

# EL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS Y SUS PROYECCIONES DENTRO DE LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN

## *Raúl Zerbino*

Ingeniero Civil y Doctor en Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP). Especialista en Tecnología del hormigón.

Profesor Asociado Ordinario Facultad de Ingeniería UNLP, Investigador Principal del CONICET



## Resumen

El Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) es un material de alta performance que se destaca por su capacidad de controlar la formación y propagación de fisuras y por su mayor tenacidad, lo que redundará en mejoras en la vida en servicio de las construcciones. Si bien hace más de cuatro décadas que se conoce al HRF, en los últimos años se realizaron grandes avances en la materia que abren enormes perspectivas para su mayor aprovechamiento en la ingeniería, los cuales son puntualizados brevemente en este artículo.

## Introducción

El hormigón es el material más utilizado en el mundo en infraestructura y construcciones civiles ya que posee cualidades destacadas como capacidad de resistir la acción del agua sin un serio deterioro, aptitud para moldear elementos con gran variedad de formas y tamaños y el hecho de que es económico y rápidamente disponible en las obras. Por ser un material frágil o cuasifrágil, es habitual incorporar barras de acero en los elementos estructurales para sobrellevar los esfuerzos de tracción, siendo el hormigón armado y el hormigón pretensado los casos más conocidos.

Desde tiempos ancestrales se han utilizado diversas fibras para reforzar materiales frágiles, como fibras vegetales en arcilla cocida o de pelos de animales en morteros de albañilería. En la actualidad se incorporan fibras a matrices cerámicas, epoxídicas y plásticas, entre otras tantas, a fin de mejorar la performance del material. Existen muchos compuestos con fibras a base de cemento portland.

El Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) constituye un hormigón de alta performance donde la incorporación de fibras cortas dispersas en su matriz confiere propiedades destacables como una importante resistencia residual que controla la formación y propagación de fisuras, dando lugar a un material con mayor tenacidad lo que redundará en mejoras en su vida en servicio [1].

El uso del HRF en la industria de la construcción data de los años '70 del siglo pasado. La construcción de losas sobre suelo, en particular los pisos industriales, constituye una de las aplicaciones tradicionales y relevantes del HRF donde la introducción de fibras permite mayor espaciado de juntas, disminución de espesores, la construcción sobre sustratos de menor calidad y la posibilidad de reemplazar las barras de acero convencionales. Todo esto genera no sólo en reducciones de costos de ejecución, simplificación de tareas mantenimiento y reparación, sino un mejor comportamiento general del piso y aumento de su vida en servicio, favoreciendo un mejor aprovechamiento de los recursos naturales.

Otras aplicaciones sobre las que existen abundantes antecedentes, tienen que ver con la incorporación de fibras al hormigón proyectado para estabilizado de taludes o la construcción de revestimientos de túneles; en estos el HRF permite reemplazar total o parcialmente a las barras de armadura convencional, lo que reduce las operaciones de montaje, posee efectos positivos sobre el control de la contracción y permite sobrellevar esfuerzos específicos durante las etapas constructivas. En los últimos años se suma en el caso de túneles, tanto para conducción de aguas o transporte vial o ferroviario, la fabricación de dovelas premoldeadas, principalmente en soluciones híbridas que combinan fibras y barras convencionales, donde el HRF confiere ventajas técnicas y en especial durante las etapas de fabricación, acopio y posicionamiento definitivo de los segmentos.

Hace décadas se reconoce que la adición de fibras al hormigón brinda ventajas en dichas y otras tantas aplicaciones como elementos expuestos a cargas dinámicas o en aquellos donde fuera menester controlar la fisuración. Sin embargo, por la inexistencia de recomendaciones de cálculo estructural, el uso de HRF estuvo por mucho tiempo limitado ya que debía ser proyectado en base a experiencias previas, prueba y error o recomendaciones particulares de cada productor de fibras.

La buena noticia es que en el presente siglo se realizaron grandes avances en la materia que abren enormes perspectivas para un mayor aprovechamiento del HRF en la industria de la construcción, los que se comentarán en forma somera en este trabajo.

## Perspectivas para un mayor aprovechamiento del HRF

Entre los avances recientes aparece el haber incorporado criterios de diseño para HRF en códigos y reglamentos de varios países, lo que ha permitido, y permitirá aún más, expandir su campo de aplicación. En la actualidad se dispone de tales herramientas, destacándose la incorporación de capítulos específicos sobre HRF en el *fib Model Code 2010* [2] publicado en 2012; el mismo considera el aporte de las fibras en diferentes elementos estructurales, tanto los fabricados solo con HRF como el uso combinado de fibras con armadura convencional. Respecto a este último caso, resalta el empleo de fibras para sobrellevar esfuerzos de corte o para controlar las aberturas de fisuras con sus potenciales efectos en la mejora en la durabilidad de las estructuras de hormigón armado.

El mayor bagaje de experiencias en las que se basó el *fib Model Code 2010* corresponde a fibras de acero. A lo largo de más de 40 años se han fabricado fibras de acero con diversas formas, tamaños y configuraciones geométricas para aumentar su efectividad. Se consigna el uso de fibras de acero en pisos industriales, caminos, aeropuertos, losas sobre columnas, para reemplazo de armaduras secundarias en muros; fundaciones de casas, premoldeados, tanques de almacenamiento de aguas o tuberías, hormigón proyectado, refuerzos y reparaciones y en estructuras expuestas a impactos y explosiones. A partir de los años '90 y en particular en los últimos años se fabricaron fibras de acero de alto carbono para refuerzo de hormigones de alta resistencia [1, 3]. Recientemente se han desarrollado microfibras de acero que posibilitaron la obtención de los llamados Compuestos de Ultra Alta Resistencia a base de cemento portland (con resistencia a compresión mayor a 150 MPa) aptos para realizar capas de refuerzo o protección y/o aplicaciones específicas (ver Figura 1a).

Ya en el siglo pasado se empleaban microfibras sintéticas para mejorar las propiedades del hormigón fresco como su cohesión o la prevención de la contracción plástica, o la resistencia al fuego del hormigón, pero las mismas no conferirían capacidad estructural al hormigón. Un hito relevante en la primera década del siglo XXI fue el desarrollo de fibras sintéticas con mayor rigidez (módulo de elasticidad cercano a 10 GPa) que permiten en el hormigón endurecido transferir esfuerzos a través de las fisuras. Estas fibras poliméricas representan una alternativa respecto a las de acero y se han impuesto en muchas aplicaciones. Hoy se denominan microfibras sintéticas y poseen una geometría comparable a las de acero. Existen cientos de fibras poliméricas. Las más usuales se obtienen en base a polipropileno estirado, pero las hay de polivinilo alcohol, poliéster o poliolefinas, entre otras; se han desarrollado fibras monofilamento, multifilamento, bicomponentes (ver Figura 1b) ajustando su geometría y conformación superficial para optimizar sus efectos en el hormigón fresco y endurecido. Entre sus aplicaciones resaltan la construcción de pavimentos y playas de estacionamiento, pisos industriales, hormigón proyectado en túneles y obras de minería; donde tienen ventajas por su resis-



Figura 1. Existe una amplia variedad de fibras para uso en hormigón. Figura 1 a (arriba) Fibras de acero: dosis típicas en hormigón entre 20 y 80 kg/m<sup>3</sup>; en las microfibras que se usan para compuestos de ultra alta resistencia en dosis entre 80 y 300 kg/m<sup>3</sup>. Figura 1 b (centro) macrofibras sintéticas, dosis típicas entre 2 y 8 kg/m<sup>3</sup>. Figura 1 c (abajo) macrofibras de vidrio (diámetro equivalente 0,30 a 0,60 mm, longitud 24 a 36 mm), dosis típicas entre 5 y 15 kg/m<sup>3</sup>.

tencia a ambientes agresivos y por generar menor desgaste en los equipos. Se consignan, además, aplicaciones en ambiente marino, muros y estructuras para contención de aguas; baldosones para veredas, tanques y tuberías y paneles para viviendas [1, 4]

Aunque también hace tiempo existían microfibras de vidrio para el refuerzo de morteros, en la última década se sumó la aparición de macrofibras de vidrio resistente a los álcalis (Figura 1c) que también confieren resistencia residual al hormigón endurecido y representan alternativas para varias aplicaciones, entre las que se destacan las losas sobre el suelo, pisos ahuecados, cubiertas autonivelantes o elementos estructurales que deben funcionar sin fisuras [1]. Tal vez la última innovación en fibras no metálicas sea el desarrollo de las macrofibras de Polímero Reforzado con Fibra de Vidrio, que aportan una resistencia residual que las hace aptas para un número mucho mayor de aplicaciones estructurales.

Al día de hoy se ha acumulado mucha experiencia y se reconoce que empleando buenas prácticas constructivas no debieran encontrarse grandes dificultades para elaborar un HRF. Diversos documentos ofrecen pautas para el diseño de mezclas, elaboración, caracterización en estado fresco y control de calidad del HRF. Elaborar un HRF ya no representa un gran desafío, pero ante la gran variedad de fibras no sorprende que las propiedades estructurales pueden ser sumamente variables. Las fibras también pueden incorporarse a hormigones autocompactables los cuales ofrecen particulares ventajas para la realización de reparaciones y refuerzos [1].

Por lo expuesto en el párrafo precedente, un hito fundamental para el mayor aprovechamiento del HRF ha sido haber consensuado criterios en cuanto a los métodos de caracterización y los parámetros que surgen de los mismos para aplicación en el diseño estructural, básicamente el concepto de *capacidad residual*. En el próximo apartado se describirán sucintamente las normas más utilizadas y la forma de determinación de la capacidad residual, la cual es, básicamente, la valoración del aporte de las fibras en el control de la propagación de las fisuras en hormigón endurecido. Lo más relevante en cuando al diseño es que ya no se especifican o consideran por separado las características o propiedades de las fibras en sí mismas, sino que se tiene en cuenta la performance del compuesto, esto es, el HRF. Esto, que no se contraponen a que existen recientes normativas para fibras para hormigón [5-7], representa un avance trascendente.

### Conceptos básicos de funcionamiento y valoración de la performance del HRF

Al incorporar fibras en la matriz del hormigón se genera una substancial mejora de la capacidad postfisuración. La Figura 2 muestra cómo se modifica la respuesta tensión de tracción – deformación al incorporar dosis crecientes de fibras. En el hormigón sin fibras una vez alcanzada la carga máxima se genera rápidamente una fisura y decrece abruptamente la capacidad portante. Una baja dosis de fibras adecuadas provoca que, aunque prácticamente no crezca la carga máxima, el material gane cierta *capacidad* postfisuración para transferir esfuerzos a medida que se deforma. Durante este proceso, que en general se concentra en una

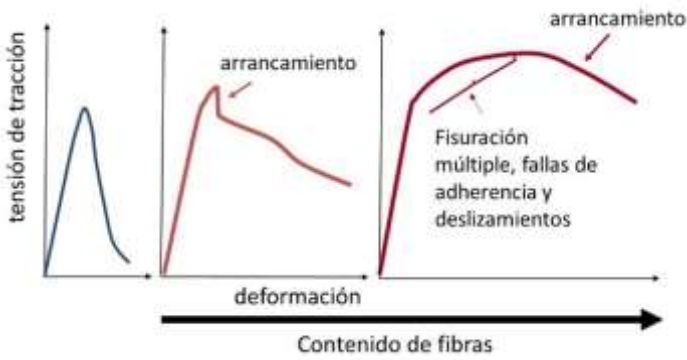


Figura 2. Efecto del contenido de fibras en la respuesta a tracción del hormigón.

fisura principal, se produce el arrancamiento de las fibras. En caso que la cantidad de fibras (o su efectividad) sea mayor se puede producir una fisuración múltiple e incluso crecer la capacidad de carga hasta un punto a partir del cual vuelve a predominar el arrancamiento de las fibras y decrece la capacidad residual, pero ya con deformaciones (y tamaño de fisuras) substancialmente mayores, pudiendo alcanzar varios milímetros.

Durante décadas se fueron generando, proponiendo y discutiendo las bondades y debilidades de diversos métodos y parámetros para valorar el aporte de las fibras. Hoy, luego de muchos años, existe consenso en valorar la capacidad postfisuración en términos de *tensiones residuales*. El adoptar parámetros para el cálculo en términos de tensiones ha simplificado notablemente su aplicación al diseño en relación a otras alternativas como índices o valores de tenacidad. Tal resistencia residual es la tensión calculada a partir de la carga medida en un ensayo de flexión para una dada apertura de fisura, considerando la sección nominal (como

si no estuviera fisurada). Las normas actuales de mayor aceptación son la EN 14651 [8] y la ASTM C1609 [9] que fueron elaboradas hace relativamente poco tiempo; básicamente se realiza un ensayo de flexión sobre el HRF y se calcula la capacidad residual a diferentes aperturas de fisura o flechas. La norma EN 14651 calcula 4 tensiones residuales a diferentes aperturas de la boca de fisura (CMOD) pero las que más se emplean son las resistencias residuales  $f_{R1}$  y  $f_{R3}$  que se calculan para CMOD iguales a 0,5 mm y 2,5 mm respectivamente. Por su parte siguiendo una filosofía similar, la norma ASTM C1609 calcula como principales resultados las tensiones residuales  $f_{600}$  y  $f_{150}$  que corresponden a flechas iguales a 1/600 o 1/150 de la luz de ensayo. El uso de diferentes deformaciones, que implica diferentes anchos de fisuras, se asocia con las condiciones frente a las cuales será empleado el HRF, esto es, si se diseña para Estado Límite de Servicio o Estado Límite Último. Cabe agregar que también existen otros procedimientos para evaluar la tenacidad del HRF entre los que resaltan ensayos de flexión sobre diferentes tipos de paneles.

El avance en los criterios de diseño estructural permite superar la disyuntiva al momento de seleccionar entre la enorme cantidad de tipos de fibras disponibles y, llegado este punto, cabe reiterar otro concepto, lo importante no es la valoración de la fibra individual sino la evaluación y/o especificación de la performance del compuesto. En este sentido, el *fib Model Code 2010* establece Clases de HRF (más allá del tipo o contenido de fibras) a partir de las tensiones  $f_{R1}$  y  $f_{R3}$  del ensayo según la norma EN 14651.

Es importante indicar un concepto adicional. La respuesta postfisuración no depende solo del tipo y contenido de fibras sino también del tipo de solicitación (ver Figura 3). Un HRF que posee un postpico decreciente en tracción directa (denominado *softening*), cuando se somete a esfuerzos de flexión en prismas puede dar lugar a una respuesta similar o a un postpico que inicialmente crezca (*hardening*); y aún más, un HRF con *softening* en un ensayo de flexión sobre

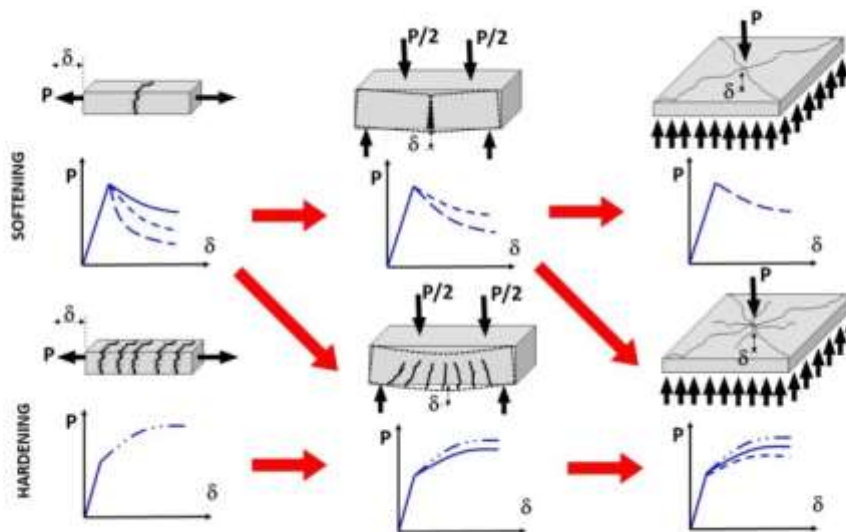


Figura 3:

Respuestas de diferentes elementos estructurales realizados con HRF con postpicos tipo softening o hardening (adaptado del fib Model Code 2010)

prismas (el habitualmente empleado para clasificar HRF), puede dar lugar a postpicos tipo *softening* o tipo *hardening* al ensayar losas del mismo material. Esto ocurre porque una vez producida la primera fisura, las fibras pueden brindar suficiente capacidad de transferencia de carga para que el elemento, aún fisurado, continúe trabajando como un todo. Por ello los HRF resultan especialmente ventajosos en aplicaciones sobre elementos estructuralmente redundantes, como las losas sobre el suelo, donde existe una alta posibilidad de redistribución de esfuerzos.

En síntesis, hoy en día existen muchas alternativas de fibras para uso en hormigón, se han desarrollado criterios de diseño de mezclas, y recomendaciones para el manejo y control del hormigón fresco, como así también nuevas normas para la caracterización y clasificación en estado endurecido. El gran desafío es, apoyados en los grandes avances de los últimos años aquí puntualizados, aprovechar en mayor medida al HRF y abordar nuevas y creativas aplicaciones.

### Sobre las aplicaciones

Los avances indicados (criterios de diseño estructural y desarrollo de fibras más eficientes) han abierto la puerta a nuevas e interesantes aplicaciones. Las fibras permiten reparar y reforzar pavimentos sobre diferentes sustratos mediante capas de refuerzo (overlays), se pueden combinar con armaduras convencionales aportando a la resistencia al corte permitiendo eliminar en forma total o parcial armaduras secundarias, y también resultan eficaces para el control de fisuras en servicio, contribuyendo al aumento de la durabilidad y vida útil de las estructuras. Al mismo tiempo el HRF es un material con notable capacidad para sobrellevar acciones extremas como sismos, explosiones, presiones localizadas o impactos. Cabe aclarar que no es correcto plantear el uso de fibras para reemplazar en forma directa todos los casos donde se emplean armadura convencional, sino que existen elementos estructurales donde el uso de fibras es particularmente beneficioso.

Además de las recomendaciones generales mencionadas, se han actualizado y mejorado muchas propuestas y recomendaciones para aplicaciones específicas entre las que se destacan las orientadas al diseño de pisos industriales, de pavimentos en general, de refuerzos tipo overlay sobre sustratos de concreto asfáltico o hormigón [10-16]. También ha habido mucho trabajo orientado al desarrollo de modelos numéricos para HRF [1].

### Consideración final

El HRF ofrece fantásticas posibilidades para la realización de diversos tipos de obras entre las que se destacan las losas sobre el suelo, los revestimientos de muros y túneles, premoldeados, estructuras expuestas a acciones extremas y elementos de contención o conducción de agua. También aparecen interesantes ventajas en el uso de HRF combinado con armaduras convencionales o para la realización de capas de refuerzo. Las fibras proveen soluciones frente a muchos problemas que aparecen durante la construcción y vida en servicio de las estructuras, su uso permite reducir espesores, simplificar procesos constructivos y mantener en servicio elementos fisurados que en otros casos habrían acabado su vida útil.

En lo que va del presente siglo, se han realizado enormes avances en la materia que abren enormes perspectivas para un mayor aprovechamiento del HRF. Entre ellos se destacan el desarrollo de nuevos tipos de fibras, la adopción de nuevas normas para valorar la performance del compuesto (el HRF) en términos de tensiones residuales y la incorporación de guías y recomendaciones para el diseño estructural.

Para finalizar cabe indicar que tales avances motivaron la reciente publicación de un libro por parte de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón [1]. A fin de proveer a los distintos actores un panorama general y actualizado, el mismo aborda los tipos de fibras, la caracterización a nivel material, los avances en cálculo estructural tanto de diversas recomendaciones como en la aplicación de métodos numéricos; a todo esto se suman numerosos ejemplos de aplicaciones a escala real que permiten comprender las motivaciones y ventajas resultantes del uso de HRF en ingeniería civil. Asimismo, es interesante alertar que en el próximo IX Congreso Internacional y 23ª Reunión Técnica de la AATH, a realizarse en noviembre 2020, varios conferencistas y autores darán cuenta de novedades al respecto.

### Referencias

- [1] Zerbino R. (2020) *Hormigón Reforzado con Fibras*, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 344 p.
- [2] fib Model Code 2010 (2012) – Final draft. fib CEB-FIP bulletin 65-66. *Fédération Internationale du Béton, Switzerland.*
- [3] Concrete Society, *Guidance for the Design of Steel-Fibre-Reinforced Concrete*, A cement and concrete industry publication, Technical Report N°63, March 2007.
- [4] Concrete Society, *Guidance on the use of Macro-synthetic-fibre-reinforced Concrete*, A cement and concrete industry publication, Technical Report N°65, April 2007.
- [5] EN 14889-1 (2006) *Fibres for concrete - Part 1: Steel fibres - Definitions, specifications and conformity*. European Standards, Belgium.
- [6] EN 14889-2 (2006) *Fibres for concrete - Part 2: Polymer fibres - Definitions, specifications and conformity*. European Standards, Belgium.
- [7] UNE 83516 (2015) *Fibras para hormigón - Fibras de vidrio resistentes a los álcalis - Definiciones, clasificación y especificaciones*
- [8] EN 14651 (2005) *Test method for metallic fibre concrete-Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOF), residual)*. European Standards, Belgium.
- [9] ASTM C1609/C1609M (2010) *Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)*. American Society for Testing and Materials, USA.
- [10] Concrete Society (2013), *Technical Report 34 Concrete Industrial Ground Floors- A Guide to Design and Construction*.
- [11] ACI 360R-10 (2010) *Guide to Design of Slabs on Ground*.
- [12] Bordelon AC, Roesler JR. (2012). *Design with Fiber-Reinforcement for Thin Concrete Overlays Bonded to Asphalt*. *ASCE Journal of Transportation Engineering* 138:430-435.
- [13] Federal Highway Administration (2008) *Design and Concrete Material Requirements for Ultra-Thin Whitetopping*, Publication FHWA-ICT-08-016, USA.
- [14] ACI 544.7R-16 (2016) *Report on Design and Construction of Fiber Reinforced Precast Concrete Tunnel Segments*.
- [15] fib Bulletin 83 (2017) *Precast Tunnel Segments in Fibre-Reinforced Concrete*.
- [16] ACI 544.4R-18 (2018) *Guide to Design with Fiber Reinforced Concrete*.