

Hormigón de fibras

# Perspectivas de futuro de un material de construcción innovador

Por el catedrático Klaus Holschemacher de la Escuela Superior de Técnica, Economía y Cultura (HTWK) de Leipzig (Alemania)

## 1. Introducción

Junto a sus conocidas ventajas, el material de construcción del hormigón también presenta algunas desventajas estructurales, como son la reducida resistencia a tracción en comparación a su resistencia a compresión, así como su frágil, y por ello desfavorable, resistencia postfisuración. Por medio de la incorporación de fibras cortas de determinados materiales se consigue mejorar el comportamiento a tracción del hormigón, y se compensa, al menos en parte, la reducida resistencia a tracción y ductilidad.

Los hormigones reforzados con fibras despiertan desde hace años un interés creciente y su uso en la obra se está extendiendo cada vez más. A continuación haremos una breve revisión del estado de desarrollo alcanzado hasta ahora en los hormigones de fibras y de las tendencias más actuales, limitándonos al empleo de fibras cortas.

## 1 Tipo y forma de las fibras

### 1.1 Material fibroso

En principio cualquier material es susceptible de ser empleado como material fibroso, siempre que se cumplan los siguientes requisitos:

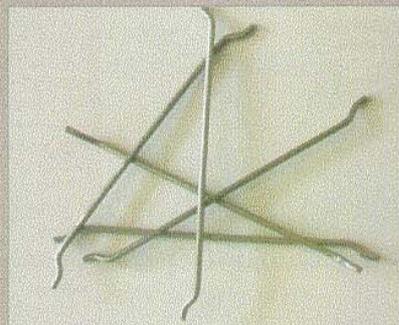
- resistencia del material fibroso al medio alcalino del hormigón

- las propiedades del hormigón no deben verse afectadas negativamente por el empleo de las fibras
- suficiente resistencia a tracción y alargamiento de rotura del material fibroso
- calidad del material.

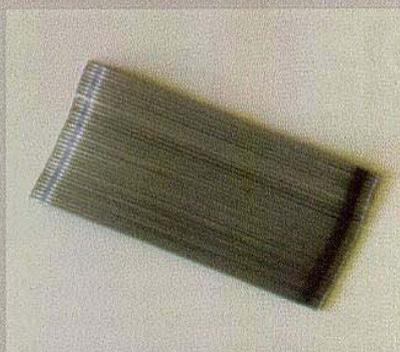
Por otro lado, la naturaleza del material fibroso empleado y la forma de sus fibras deben permitir un buen anclaje en la matriz del cemento para garantizar el efecto de control de la fisuración de las fibras. Las fibras deben ser además lo bastante rígidas como para evitar que se doblen o quiebren en el proceso de amasado.

Las fibras que más se emplean actualmente en la obra como refuerzo del hormigón son, en primer lugar, las fibras de acero, las fibras de vidrio y las

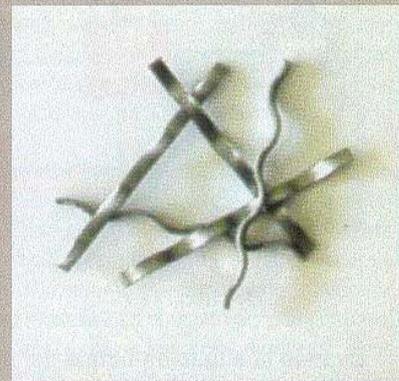
Fig. 1: Forma característica de las fibras de acero



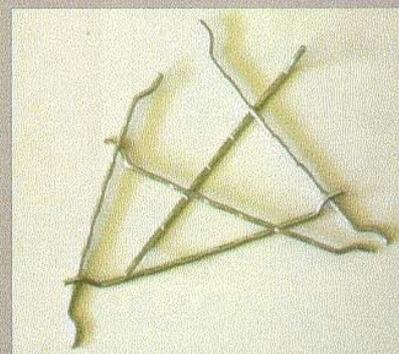
Fibra de alambre de acero con superficie lisa y extremo en forma de gancho



Fibras de alambre de acero unidas con pegamento hidrosoluble



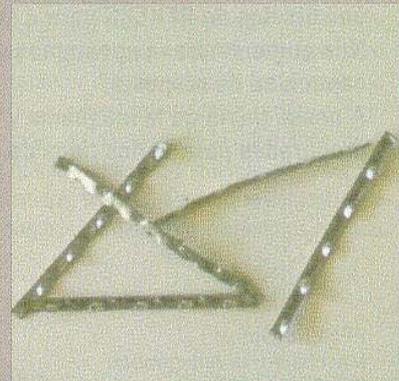
Fibras de alambre de acero onduladas



Fibras de alambre de acero perfiladas y con extremos conformados



Fibras fresadas



Fibras de chapa

Tipo de fibra	Diám./grosor típico de la fibra *) (µm)	Long. típica de la fibra *) (mm)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidad (kN/mm <sup>2</sup> )	Resistencia a tracción (N/mm <sup>2</sup> )	Alarga-miento de rotura (%)
<b>Acero</b>						
- alambre trefilado	500 – 1300	30 – 60	7,85	160 – 210	> 1 000	3 – 4
- fresadas	400	26 – 32	7,85	210	980	
- de chapa	400 – 650	15 – 35	7,85	210	270 - 800	10
<b>Vidrio resistente</b>						
a los álcalis	3 – 30	3 – 25	2,68 – 2,70	72 – 75	1 500 – 1 700	1,5 – 2,4
<b>Polipropileno</b>						
- monofilamento	18 – 22	6 – 18	0,91	4 – 18	320 – 560	8 – 20
- filamentosa	50 – 100	6 – 19	0,91	3,5 – 10	320 – 400	5 – 15
<b>Poliacrilonitrilo</b>						
	18 – 104	4 – 24	1,18	15 – 20	330 – 530	6 – 20
<b>Carbono</b>						
	5 – 10	6	1,6 – 2,0	150 – 450	2 600 – 6 300	0,4 – 1,6
<b>Asbesto</b>						
	0,02 – 30	< 40	2,6 – 3,4	160	1 000 – 4 500	2 – 3

**Tabla 1: Tipo de fibras y propiedades de los materiales**

fibras sintéticas (sobre todo las de polipropileno y las de poliácridonitrilo), que, además, pueden combinarse entre sí para aumentar su eficacia («cocktail de fibras»). Sin embargo, existe una gran diferencia de precios entre los diferentes tipos de fibras, lo que ha provocado que, por ejemplo, las fibras de vidrio se utilicen preferentemente en elementos con pequeño espesor de pared, mientras que las de acero se emplean también en construcciones normales y de pared gruesa. En la **tabla 1** se indican los valores típicos de diferentes tipos de fibras.

### 1.2 Fibras de acero

Dependiendo del sistema de fabricación se deben diferenciar las fibras de

alambre de acero, las fibras fresadas y las fibras de chapa con sus respectivas características en cuanto a material y forma (**fig. 1**).

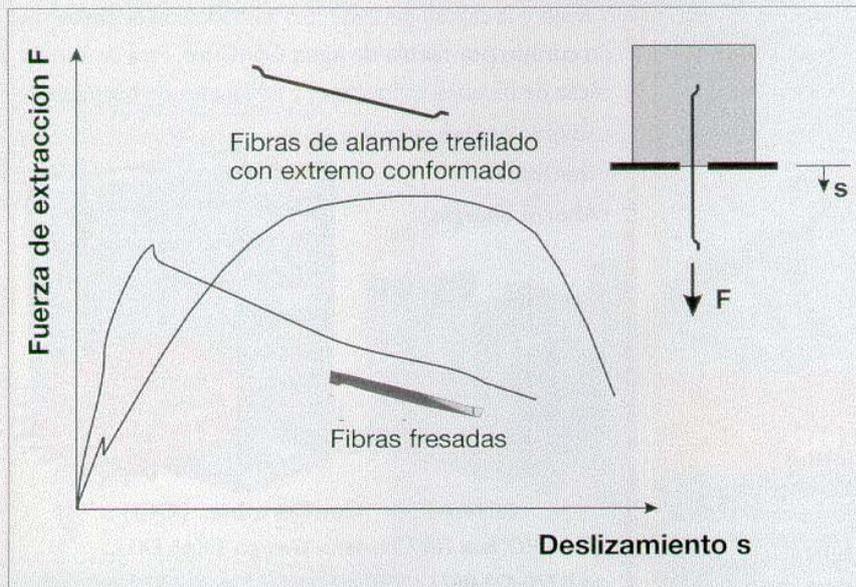
El material del que se obtienen las fibras de alambre de acero es alambre laminado trefilado en frío, aunque también puede usarse alambre galvanizado o alambre de acero fino. La forma de las fibras se obtiene por trefilado continuo y cortando el alambre resultante en las dimensiones adecuadas. Mediante rodillos especiales es posible obtener además de fibras rectas, fibras onduladas, perfilar la superficie de las fibras y, en su caso, formar fibras con extremos acodados o aplastados.

Las fibras fresadas se obtienen aplicando una herramienta rotatoria a una pieza de acero, tienen una sección en

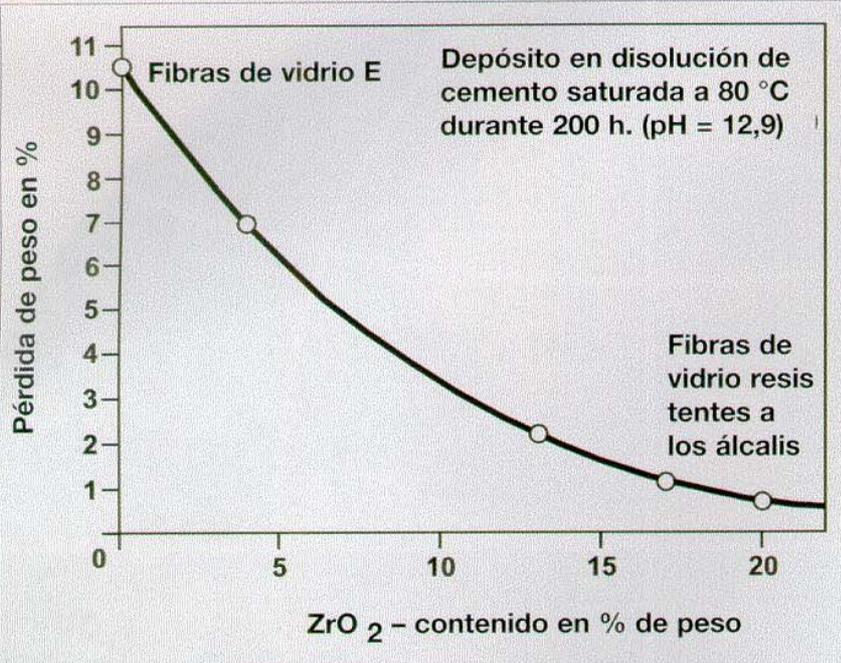
forma de hoz y un giro sobre su eje longitudinal. Debido al proceso de elaboración presentan en su cara externa una superficie lisa y en la interna una rugosa.

Las fibras de chapa se obtienen por corte de delgadas tiras. Se conforman mediante prensado para obtener fibras con extremo en gancho y/o perfilar la superficie. Debido a la frecuentemente mala calidad del material, la resistencia a tracción de las fibras de chapa es también relativamente baja. Las fibras de alambre de acero, las fibras fresadas y las de chapa se distinguen entre sí en sus características mecánicas, sobre todo en su capacidad de anclaje en la matriz del cemento, así como en su capacidad de resistencia y fragilidad. En resumen, se ha demostrado que las fibras de alambre de acero tienen los valores más altos de resistencia a tracción y que las fibras de chapa alcanzan, sin embargo, valores muy reducidos. Las fibras fresadas se muestran comparativamente frágiles y las fibras de alambre de acero y las de chapa, por el contrario, marcadamente dúctiles.

El comportamiento de adherencia se basa - como en el acero para armar - en adherencia por adhesión, por rozamiento y por conformación de las fibras. Para obtener datos más exactos sobre el comportamiento de adherencia de las fibras en la matriz del cemento se pueden realizar ensayos de extracción (**fig. 2**). En estos se demuestra que las fibras fresadas presentan, debido a su superficie rugosa, un comportamiento de adherencia muy favorable por menor deslizamiento, lo que se debe principalmente a la adhe-



**Fig. 2: Determinación del comportamiento de adherencia de las fibras de acero mediante ensayos de extracción de las fibras**



**Fig. 3: Resistencia a los álcalis de las fibras de vidrio en relación con su contenido en óxido de circonio [1]**

sión eficaz entre la superficie de la fibra en toda su longitud y la matriz de cemento. Sin embargo, una vez se sobrepasa la tensión máxima, los esfuerzos transmitidos son muy reducidos. En fibras de alambre de acero con superficie lisa la adherencia por adhesión es pequeña y el anclaje en la matriz de cemento se produce principalmente a través de los extremos conformados, lo que en general conlleva deformaciones plásticas en las fibras.

### 1.3 Fibras de vidrio

Según su composición y sus aplicaciones pueden diferenciarse varios tipos de vidrio (vidrio A, vidrio C, vidrio E, vidrio resistente a los álcalis, vidrio de sílice, etc.). Si las fibras de vidrio han de mantener su eficacia en el hormigón por un largo periodo de tiempo, deben emplearse, debido al medio alcalino del agua en los poros, las fibras de vidrio resistentes a los álcalis, que se fabrican con óxido de circonio (> 15 % de la masa) (fig. 3). También resulta eficaz emplear para la fabricación de los denominados hormigones de fibra de vidrio de segunda generación mayores porcentajes de adiciones puzolánicas o adiciones con hidraulicidad latente, como cenizas volantes de carbón, polvo de sílice o escoria granulada de alto horno, lo que repercute en una disminución del valor de pH del hormigón.

Las fibras de vidrio resistentes a los ál-

calis se obtienen a partir de una masa de vidrio de silicato de circonio fundido a temperaturas de 1250 hasta 1350 °C, del que se extraen largos filamentos sueltos por el procedimiento de filamento continuo, que, tras su rigidización, se revisten con una fina película, cuya función es la de mejorar la resistencia de las fibras de vidrio y su capacidad de adherencia. A continuación se unen los filamentos formando cordones (strands) que finalmente se cortan.

Para su empleo en el hormigón de fibra de vidrio se utilizan fibras de vidrio integrales, filamentosas y de dispersión acuosa. Mientras que las fibras de vidrio integrales no se separan en el proceso de mezclado, las fibras de vidrio filamentosas se abren en sus extremos, y las de dispersión acuosa se sueltan al contacto con el agua de amasado, presentando así una superficie total extremadamente grande [1], [2].

## 2 Características y aplicaciones de los hormigones con fibras

### 2.1 Efecto de las fibras en el hormigón endurecido

Con la incorporación de fibras en el hormigón pueden alcanzarse, independientemente del material fibroso empleado, los siguientes objetivos, que,

junto a aspectos económicos, determinan el tipo de hormigón de fibras a emplear:

- evitar la aparición de grandes fisuras
- mejorar la resistencia postfisuración del hormigón
- mejorar la resistencia al fuego de los elementos de hormigón.

Junto a estas características, y estrechamente relacionadas con ellas, se obtienen otras propiedades deseadas en el hormigón de fibras, como por ejemplo: resistencia al impacto, resistencia contra el desgaste, impermeabilidad.

Respecto al comportamiento de carga de los hormigones de fibras, son de vital importancia las siguientes consideraciones:

- el límite de resistencia a tracción de los hormigones de fibras se alcanza cuando empiezan a deslizarse las fibras de la matriz del cemento o cuando las fibras se rompen.
- Un parámetro importante para determinar el comportamiento de carga de los hormigones de fibras es la distribución y orientación de las fibras. Normalmente las fibras están distribuidas en el hormigón tridimensionalmente, pero en los extremos de las piezas o, al emplear procedimientos de fabricación especiales, pueden darse orientaciones bidimensionales y unidimensionales, que tienen como consecuencia un comportamiento anisotrópico del material.

### 2.1.1 Evitar grandes fisuras

Cuando el hormigón sufre esfuerzos de flexión o tensiones internas, uno de los objetivos prioritarios es evitar que aparezcan grandes fisuras. Para ello es necesario que los esfuerzos no se localicen en unas pocas fisuraciones sino que se distribuyan por muchas zonas.

El proceso de rotura en materiales ligados con cemento se caracteriza, en su fase inicial, por la aparición de microfisuras, que se originan en la zona de contacto entre la matriz de cemento y el árido. Las tensiones por tracción que el hormigón ya no puede absorber en la zona fisurada, son absorbidas por las fibras, siempre que no se supere una distancia crítica entre fibras, las fibras presenten una adherencia suficiente en toda su longitud y su rigidez sea la adecuada.

A este respecto se ha podido constatar que el empleo de muchas pequeñas

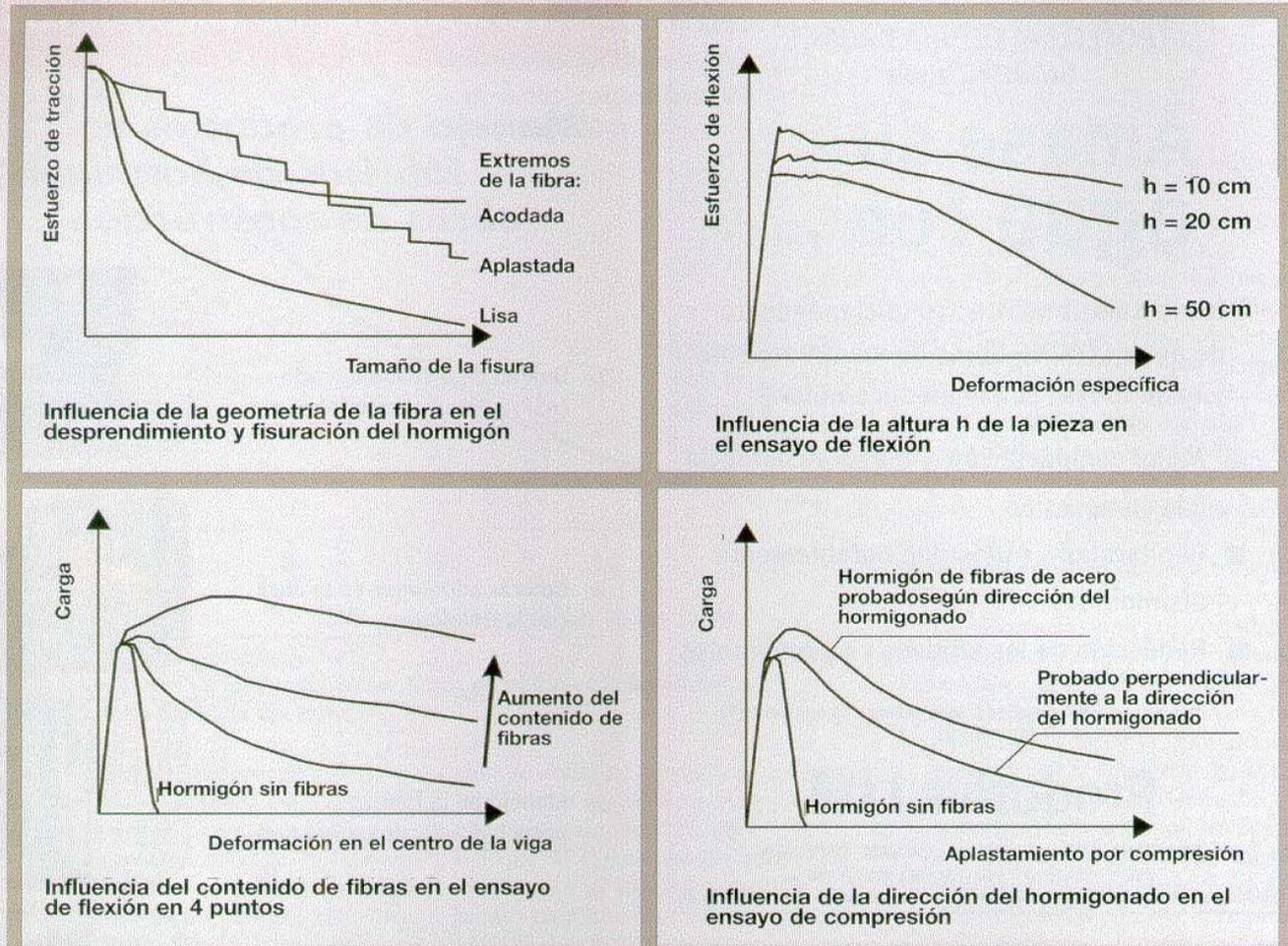


Fig. 4: Efectos sobre las propiedades del hormigón de fibras de acero

fibras con una gran superficie total resulta beneficioso. Se han mostrado eficaces, sobre todo, las fibras de vidrio y las de material sintético, pero también las fibras de acero fresadas que, debido a su superficie rugosa, presentan muy buena adherencia. Las fibras de acero lisas, con o sin conformaciones en sus extremos, son, por el contrario, más ineficaces en este caso. Por otro lado, el uso de fibras de polipropileno combate con eficacia la formación de fisuras debidas a la retracción. Las fibras de polipropileno se adhieren al agua del hormigón fresco, que será devuelta más tarde durante el fraguado del hormigón. Este proceso supone una especie de curado interno del hormigón y repercute en la mejora de la microestructura y de la resistencia a la fisuración.

### 2.1.2 Mejorar la resistencia postfisuración

Mediante la adición de fibras se puede mejorar notablemente el comportamiento postfisuración del hormigón y

ello permite hacer de su resistencia a tracción un valor calculable. Se ha podido demostrar que el comportamiento postfisuración depende, sobre todo, de los siguientes factores [3] a [5], (fig. 4):

- volumen de fibras (subcrítico, crítico, supercrítico)
- resistencia de las fibras (alta/baja)
- rigidez de la fibra
- tenacidad de la fibra (tenaz, frágil)
- esbeltez de la fibra (relación entre su longitud y su diámetro)
- forma de la fibra (recta, ondulada, con/sin extremo conformado)
- anclaje de la fibra en la matriz del cemento.

Los problemas que aparecen en la fabricación y en el proceso de elaboración de los hormigones de fibras impiden aumentar indiscriminadamente el volumen de fibras y su grado de esbeltez. Por ello, en la mayoría de los casos, la resistencia a tracción del hormigón de fibras no queda mejorada respecto al hormigón sin fibras e, incluso, disminuye. Se podría conseguir un aumento de la resistencia a tracción

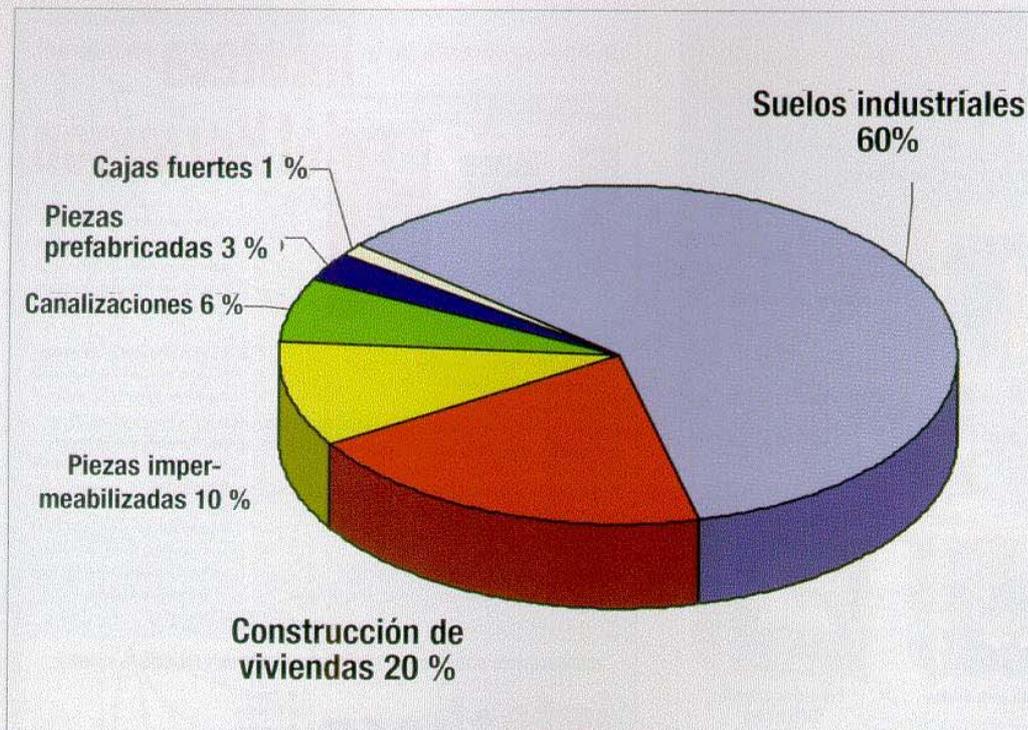
centrada con contenidos de fibras muy altos, por encima del volumen crítico, pero ello obliga a utilizar procedimientos de fabricación especiales.

### 2.1.3 Mejorar la resistencia al fuego

La adición de fibras produce normalmente una mejora de la resistencia al fuego, ya que retarda el desconchamiento del hormigón y el descubrimiento de la armadura en caso de incendio. El empleo de fibras de polipropileno tiene especial importancia en hormigones de alta resistencia. Teniendo en cuenta que su punto de fusión se sitúa en torno a los 170 °C, a temperaturas más elevadas se forman canales de distensión de vapor que repercuten en una clara mejora del comportamiento al fuego.

### 2.2 Efecto de las fibras en las propiedades del hormigón fresco

La trabajabilidad del hormigón fresco



**Fig. 5:**  
Aplicaciones  
del hormigón  
de fibras de acero

empeora cuando aumenta el volumen de fibras, se alarga su longitud, disminuye su diámetro o aumenta el diámetro del árido de máximo tamaño, y se ve afectada por la forma de las fibras (mayor riesgo de formación de erizos en fibras metálicas con extremos conformados). La adición de fibras requiere mayor cantidad de agua en el hormigón fresco, que debe compensarse normalmente con fluidificantes.

En volúmenes de fibras altos debe aumentarse el porcentaje de árido fino en el hormigón. El tamaño máximo del árido debería situarse en los hormigones reforzados con fibras de acero, entre los 4 y los 16 mm (8 mm en el hormigón de fibras de acero proyectado).

La presencia de las fibras en el hormigón fresco dificulta el proceso de compactación, en consecuencia, cuando aumenta el volumen de fibras, se incrementa también el contenido de aire en el hormigón endurecido. Esta es la razón por la que el aumento del volumen de fibras no siempre conlleva una mejora del comportamiento postfisuración.

Las fibras pegadas formando un haz facilitan la trabajabilidad del hormigón fresco. En hormigones de altas resistencias debe comprobarse si la cantidad del agua de adición es suficiente para disolver el pegamento.

## 2.3 Campos de aplicación característicos de los hormigones con fibras

### 2.3.1 Hormigón con fibras de acero

Dado que la resistencia a tracción del hormigón de fibras de acero, por regla general, no es mejor que la del hormigón sin reforzar, el hormigón con fibras de acero se presta, sobre todo, en el caso de sometimiento a flexión o esfuerzo de compresión con excentricidad mínima. Especialmente eficaz es la combinación de una armadura de acero normal con fibras de acero. Mientras que la capacidad portante se asegura en primera línea mediante la armadura de acero, el empleo de fibras repercute en una mejora de la aptitud para el uso, gracias al control que ejercen en la fisuración. Además de su aplicación tradicional en pisos industriales, el hormigón de fibras de acero se emplea cada vez más en la construcción de edificios (cimientos, paredes de sótano), así como en la construcción de túneles [6], (fig. 5). El empleo de hormigón de fibras de acero repercute sobre todo en una agilización y simplificación de la ejecución de la obra, que compensa con mucho los mayores costes de material. Ahora que la directriz «Hormigón de fibras de acero» [7] de la Asociación Alemana del Hormigón (DBV) permite disponer de unas bases de me-

dición independientes del fabricante de fibras, se puede contar con otro auge de este material de construcción. En los últimos años se han realizado en Alemania interesantes proyectos relacionados con el uso de hormigón de fibras de acero que abren nuevas vías de investigación. Como ejemplo se han de mencionar los siguientes:

- solera de hormigón bajo agua a base de hormigón de fibras de acero en las obras de la Potsdamer Platz en Berlín [8]
- tramo de ensayo de la vía en placa («Feste Fahrbahn») de la Deutsche Bahn AG en Waghäusel [9]
- empleo de barras de hormigón pretensado a base de hormigón de alta resistencia reforzado con fibras de acero en el puente Rudisleben [10].

### 2.3.2 Hormigón con fibras de vidrio

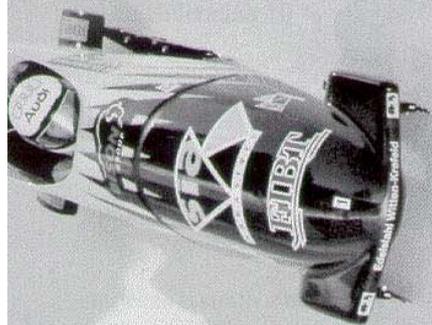
Básicamente hay que distinguir entre el hormigón modificado con fibras de vidrio y el hormigón de fibras de vidrio, en los que se emplean fibras cortas de vidrio resistentes a los álcalis, así como el hormigón reforzado con mallas o redes de fibra de vidrio.

El hormigón modificado con fibras de vidrio y el hormigón de fibras de vidrio presentan volúmenes de fibras muy distintos. Así, en el caso del hormigón modificado con fibras de vidrio, el contenido crítico de fibras es, con cantidades de 1 kg/m<sup>3</sup> de hormi-

# Unitechnik

Produktions-Automatisierung

## El impulso necesario para su circuito de producción!



Nuestras soluciones a medida para automatizar su planta de prefabricados de hormigón se encargan de conseguir un mayor rendimiento reduciendo los costes.

### Fiabilidad y eficacia

- gracias una técnica de control más moderna.

### Transparencia y flexibilidad

- gracias al ordenador central UniCAM NT.

Unitechnik Cieplik & Poppek GmbH  
Fritz-Kötz-Str. 14 • D-51674 Wiehl  
Fon +49 (0) 22 61 / 987-0  
Fax +49 (0) 22 61 / 987-510  
E-Mail: rieggen@unitechnik.de

[www.unitechnik.de](http://www.unitechnik.de)

gón (fibras de dispersión acuosa) hasta 5 kg/m<sup>3</sup> (fibras integrales resistentes a los álcalis), claramente inferior. Por tanto, las fibras de vidrio no tienen en el hormigón modificado una función estática, sino que repercuten, principalmente, en una mejora de las características estructurales [11].

Los hormigones de fibras de vidrio son hormigones de grano fino reforzados con fibras resistentes a los álcalis en los que se sobrepasa el contenido crítico de fibras. Con ello se consigue mejorar la resistencia a flexotracción, el comportamiento elástico y la resistencia al impacto [12], [13] frente al mortero sin fibras. El hormigón de fibras de vidrio es, en cuanto a costes de material, notablemente más caro que el hormigón de fibras de acero, por lo que está indicado fundamentalmente en piezas de pequeño espesor de pared. Una característica ventajosa es que no hay que respetar grosores mínimos con el fin de evitar la corrosión, por lo que se pueden realizar piezas muy esbeltas. Los campos de aplicación principales del hormigón de fibras de vidrio son, por tanto, elementos de fachada ligeros y de reducido espesor, elementos de encofrado integrados, así como piezas de construcción funcionales de pared delgada.

Para fabricar hormigones de fibras de vidrio se emplean desde procedimientos manuales hasta la elaboración industrial. Actualmente los sistemas más extendidos son el de mezclado, el sistema de proyección, el de inyección y el de extrusión, y su diferencia radica en el esfuerzo de trabajo requerido y en el volumen de fibras necesario.

### 3 Tendencias de desarrollo actuales

Las investigaciones realizadas en el campo de los hormigones reforzados con fibras no deben darse ni mucho menos por terminadas, a pesar de los innumerables progresos alcanzados. Por el contrario, es evidente que el potencial de los hormigones de fibras está lejos de encontrarse agotado.

A continuación, enumeraremos algunos de los desarrollos actuales más destacados.

#### Hormigón de fibras de acero auto compactante

El hormigón autocompactante se caracteriza por sus excelentes propiedades en estado fresco, y el hormigón de fibras de acero, por la mejora de las propieda-

des en estado endurecido. Diversas investigaciones han demostrado que, con una fórmula adecuada, es posible combinar en un hormigón de fibras de acero autocompactante las ventajas de uno y otro hormigón [14], [15]. Las propiedades autocompactantes también pudieron alcanzarse con un alto contenido en fibras de hasta 100 kg/m<sup>3</sup>.

#### Hormigón ligero reforzado con fibras de acero

Los hormigones ligeros son especialmente frágiles por su alto contenido en áridos ligeros. En los hormigones ligeros también se puede conseguir una mejora de la ductilidad mediante la adición de fibras de acero. En el marco de las investigaciones descritas en [16] se probaron diversos tipos de fibras con el fin de medir su idoneidad para su utilización en hormigones ligeros. Algunas fibras mostraron un comportamiento diferente que en los hormigones normales (fig. 11).

#### Construcciones mixtas con hormigón de fibras de acero

El hormigón con fibras de acero se puede integrar perfectamente en construcciones mixtas. Junto a las combinaciones hormigón/hormigón de fibras de acero y acero/hormigón de fibras de acero, también han mostrado su eficacia las construcciones mixtas de madera/hormigón de fibras de acero. En el marco de un proyecto piloto llevado a cabo en Altenburg (Turingia) se pudo demostrar que la capacidad portante de forjados con vigas de madera puede aumentar de forma sencilla y barata, mediante la colocación de una placa de hormigón de fibras de acero resistente al cizallamiento unida a la viga de madera [17].

#### Combinación fibras de alta resistencia / hormigón de altas prestaciones

La ya de por sí reducida ductilidad de los hormigones disminuye generalmente al aumentar su resistencia a compresión. Con la adición de fibras de acero se puede mejorar su ductilidad. Sin embargo, al aumentar la resistencia a compresión se incrementa también la adherencia de las fibras, la capacidad portante del hormigón de fibras de acero está determinada por la resistencia a tracción de las fibras. Un aumento de la resistencia a tracción de las

fibras de acero repercute, en condiciones por lo demás iguales, en un claro aumento de la resistencia a flexotracción del hormigón de fibras de acero [18].

## Hormigones superresistentes

Los hormigones superresistentes con resistencias a compresión de más de 150 N/mm<sup>2</sup> presentan, en comparación con los hormigones de altas prestaciones tradicionales, una reducida relación agua-cemento, menor diámetro del árido de mayor tamaño y mejor densidad de la mezcla, debido a la buena mezcla de granos. Mediante compresión y/o aplicación de calor durante el proceso de rigidización o endurecimiento, puede aumentarse todavía más la resistencia a compresión del hormigón. La adición de fibras de acero también repercute en los hormigones de alta resistencia en un aumento de la resistencia a tracción y de la tenacidad [3], habiendo demostrado ser especialmente eficaces las microfibras con longitudes de hasta 6 mm y 0,1 mm de diámetro [19]. Las fibras de polipropileno poseen las ventajas de combatir la fisuración por retracción y tener buena resistencia al fugo [20].

## 4 Resumen

La adición de fibras cortas de distintos materiales al hormigón permite mejorar notablemente sus propiedades, especialmente en lo que concierne a su resistencia contra la fisuración, ductilidad y resistencia al fuego. Los hormigones reforzados con fibras pueden mejorar los procedimientos de construcción gracias a sus especiales características y abrir nuevos campos de aplicación. Los elevados costes de material se compensan en muchos casos con la simplificación de la ejecución de la obra, la sustitución, al menos en parte, de la armadura de acero, y la posibilidad de conformar elementos de pared de espesor reducido. ■

### Más información:

**HTWK Leipzig**  
**Fachbereich Bauwesen**  
**Lehrbereich Stahlbeton- und Spannbetonbau**  
**Prof. Dr.-Ing. Klaus Holschemacher**  
**Karl-Liebknecht-Str. 132**  
**04277 Leipzig, ALEMANIA**  
**Tel.: ++49 (0) 341 / 3076 6267**  
**Fax: ++49 (0) 341 / 3076 6212**  
**E-Mail: [holschem@fbb.htwk-leipzig.de](mailto:holschem@fbb.htwk-leipzig.de)**  
**Internet: [www.htwk-leipzig.de/bauwesen/stahlbeton.htm](http://www.htwk-leipzig.de/bauwesen/stahlbeton.htm)**

## Bibliografía

- [1] Curbach, M. u.a.: Sachstandbericht zum Einsatz von Textilien im Massivbau. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 488, Berlin 1998.
- [2] Lorenz, O.-K.: Was Sie über Glasfasern zur Verstärkung von Estrichen wissen sollten. [www.fussbodenbau.de/fachartikel/ast.art.lorenz.698.html](http://www.fussbodenbau.de/fachartikel/ast.art.lorenz.698.html)
- [3] König, G.; Tue, N.V.; Zink, M.: Hochleistungsbeton. Ernst & Sohn, Berlin 2001.
- [4] Gossila, U.: Tragverhalten und Sicherheit betonstahlbewehrter Stahlfaserbetonbauteile. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 501, Berlin 2000.
- [5] Lin, Y.: Tragverhalten von Stahlfaserbeton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 494, Berlin 1999.
- [6] Zitzelsberger, T.; Mandl, J.: Neues DBV-Merkblatt «Stahlfaserbeton». Beton 52 (2002), H. 1, S. 16 - 20.
- [7] DBV-Merkblatt «Stahlfaserbeton». Fassung Oktober 2001.
- [8] Falkner, H.; Henke, V.; Hinke, U.: Stahlfaserbeton für tiefe Baugruben im Grundwasser. Bauingenieur 72 (1997), S. 47 - 52.
- [9] Dorgarten, H.-W.; Dahl, J.: Feste Fahrbahn System HOCHTIEF. In: König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F.: Faserbeton. Bauwerk Verlag Berlin 2002, S. 287 - 304.
- [10] König, G.; Novák, B.: Vorgespannte Betonstäbe aus Hochleistungsbeton. Beton- und Stahlbetonbau 94 (1999), H. 9, S. 348 - 361.
- [11] Fachvereinigung Faserbeton e.V.: Merkblatt Glasfasermodifizierter Beton (FMB).
- [12] Meyer, A.: Glasfaserbeton – ein Baustoff mit vielen Chancen. Betonwerk+Fertigteil-Technik 68 (2002), H. 3 und H. 4.
- [13] Friedrich, T.: Hormigón reforzado con fibra de vidrio – El futuro ya ha comenzado. Planta de Hormigón Internacional, nº 6, 2001, pp. 32 - 39.
- [14] Grünwald, S.: Stahlfaserbeton mit selbstverdichtenden Eigenschaften. In: König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F.: Selbstverdichtender Beton (SVB). Bauwerk Verlag Berlin 2001, S. 95 - 108.
- [15] Linsel, S.; Dehn, F.: Selbstverdichtender Stahlfaserbeton. In: König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F.: Faserbeton. Bauwerk Verlag Berlin 2002, S. 177 - 188.
- [16] Schneider, H.; Weiße, D., König, G.; Holschemacher, K.: Faserbewehrter Leichtbeton. In: König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F.: Faserbeton. Bauwerk Verlag Berlin 2002, S. 163 - 176.
- [17] Holschemacher, K.; Klotz, S.; Weiße, D.: Application of Steel Fibre Reinforced Concrete for Timber-Concrete Composite Constructions. Leipzig Annual Civil Engineering Report. 7 (2002).
- [18] Teutsch, M.: Entwicklung duktiler stahlfaserbewehrter Hochleistungsbetone. Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, H. 152, S. 155 - 168.
- [19] Bornemann, R.; Middendorf, B.; Fehling, E.: Herstellung und Eigenschaften von ultrahochfesten Betonen. In: Teutsch, M.: Betonbau – Forschung, Entwicklung und Anwendung, Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, H. 142, S. 97 - 105.
- [20] Schneider, U.; Horvath, J.; Dehn, F.: Faserbewehrte ultrahochfeste Betone. In: König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F.: Faserbeton. Bauwerk Verlag Berlin 2002, S. 189 - 200.