF4, Part III (1–4,) (1984). Method of Tests for Steel Fiber Reinforced Concrete, Concrete Library of JSCE, The Japan Society of Civil Engineers
- Miguez Passada, D., González, A., Violini, D., Pappalardi, M. y Zerbino, R. (2012) “Desarrollo e implementación de un hormigón reforzado con fibras sintéticas para la repavimentación de la ruta 24 de Uruguay”. En V Congreso Internacional; 19 Reunión Técnica AATH, 2012, Bahía Blanca, Argentina., pp. 311-318.
- TR 34 (2003), Concrete Industrial Ground floors: A Guide to Design and Construction, The Concrete Society, England.