

Fibras metálicas vs fibras sintéticas en uso estructural: túneles, elementos prefabricados y pavimentos industriales: *To be or not to be?*

Roberto Majoral; A. Bianchini, Ingeniero, S.A. General Manager

Bernard Berge; Officine Maccaferri - Fibers Division. European Manager

Pedro Ribeiro; A. Bianchini, Ingeniero, S.A.- Fibers Division. Spain, Portugal and France Manager

Las grandes infraestructuras lineales españolas y su elevado consumo de hormigón han impulsado el uso de la fibra metálica como refuerzo estructural del hormigón. Su uso está en continuo aumento en términos cuantitativos y aplicativos. Actualmente se están empleando en tres grandes campos:

- Hormigón proyectado para el revestimiento temporal de túneles
- Elementos prefabricados, especialmente dovelas para revestimiento final de túneles
- Hormigón vaciado en obras de pavimentación industrial, aeropuertos, puertos, etc.

Diferentes empresas han aprovechado el tirón de este tipo de infraestructuras para intentar colocar en el mercado una gama de fibras de polipropileno que no siempre son acordes al proyecto y, aunque sin faltar a la verdad, esconden las verdaderas características de sus productos. En muchos casos no cumplen la actual normativa exigible en estas aplicaciones.

Fibras Metálicas como refuerzo estructural en hormigón

Las fibras metálicas para refuerzo de hormigón son producidas con alambres de acero con bajo contenido en carbono. Las fibras, con una resistencia mecánica a la tracción adecuada y distribuidas de forma homogénea en la matriz de hormigón, constituyen una armadura tridimensional muy resistente, capaz de soportar apreciables deformaciones manteniendo una buena resistencia (ductilidad) y de evitar la propagación del fenómeno de fisuración disipando la energía de deformación (tenacidad). Los dobles ganchos de las fibras permiten un anclaje sólido que aumenta la adherencia de la fibra a la matriz del hormigón.

El uso de fibras metálicas de acero en el hormigón proporciona un mejor comportamiento de la estructura ya que incrementa la resistencia postfisuración. Además reduce la formación de fisuras, proporcionando una mejor calidad y durabilidad de la obra. Otra de las ventajas del uso de estas fibras es la eliminación, en algunas aplicaciones, de la armadura convencional, con la consecuente reducción de tiempos y costes de la mano de obra. También evita el desperdicio de materiales y simplifica las tareas de transporte, acopio, manipulación y colocación.

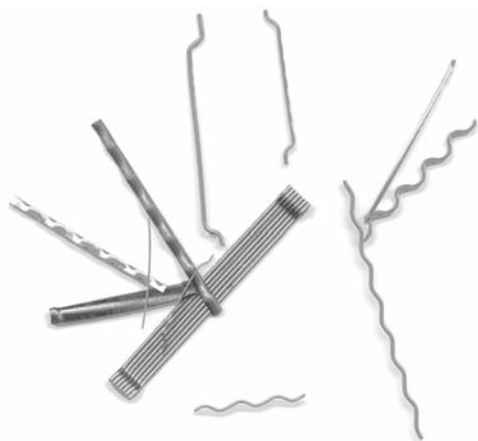


Figura 1: fibras metálicas

Aplicación en túneles: Economía, Seguridad y Fiabilidad

La utilización de hormigón reforzado con fibras metálicas representa economía, rapidez y seguridad en revestimientos temporales y definitivos.



Figura 2: gunita en túnel a sección completa con cerchas tubulares (patente ELAS-MACCAFERRI)

No podemos confundir el término temporal con el de estructural. La gunita es, efectivamente, temporal (aunque su vida "necesaria" con frecuencia es de abundantes meses). Pero, dentro de este periodo de tiempo, su función es claramente estructural: es necesaria para transmitir las cargas a las cerchas. Negar el carácter estructural de la gunita es lo mismo que negar la necesidad de las cerchas.

No podemos hablar de seguridad y fiabilidad sin reconocer el carácter estructural de las fibras empleadas en la gunita.

Aplicaciones en prefabricados

La industria del prefabricado de hormigón está sometida a exhaustivos controles de calidad requeridos por normativas nacionales e



Figura 3: dovelas para la Línea 9 del METRO de Barcelona fabricadas en PRENOR

internacionales. Por ello confía en el sistema de refuerzo del hormigón mediante fibras metálicas Wirand® tanto en el diseño como en la fabricación de elementos estructurales.

El diseño y la fabricación de dovelas prefabricadas de hormigón fibrado para el revestimiento de túneles excavados con el empleo de máquinas excavadoras integralmente automatizadas (TMB Tunneling Boring Machine) es una de las aplicaciones con más crecimiento en la actualidad.

Aplicación en pavimentos industriales: De frágil a dúctil. La armadura en pavimentos.

En algunas aplicaciones como los pavimentos industriales, el refuerzo tradicional de malla electrosoldada puede ser totalmente sustituido por fibras metálicas. Las fibras actúan cuando se produce la primera fisuración, controlando y limitando de inmediato su abertura.

Como las fibras se distribuyen uniformemente repartidas en la matriz, se genera un efecto de refuerzo tridimensional tanto en los ángulos como en el perímetro o en las zonas de las juntas.

Pavimentos sin juntas: El sistema LODIMAC (Long Distance MACcaferri), desarrollado por MACCAFERRI, permite realizar hormigonados de áreas de hasta 2.500 m²/día, sin necesidad de juntas cortadas (juntas de retracción). Se genera un importante aumento de la producción diaria.

Pavimentos de alta planicidad: Los pavimentos reforzados con fibras permiten las más altas exigencias de los sistemas de

almacenaje a gran altura con sistemas de carga totalmente automatizados, que requieren rigurosas tolerancias de planicidad en los pavimentos.

Fibras metálicas vs fibras sintéticas: normativa de obligado cumplimiento para las fibras empleadas como refuerzo estructural

Actualmente existen Normas y Proyectos de Norma de carácter nacional e internacional para este tipo de solución. Vamos a revisar dicha normativa y como determina la utilización de uno u otro tipo de fibra.

1. Instrucción de Hormigón Estructural EHE 2008. REAL DECRETO 1247/2008, de 18 de julio de 2008

2. EN 14889-1-2008: Fibras para Hormigón. Parte 1: Fibras de acero. Marcado CE

3. Draft Model Code 2010 (Fédération Internationale du Béton - FIB)

EHE 2008

En la introducción establece: “Esta Instrucción es de aplicación a todas las estructuras y elementos de hormigón estructural, de edificación o de ingeniería civil...”

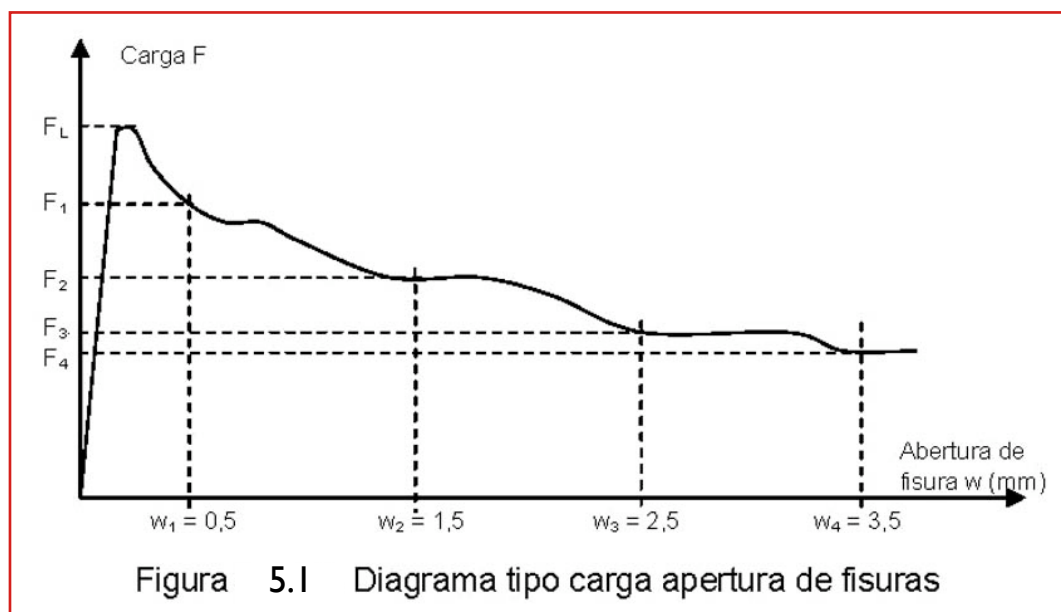
■ **Definiciones extraídas del Anejo 14 (Recomendaciones para la utilización de hormigón con fibras) de la EHE 2008.** En Alcance: La tipificación propuesta en este anejo refleja las especificaciones básicas que se exigen cuando las fibras tienen finalidad estructural.

■ **Fibras de acero:** “Estas fibras deberán ser conformes con UNE 83500-1⁽¹⁾ y, según el proceso de fabricación se clasifican en: trefiladas (Tipo I), cortadas en láminas (Tipo II), extraídas por rascado en caliente (virutas de acero) (Tipo III) u otras (por ejemplo, fibras de acero fundidas) (Tipo IV). La forma de la fibra tiene una incidencia importante en las características adherentes de la fibra con el hormigón y puede ser muy variada: rectas, onduladas, corrugadas, conformadas en extremos de distintas formas, etc.

(1). Esta norma ha sido anulada y sustituida por la Norma UNE EN 14889-1-2008: Fibras para Hormigón. Parte 1: Fibras de acero

Figura 4: pavimento sin juntas





La longitud de la fibra (l_f) se recomienda sea, como mínimo, 2 veces el tamaño del árido mayor. Es usual el empleo de longitudes de 2,5 a 3 veces el tamaño máximo de árido. Además, el diámetro de la tubería de bombeo exige que la longitud de la fibra sea inferior a 2/3 del diámetro del tubo. Sin embargo, la longitud de la fibra debe ser suficiente para dar una adherencia necesaria a la matriz y evitar arrancamientos con demasiada facilidad.

- **Fibras poliméricas:** "Las fibras plásticas están formadas por un material polimérico (polipropileno, polietileno de alta densidad, aramida, alcohol de polivinilo, acrílico, nylon, poliéster) extrusionado y posteriormente cortado. Estas pueden ser adicionadas homogéneamente al hormigón, mortero o pasta. Se rigen por la norma UNE 83500-2 y, según el proceso de fabricación se clasifican en: monofilamentos extruidos (Tipo I), láminas fibriladas (Tipo II).

Sus dimensiones pueden ser variables al igual que su diámetro y su formato:



Figura 5: fibras poliméricas.

Micro-fibras: < 0,30 mm diámetro
Macro-fibras: ≥ 0,30 mm diámetro

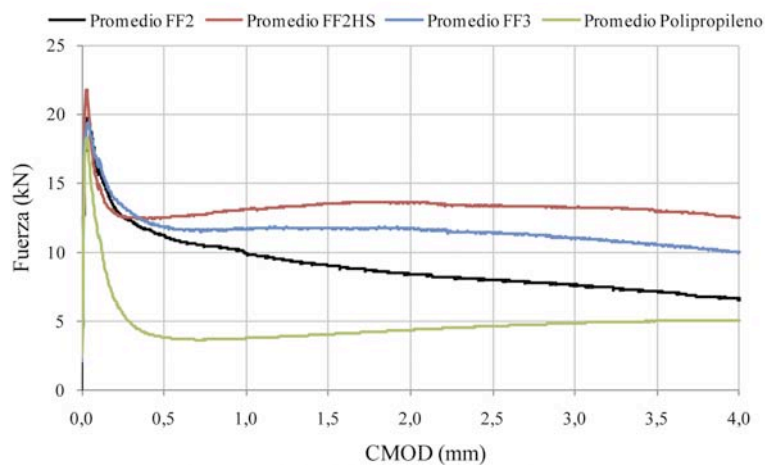
Las macro-fibras pueden colaborar estructuralmente, siendo su longitud variable (desde 20 mm a 60 mm), que debe guardar relación con el tamaño máximo del árido (relación de longitud 3:1 fibra:TM).

Las micro-fibras se emplean para reducir la fisuración por retracción plástica del hormigón, especialmente en pavimentos y soleras, pero no pueden asumir ninguna función estructural. También se utilizan para mejorar el comportamiento frente al fuego, siendo conveniente en este caso que el número de fibras por kg sea muy elevado".

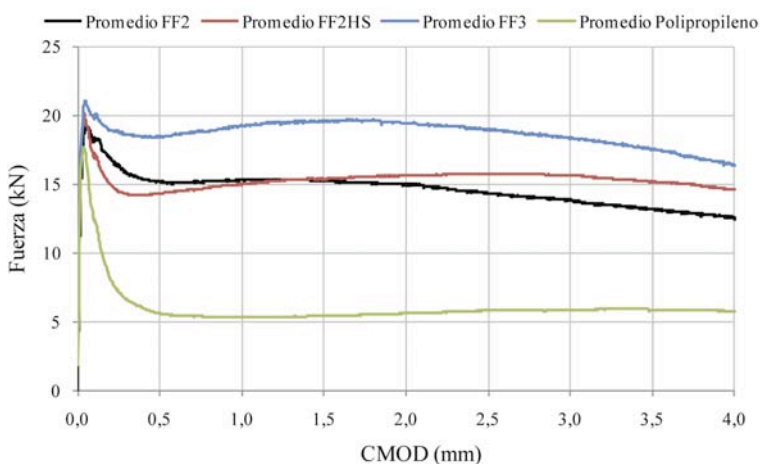
Dicho Anejo 14, en el artículo 31.4 establece: Para que las fibras se puedan considerar estructurales, la resistencia característica residual a tracción por flexión $f_{R,1,k}$ no será inferior al 40% del límite de proporcionalidad y $f_{R,3,k}$ no será inferior al 20% del límite de proporcionalidad.

- **Características mecánicas:** "El cálculo de los valores de resistencia a flexotracción y de resistencia residual a flexotracción según la citada norma UNE-EN 14651 se realiza asumiendo una distribución elástico lineal de tensiones en la sección de rotura". Adjuntamos la figura tipo de la EHE (Figura 5.1) y tres gráficos comparativos (correspondientes a tres dosificaciones) entre varias fibras metálicas y una macro-fibra de polipropileno (Figura 6).

Subs. Vol. 0.32% = 25 Kg metálica / 2,9 Kg en PP



Subs. Vol. 0.45% = 35 Kg metálica / 4,1 Kg en PP



Subs. Vol. 0.57% = 45 Kg metálica / 5,2 Kg en PP

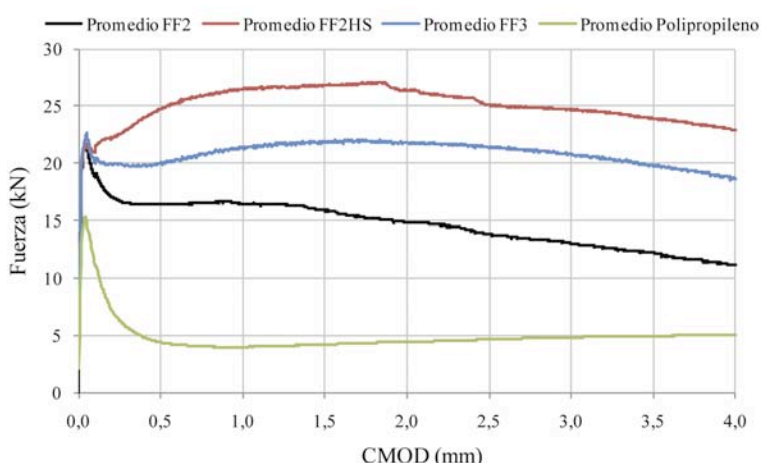


Figura 6: Resulta evidente que las macrofibras de polipropileno no pueden ser consideradas estructurales por no alcanzar un valor $f_{R,1,k}$ superior al 40% del límite de proporcionalidad.

EN 14889-1-2008 (Esta norma anula y sustituye a la Norma UNE 83500-1:1989 citada en EHE 2008)

En OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN, indica:

"NOTA: El uso estructural de las fibras se produce cuando la adición de fibras se diseña para contribuir a la capacidad portante de carga de un elemento del hormigón. Esta norma cubre las fibras destinadas a este uso en todos los tipos de hormigón y mortero, incluidos el hormigón proyectado, hormigones para enlosado, prefabricación, insitu y los hormigones de reparación".

Para una fibra estructural, el marcaje CE es obligatorio ya que esta norma es una norma europea armonizada según el Mandato M/115 - Construction Directive 89/106/EEC. En el ensayo inicial se verifica no solo el producto sino los resultados de su empleo dentro del hormigón.



Figura 7: Etiqueta de marcado CE

En su apartado 5.8 Efectos sobre la resistencia del hormigón, indica: "Los efectos sobre la resistencia deben determinarse conforme a lo indicado en la Norma EN 14845-2 utilizando un hormigón de referencia según el proyecto de Norma prEN 14845-1. El fabricante debe declarar el volumen unitario de fibras, en kg/m³, que consiga alcanzar una resistencia residual a la flexión de 1,5 MPa a 0,5 mm CMOD (equivalente a 0,47 mm de flecha central) y una resistencia residual a flexión de 1 MPa a 3,5 mm CMOD (equivalente a 3,02 mm de flecha central)".

De los gráficos anteriores (Figura 6) se deduce que la fibra de polipropileno ensayada (una de las más conocidas en el mercado) tiene

dificultades para garantizar 1,5 MPa a 0,5 mm CMOD, ni siquiera con dosificaciones de 5,2 Kg/m³. Atención a las etiquetas que obligatoriamente deben identificar el producto: según determina la misma Norma, debe indicar claramente la dosificación necesaria.

Si, para alcanzar este valor de 1,5 MPa a 0,5 mm CMOD, deben usar dosificaciones mayores, deberán indicarlo en la etiqueta y perderán el único atractivo que pueden aportar estas fibras: bajos costes asociados a bajas dosificaciones.

DRAFT MODEL CODE 2010

En el Volumen I del primer borrador completo Model Code 2010, capítulo 5.6, se introducen las fibras y el FRC (Fibre Reinforced Concrete) como compuesto. Las ideas generales que refleja, relacionadas con este tema son:

- La utilización de fibras en túneles se ha de considerar estructural, tanto para las dovelas como para la gunita. Un revestimiento provisional no deja de ser estructural por razones obvias de seguridad durante la exposición de los trabajadores a la ejecución del túnel. La estructura tiene que ser diseñada en consecuencia, teniendo en cuenta un coeficiente de seguridad minorado respecto a una estructura permanente.
- Las fibras cuyo Módulo de Young se ven afectadas de forma significativa por las variaciones de temperatura y humedad en el tiempo no están consideradas dentro de este Model Code.
- El comportamiento a largo plazo (long term behavior) del FRC, sometido a esfuerzos de tracción directa o flexión, tiene que ser tomado en cuenta para las fibras cuya eficiencia está afectada por la deformación viscosa (creep) y sus consecuencias.

El Módulo de Young o Módulo Elástico Longitudinal (N/mm²) es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza. Para un material elástico lineal e isótropo, el Módulo de Young tiene el mismo valor para una tracción que para una compresión, siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda de un valor máximo denominado Límite Elástico, y es siempre mayor que cero: si se

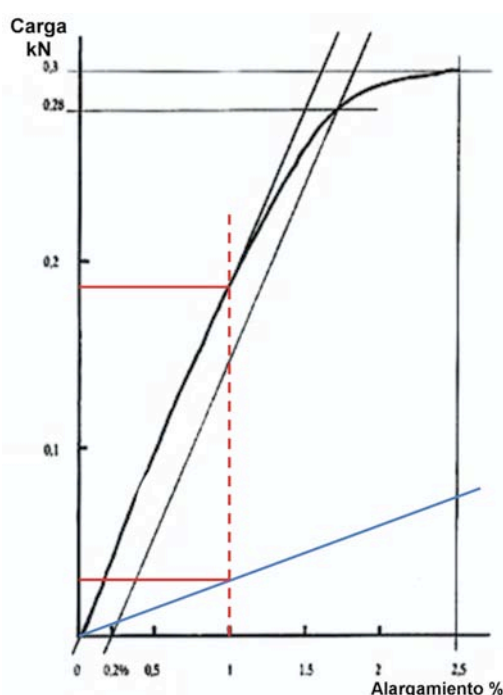


Figura 8:
Diagrama
tensión-deformación

tracciona una barra, aumenta de longitud. Podemos también definirlo como la pendiente (en el tramo lineal = elástico) de la recta tracción-deformación.

Tanto el Módulo de Young como el Límite Elástico son distintos para los diversos materiales. Considerando que el Módulo de Young del hormigón es de 30.000 MPa, la incorporación de una fibra inferior a este valor es perjudicial para el comportamiento de la matriz de hormigón. Las fibras sintéticas tienen un Módulo de Young de 3.000 a 10.000 MPa y para las fibras metálicas es de 210.000 MPa.

Si un material tiene un Módulo de Young 30 veces mayor que otro significa que, a igual esfuerzo, se genera una deformación 30 veces mayor en el material de bajo Módulo Elástico. La justificación de las curvas "carga-apertura de fisura" anteriores para la fibra de polipropileno se hace pues evidente (Figura 6).

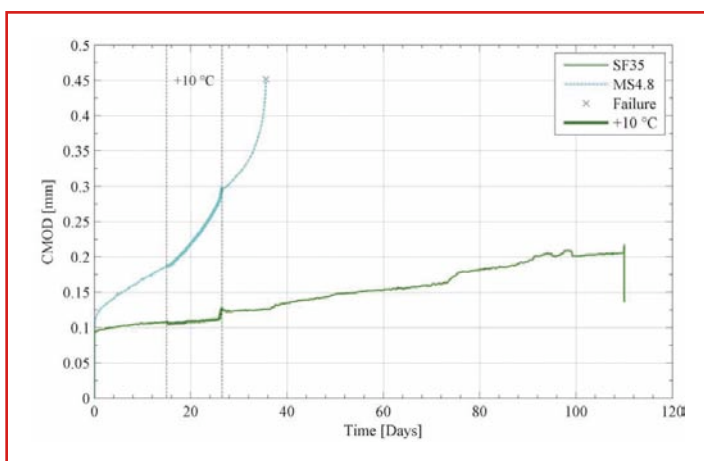
Creep o deformación viscosa

Las fibras sintéticas bajo carga permanente sufren una deformación en el tiempo que puede llegar al colapso de la estructura. Este comportamiento, denominado viscoelástico, se acentúa a temperaturas moderadas (a partir de 30°). El plástico es estable (elástico) a temperatura por debajo de - 20°, es visco-elástico de -20° a 165° y líquido a partir de 165° (punto de fusión).

En DISTART (Universidad de Bolonia) han realizado ensayos para comparar el comportamiento a largo plazo de las fibras metálicas o sintéticas. El objetivo de esta campaña experimental fue investigar el comportamiento de los diferentes tipos de fibras, en términos de incrementos de la apertura de fisura en placas (semejante a un pavimento) pre-fisuradas, cuando se someten una carga a largo plazo. Se ha verificado que el vínculo entre la fibra y el hormigón y la viscosidad de algún tipo de fibras puede afectar al comportamiento a largo plazo de las placas, tanto en términos de apertura de fisura como de resistencia residual.

Se han ensayado cuatro placas de $300 \times 2000 \times 120$ mm (ancho \times largo \times alto). Ver figura 9. El tamaño de las placas se definió con el fin de ser representativo de una porción de pavimento de hormigón (ancho grande y espesor pequeño). La dosis y el tipo de fibras han sido elegidos para estar lo más cerca posible a la práctica común en el mercado. Dos placas con fibras de acero con 25 y 35 kg/m³ respectivamente y las otras dos placas con 2 y 4,8 kg/m³ de macro-fibras sintéticas.

Figura 9:
Ensayo de
placas bajo
carga
permanente.



Antes de los ensayos a largo plazo, las placas han sido pre-fisuradas a apertura de fisura (CMOD) de 0,2 mm. Después de la fase de fisuración, las pruebas a largo plazo se realizaron con un sistema de flexión de cuatro puntos. La figura 9 muestra el montaje experimental. Cada viga se apoya en dos barras de acero, creando así un vano central de 750 mm, donde el momento flector es constante y la fuerza cortante es cero. Las cargas permanentes se aplicaron en los extremos de las placas a una distancia de 525 mm a partir de los dos soportes. La carga se aplica mediante bloques de hormigón y acero, sobre una placa base conectada por dos varillas roscadas a barras transversales huecas, colocados en la parte superior de la placa.

Durante las pruebas a largo plazo, las vigas se mantuvieron en una habitación climatizada a 20 °C y la humedad relativa del 60%. Con el fin de apreciar mejor las diferencias, la Figura 9 sólo muestra las curvas de dos placas (35 kg/m³ metálica y 4,8 kg/m³ sintética). La curva MS4.8 ha llegado al colapso después de 35 días bajo carga permanente. La curva SF35 no mostró signos de insuficiencia y se mantuvo bajo una carga constante durante 110 días y luego se descargó, dando por finalizada la prueba. Es importante destacar que durante esta prueba, la temperatura se incrementó en 10 °C por un período de 11 días. Durante este período la curva MS4.8 mostró un incremento significativo en la pendiente de la curva CMOD/tiempo, mientras que la SF35 fue menos sensible a los cambios de temperatura. Cuando la temperatura se restableció, la curva MS4.8 siguió aumentando fuertemente, hasta el fallo, mientras que la SF35 mantuvo la capacidad de carga hasta el final.

Ni las cargas permanentes ni las temperaturas de 30°C son raras en pavimentación o en túneles. Por todo lo expuesto, las macro-fibras de polipropileno no son adecuadas en fines estructurales, sin negar su utilidad para prevenir la fisuración de fraguado. En los caso donde se esperen serios problemas de corrosión y resulte necesaria su utilización, en la fase de cálculo deberán tenerse en cuenta las diferentes características de estos materiales sintéticos y los cálculos y las dosificaciones deberán sujetarse a estas limitaciones.

Ciertas cosas están hechas para durar. Otras no.



Hay una buena diferencia entre acero y plástico. También en lo que se refiere a las fibras usadas para reforzar el hormigón. El acero es un material de larga duración ya que su elevado módulo elástico ofrece un verdadero refuerzo del hormigón, evita roturas bajo la carga de servicio y lo convierte en un material hecho para durar. Al contrario del plástico, el acero no está influenciado por altas temperaturas ni por radiaciones UV. Es por esto que las fibras de acero se utilizan con éxito en el mundo de la construcción desde hace más de 40 años. Con el acero puedes comer tranquilo.



Consorzio
Tecnico
Produttori
**Fibre
in Acciaio**

BEKAERT- FIBROCEV- MACCAFERRI www.fibracciaio.it