

Cómo decidir la fibra idónea

Charles Allen – Director, Tunnelling Ltd, London

Traducción: Bekaert - Industrias del Ubierna, S.A.

El hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) para aplicación en obras subterráneas se ha venido utilizando desde hace tres décadas en hormigones proyectados y desde hace aproximadamente dos décadas en dovelas de túnel.

Debido al crecimiento de la aplicación de hormigón proyectado reforzado con fibras de acero (HPRFA) que se desarrolló en el sector de la obra subterránea, varios fabricantes se introdujeron en el mercado, presentando diseños con una variedad de fibras de acero para escoger y especificar. Al principio, las especificaciones de refuerzo con fibras de acero eran a menudo básicas y preceptivas, especificando únicamente una serie de dosificaciones por m³ de hormigón, ignorando factores tales como características de rechazo, resistencia a tracción y aspecto de la fibra.

En el transcurso de los años, cuando se adquirió mayor conocimiento acerca del comportamiento de las fibras de acero en el hormigón, las especificaciones de rendimiento se volvieron más relevantes y se empezaron a desarrollar nuevos métodos de ensayo para controlar y medir el rendimiento. Hacia finales de 1990 empezó a ser más fácil para los calculistas especificar fibras de acero para utilizar tanto en hormigones proyectados como en dovelas de túnel. Sin embargo, durante este mismo período, se empezaron a introducir una serie de fibras sintéticas en el mercado de la construcción de obras subterráneas. Se trataba de fibras macrosintéticas y microsintéticas, generalmente fabricadas a partir de poliolefinas, pero más concretamente de polipropileno. El primero se utilizaba para mejorar el comportamiento del hormigón en incendios, reduciendo considerablemente el resquebrajamiento y el segundo para comportamiento estructural, en competencia con las fibras de acero.

Así que hoy hay un cierto grado de confusión en el mercado acerca del tipo

genérico de fibra que el calculista debe escoger. Cada tipo de fibra tiene sus propias características y aplicaciones adecuadas (6) pero aquí nos centraremos en su utilización para fines estructurales en hormigón proyectado y dovelas prefabricadas de hormigón para estructuras de obras subterráneas de ingeniería civil, tales como túneles y soterramientos.

Rendimiento de las Fibras Estructurales

Los principales parámetros del hormigón reforzado con fibra (HRF) que guardan relación con el diseño de la lamina de sostenimiento del túnel, son la capacidad de absorber el momento flector, resistencia a tracción indirecta, resistencia a flexión (y residual a flexión) y valores de ductilidad (o tenacidad).

En el transcurso de los años se han desarrollado muchos métodos de ensayo para medir y determinar el comportamiento del HRF. Estos incluyen ensayos de viga, ensayos de placa circular y cuadrada y, más recientemente, ensayo de doble punzonado (o Barcelona). El factor común de cada uno de estos ensayos es la medida de la capacidad del HRF para continuar soportando y llevando la carga después de que la matriz de hormigón se haya fisurado. Esto es, en efecto, la esencia del comportamiento del HRF.

Tras la primera fisura de la matriz de hormigón, las fuerzas de tracción se redistribuyen a las fibras, que actúan de puente en la fisura. Si el HRF continua soportando la carga a medida que más fisuras se propagan y

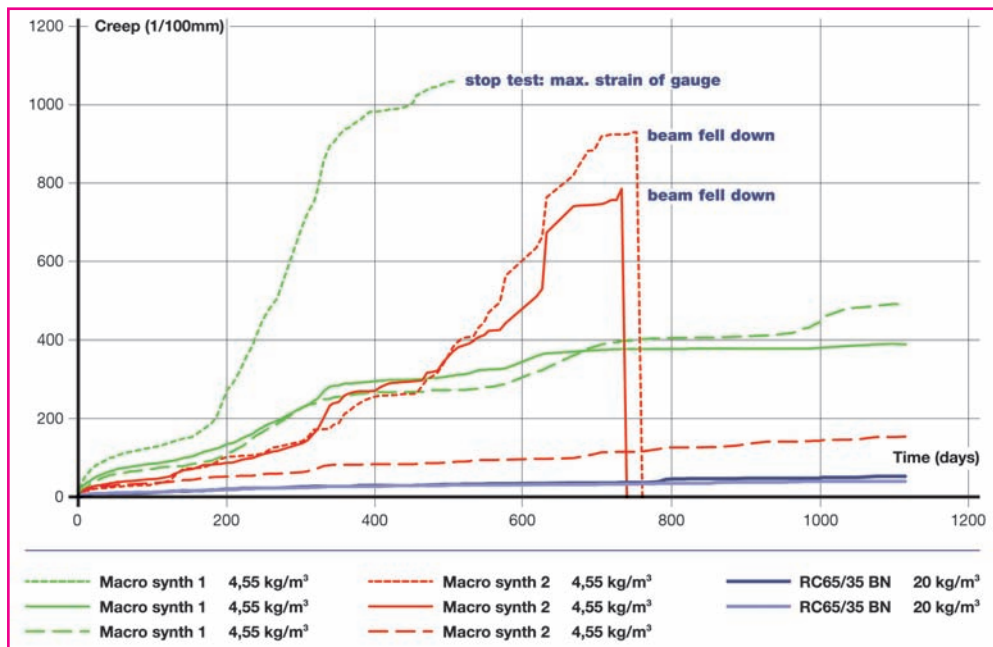


Fig. 1 – Fluencia a largo plazo (deformación en 1/100 mm) versus tiempo (días) [Lambrechts 2005]

tiene lugar la deformación, entonces es fácil entender que la fluencia de las fibras es un parámetro muy importante.

Fibras Macrosintéticas comparadas con Fibras de Acero

Hay un gran número de fibras macrosintéticas disponibles en el mercado, fabricadas de una variedad de polímeros orgánicos y de diferentes geometrías. El módulo de elasticidad del acero es de aproximadamente 200 GPa, mientras que el de las fibras macrosintéticas oscila generalmente entre 2 y 10 GPa. Además de requerir mayor esfuerzo para alcanzar un nivel similar de resistencia, las fibras macrosintéticas, al igual que el hormigón, presentan un comportamiento elasto-plástico inherente bajo carga, por lo que es fácil llegar a la conclusión que las fibras macrosintéticas presentarán unas características de fluencia mayor que las fibras de acero bajo una carga sostenida.

Debido a la significativamente más baja rigidez de las fibras sintéticas en comparación con las fibras de acero, es inevitable que el tamaño de las fisuras en el HRF sintéticas sea mayor que en el HRF de acero, siendo las cargas y las condiciones iguales.

En estructuras de obras subterráneas de ingeniería civil, es muy aconsejable mantener deformaciones del sostenimiento y

consecuentemente, el ancho de las fisuras a un mínimo absoluto. En las aplicaciones de soporte de minas, donde son aceptables y previsibles deformaciones muy altas (y anchos de fisura), las fibras macrosintéticas pueden utilizarse e incluso tener ventajas sobre las fibras de acero en hormigón proyectado. Dichas fibras se han utilizado de forma extensiva en los niveles más profundos de las minas en Australia y Sudáfrica.

No obstante, vale la pena comentar aquí que, en el 2000, Bernard, la empresa que desarrollo el ensayo de panel circular para HRF, sugirió que “el acero sería el material a elegir para las aplicaciones que requieren un máximo de ancho de fisura muy pequeño, siendo las fibras sintéticas más adecuadas para altos niveles de deformación”.⁽¹⁾

Hay que reconocer que las fibras sintéticas pueden haber mejorado su rendimiento desde entonces, pero los ensayos de viga comparativos de tenacidad efectuados más recientemente para dovelas por Ratcliffe⁽²⁾, muestran que incluso las altas dosificaciones de fibras macrosintéticas tienen niveles de tenacidad a pequeñas deformaciones que son inferiores a los de las dosificaciones moderadas de fibras de acero (**Fig. 2**).

Las curvas en la Fig. 2 indican una característica de gran robustez y resistencia de las fibras de acero a bajas deformaciones, mientras que las fibras macrosintéticas muestran un debilitamiento de la resistencia. Esto significa que, una vez la matriz de hormigón

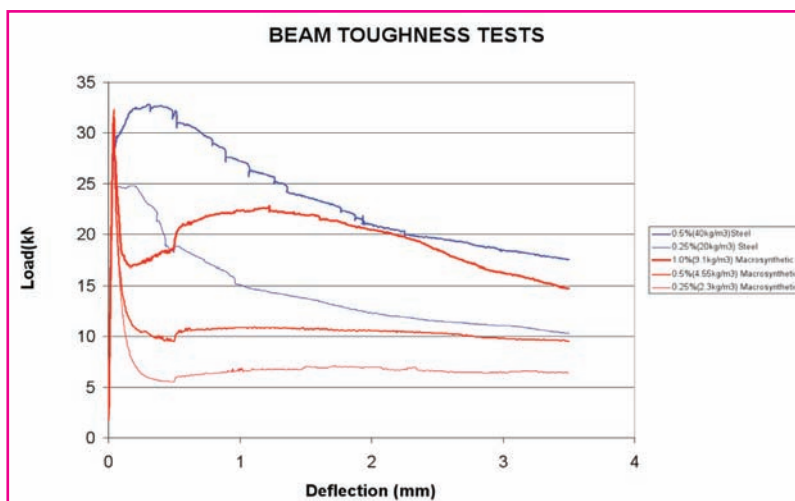


Fig. 2 – Ensayos de viga comparativos de tenacidad [Ratcliffe]

se ha fisurado, las cargas de tracción se redistribuyen y quedan absorbidas por las fibras de acero más rápidamente que por las fibras macrosintéticas, dando de este modo una mayor tenacidad al nivel de los anchos de fisura exigidos para las estructuras de ingeniería civil. Únicamente cuando las fibras macrosintéticas se utilizan a muy alta dosificación (a menudo mayor que la indicada en la documentación de los fabricantes), se puede llegar a alcanzar dicha resistencia.

Normalmente el ensayo específico a elegir para HPRF en estructuras de ingeniería civil es el ensayo de placa de acuerdo con la Normativa Europea EN 14487-1, *Hormigón Proyectado, Definición, Especificación y Conformidad* (3). El valor de absorción de energía medido para un panel puede adoptarse cuando, en el caso de soporte de terreno, se pone énfasis en la energía que tiene que ser absorbida durante la deformación del terreno (lo cual es especialmente útil para revestimientos primarios de hormigón proyectado).

El ensayo preciso de panel circular, ASTM C1550-08, que mide la resistencia residual para deformaciones hasta 40 mm, ha sido promovido por la industria de fibras macrosintéticas. Sin embargo, la selección de la deformación central más apropiada a especificar depende de a donde vaya dirigida la aplicación del material. La energía absorbida hasta 5 mm de deformación central es aplicable a situaciones en las cuales el material deba mantener fisuras fuertemente cerradas a bajos

niveles de deformación. Los ejemplos incluyen revestimientos finales en estructuras de obra subterránea, tales como túneles ferroviarios en los que se exija impermeabilidad. La resistencia residual hasta 40 mm de deformación es, de hecho, solo aplicable a situaciones donde se espera que el material sufra deformaciones muy severas en obra (lo que significa una fisura muy ancha). En general, este ensayo no debe utilizarse para estructuras de ingeniería civil con más de 10 mm de deformación prevista.

El ensayo de panel circular es de tipo isostático y no debe utilizarse para hacer una correlación con el ensayo EN hiperestático de panel cuadrado. Un ensayo hiperestático es indeterminado con un ensayo de proceso multifisura, mientras que un ensayo isostático es un proceso preciso con patrones de fisura predeterminados. A causa de esta diferencia, no es posible y no tiene sentido intentar comparar los resultados de estos dos ensayos.

Compatibilidad con Sistemas de Membrana Impermeables

Alguna información procedente de la industria de la fibra macrosintética ha dado a entender que existe preocupación acerca del peligro de que las fibras de acero sobresalgan de la superficie de la capa de hormigón proyectado, pudiendo agujerear las membranas impermeables previas o posteriormente instaladas. Sin embargo, la experiencia práctica en varias obras y los resultados de ensayo en laboratorios independientes confirman claramente que no hay problemas con las láminas de membrana de protección en combinación con el hormigón proyectado reforzado con fibras de acero.

Rendimiento en incendios de túnel

En los últimos años, el aumento de los incendios en túneles ha creado más necesidad de hacer énfasis en materia de seguridad y en la de mitigar daños estructurales potenciales en los túneles. Durante la fase de cálculo del Túnel Ferroviario del Canal de conexión a Londres (Tunnel Rail Link – CTRL - London) CTRL llevó a cabo, en la Universidad de Delft, varios ensayos de incendio extensivo en las dovelas bajo condiciones de carga.

Los ensayos probaron que la adición de 1 kg/m³ de fibras sintéticas monofilamento a la matriz de HRFA reducía significativamente la profundidad del descascarillado (lajado) en las dovelas (4).

Como consecuencia de los resultados de ensayos, se incorporaron fibras monofilamento de polipropileno, de 18 micras de diámetro y 12 mm de longitud, en las dovelas de HRFA en todas la longitud de los túneles del proyecto CTRL. Desarrollos más recientes en la tecnología de la fibra monofilamento y ensayos de incendios indican que las fibras con una diámetro <20 micras y de 6 mm de longitud, son recomendables para una resistencia óptima al resquebrajamiento en incendios. Debe indicarse que las fibras microsintéticas no aportan capacidad estructural adicional alguna al hormigón. También debe matizarse que, contrariamente a lo indicado en algunas documentaciones de los suministradores, las fibras macrosintéticas no tienen ningún efecto significativo en el descascarillado (lajado)(6).

Los incendios en túneles pueden alcanzar temperaturas significativas (hasta 1400 OC) como se muestra en la **Fig. 3**. El punto de fusión de las fibras sintéticas se encuentra generalmente entre 150 y 180°C, lo cual es beneficioso en el caso de las fibras microsintéticas para la resistencia al descascarillado (lajado), debido al hecho de que las fibras se funden y dejan espacio adicional y ramificaciones en su zona interfacial por las que la presión de vapor en el hormigón se disipa, reduciendo la cantidad de descascarillado en el hormigón.

No obstante, en el caso de las fibras macrosintéticas sometidas a incendio, la situación en términos de capacidad portante de carga estructural es más alarmante y aquí vale la pena citar directamente la Cláusula 5.1.5 del Informe Técnico de la Sociedad del Hormigón N° 65 (2007):

“Cuando están sometidas a fuego, las fibras macrosintéticas se ablandan cuando la temperatura aumenta y se fundirán a temperaturas de 150-160 oC. Perderán sus propiedades mecánicas y ya no aportarán capacidad estructural. De este modo, es claramente importante evitar el uso de fibras macrosintéticas para aportar capacidad estructural, que puede perderse en caso de incendio con el consiguiente colapso. Incluso en los lugares donde se

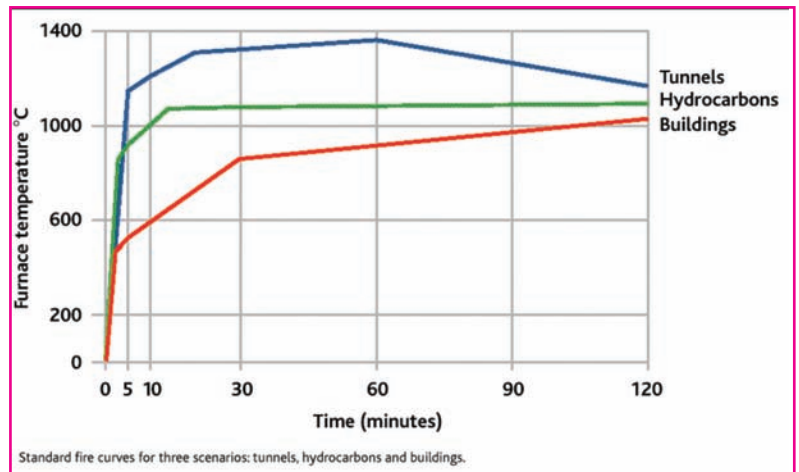


Fig. 3 – Curvas de temperaturas en incendio
usan para propósitos no críticos, será necesario retirar y sustituir el hormigón afectado por el fuego. En algunas situaciones será necesario el empleo de una protección pasiva contra incendios para limitar el aumento de temperatura.”

Las fibras de acero se empiezan a fundir a aproximadamente 1130°C y consecuentemente, a altas temperaturas, tienen más capacidad para mantener unido un compuesto de HRF que las fibras macrosintéticas.

La **Fig. 4** (6) muestra los perfiles típicos de temperatura dentro de las secciones de hormigón que están sometidas a incendio (por ej. Hormigón proyectado o dovela de hormigón). Mirando el gráfico es fácil estimar que tras aproximadamente una hora de exposición a incendio en un túnel, las fibras macrosintéticas en los 100 mm primeros de hormigón se habrán fundido y perdido su capacidad estructural.

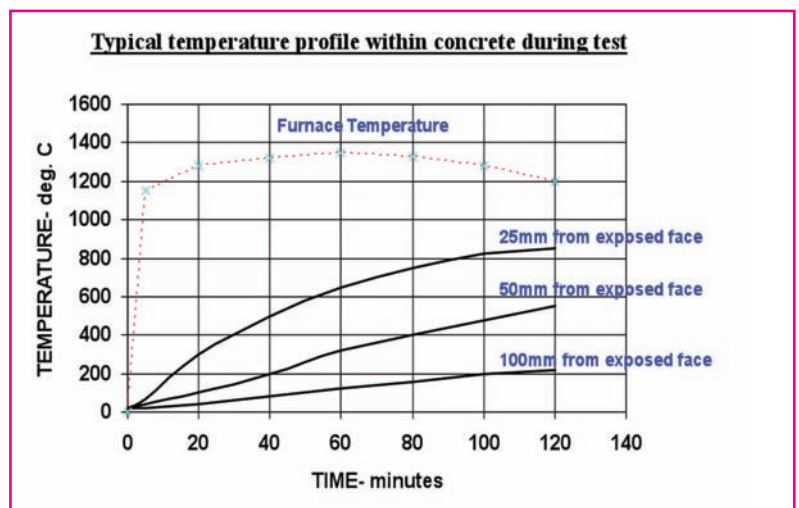


Fig. 4 – Perfiles típicos de temperatura en secciones de hormigón sometidos a incendio

Los ensayos más recientes de resistencia a fuego de dovelas de HRFA realizados en Europa, mostraron que las fibras metálicas son una mejora adicional en el hormigón ya reforzado que, debido a la conductividad térmica del refuerzo, causa un rápido estallido y descascarillado del hormigón que está expuesto. El descascarillado, aunque inevitable, es más limitado en el hormigón con fibras de acero en comparación con el hormigón reforzado con armado tradicional.

Como sucede con las dovelas de hormigón reforzado con armado tradicional, la adición de fibras monofilamento de polipropileno a la composición de HRFA reduce considerablemente el riesgo de descascarillado.

Por lo tanto, la combinación de fibras metálicas y fibras monofilamento de polipropileno constituyen una óptima solución para mejorar la resistencia al fuego en elementos prefabricados, ejecutados in situ y revestimiento finales de hormigón proyectado en estructuras subterráneas.⁽⁷⁾

Conclusión

Aunque las fibras macrosintéticas pueden aplicarse en ocasiones, en soporte de hormigón proyectado en algunas aplicaciones de minas, se continúa poniendo en tela de juicio su aplicación tanto en hormigón proyectado como en elementos de dovela para estructuras de ingeniería civil.

Los principales asuntos que los calculistas necesitan considerar a la hora de especificar un tipo genérico de fibra para aplicaciones de revestimiento final son:

- ✓ Convergencias/deformaciones previstas
- ✓ Características de fluencia, a largo plazo, del tipo de fibra tras la primera fisura de la matriz de hormigón.
- ✓ Comportamiento en fuego.

Además, deben tenerse en cuenta otros aspectos más prácticos, tales como el efecto del tipo fibra en las propiedades plásticas del hormigón.

El rendimiento del HRF aumenta con:

- ✓ El rendimiento de la matriz de hormigón
- ✓ El volumen de fibras en la mezcla

- ✓ El rendimiento intrínseco de la fibra en la matriz (geometría, aspecto (l/d), método de anclaje, resistencia a tracción, Módulo E, etc.)

Se deben especificar para cada proyecto, los procedimientos de ensayo adecuados y el criterio de rendimiento necesario del HRF.

Referencias

(1) Concrete Society Technical Report No. 65 (2007) "Guidance on the use of Macro-synthetic fibre-reinforced Concrete" Informe Técnico de la Sociedad de Hormigón Nr. 65 (2007) "Guía sobre el empleo de Hormigón reforzado con fibras macrosintéticas"

(2) Ratcliffe, R. – "Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) for Tunnel Segments", Australian Tunnelling Society, April 2009. "Hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) para dovelas de Túnel"

(3) European Standard EN 14487-1 – "Sprayed Concrete, Definition, Specification and Conformity" – Normativa Europea EN 14487-1 – "Hormigón proyectado, Definición, Especificación y Conformidad"

(4) Shuttleworth, P. – "Fire protection of precast concrete tunnel linings on the Channel Tunnel Rail Link", Concrete magazine, April 2001. "Protección contra incendios de las dovelas prefabricadas de hormigón del Tunel CTRL". Revista de Hormigón, Abril 2001.

(5) Tatnall, P. – "Fibre Reinforced Sprayed Concrete: The Effect on Anti-spalling Behaviour during Fires", 4th International Symposium on Sprayed Concrete, Davos 2002. "Hormigón Proyectado reforzado con Fibras: El Efecto en el Comportamiento anti-resquebrajamiento en Incendios" – 4º Simposio Internacional de Hormigón Proyectado, Davos 2002.

(6) Adfil – private correspondence. Correspondencia privada

(7) Rossi, P. - "Steel Fibres or Synthetic Fibres?", Tunnels and Tunnelling, July 2009. "¿Fibras de acero o fibras sintéticas?", Tunnels y Tunnelling, Julio 2009.