

Hormigón con la incorporación de fibras^(*)

Por FERNANDO RODRIGUEZ LOPEZ
y DIEGO PRADO PEREZ-SEOANE

El hormigón reforzado con fibras es un material a cuyo estudio y apreciaciones se viene prestando especial atención en todo el mundo. En el siguiente artículo se estudian los componentes de este material, su comportamiento mecánico, fabricación, propiedades específicas y aplicaciones. El trabajo obtuvo el primer premio Halesa 1983.

1. INTRODUCCION

1.1. Antecedentes

Las indudables ventajas del hormigón como material de construcción explican la profusión de su empleo. Sin embargo, frente a estas ventajas, su utilización presenta importantes problemas, entre los que destacan su baja resistencia a tracción y su gran fragilidad. Para soslayarlos se refuerza el hormigón con barras de acero, pretensadas o no, o bien simplemente se utiliza el hormigón en piezas que no van a estar solicitadas a tracción.

En los últimos veinte años se ha iniciado su estudio y se han llevado a cabo las primeras aplicaciones de otra alternativa para la solución de estos problemas: el hormigón de fibras.

La incorporación de fibras a materiales frágiles o quebradizos constituye una técnica utilizada desde hace miles de años. Ya en el «Exodo» se refiere la imposibilidad de fabricar ladrillos sin la adición de paja («Exodo», capítulo 5, versículo 6 y siguientes); el yeso se reforzaba antiguamente con pelo de caballo y más recientemente se han venido utilizando fibras de amianto para reforzar cemento Portland.

En 1911 Graham utilizó por primera vez fibras de acero para incrementar la resistencia y estabilidad de un hormigón armado convencional. Sin embargo, los primeros estudios de tipo científico sobre el comportamiento de estos materiales se deben a Griffith, en 1920, a los

que siguieron en 1963 los de Romualdi y Batson (1) y Romualdi y Mandel (2).

Hoy en día son múltiples las aplicaciones que se han hecho de este material en países como Estados Unidos, Rusia, Inglaterra, Francia y España (3).

Como razones del creciente interés en este material podríamos citar:

- Las ventajas que presentan frente a otras armaduras ligeras convencionales en determinados usos: requieren menor mano de obra, constituyen una armadura en todas direcciones, mejor comportamiento al impacto, etc.; aunque no pueden sustituir completamente a la armadura principal del hormigón armado.
- El desarrollo experimentado en los últimos años en el conocimiento y fabricación de nuevos tipos de fibras, industrializándose su obtención.
- La posibilidad de sustituir a otros materiales de mayor coste energético de obtención (fundición, plásticos, productos bituminosos) o de mayor escasez (fibra de amianto, madera).

1.2. Definición del hormigón armado con fibras

Hoy en día el hormigón armado con fibras es un material plenamente caracterizado y que se podría definir como el hormigón formado por un conglomerado hidráulico, generalmente cemento Portland, áridos finos y gruesos, agua y fibras discontinuas y discretas.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de diciembre de 1984.

2. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES Y DEL COMPUESTO

Los factores fundamentales de los que depende el comportamiento del compuesto son las propiedades físicas y mecánicas de las fibras y de la matriz, de la adherencia de ambos y de la compatibilidad de tensiones entre fibras y matriz.

2.1. Matriz

El aglomerante utilizado puede ser de dos tipos: orgánico (de tipo polímero: resinas epoxy, poliéster, fenólicas o melanina) o inorgánico (cemento Portland, cementos de alto contenido de alúmina, yeso o silicato de calcio). En los primeros el alargamiento en la rotura es del mismo orden de magnitud de las fibras, mientras en el segundo grupo es mucho menor.

Las matrices orgánicas se utilizan con alto contenido de fibras y producen materiales caros sólo utilizables en estructuras especiales que van a requerir propiedades extraordinarias: bajo peso, elevada resistencia y rigidez, alta resistencia a la corrosión, etcétera.

Los materiales de los que se requieran grandes cantidades y a bajos precios utilizarán matrices inorgánicas y, por tanto, serán los más comúnmente empleados.

En cuanto a los áridos hay que señalar que, en general, no es válida la granulometría de los hormigones ordinarios, disminuyendo mucho su trabajabilidad y dificultándose mucho el reparto uniforme de las fibras al aumentar el porcentaje de árido mayor de 5 mm. (4).

Sin embargo, con fibras de acero se ha hecho posible la utilización de granulometrías convencionales, introduciendo las fibras en la mezcla en forma de peines encolados, dispersándose las fibras durante el amasado, aumentando mucho la trabajabilidad de la mezcla (5).

La naturaleza de los áridos no se ha visto hasta ahora que afecte de forma especial al hormigón con fibras.

Al igual que en hormigones ordinarios, la resistencia de la matriz variará con el porcentaje agua/cemento.

2.2. Fibras

Se han ensayado fibras de diversos tipos, formas y tamaños:

Por su naturaleza se pueden clasificar en:

- Minerales (por ejemplo, amianto).
- Orgánicas (por ejemplo, algodón, rayón, sintéticas).
- Metálicas (por ejemplo, acero).

Por su módulo de elasticidad (6):

- Aquellas que tienen un módulo de elasticidad mayor que la matriz, siendo el aglomerante de este cemento Portland: amianto, vidrio, acero, carbono.
- Las que tienen un módulo inferior al de la matriz: celulosa, nylon, polipropileno. Estas experimentarán mayores deformaciones que las anteriores y sólo deberán usarse cuando no se prevea agrietamiento de la pieza.
- Por su forma pueden ser lisas o estar conformadas; duoform, anulares, onduladas; pueden ser monofilamentos o formar haces (fibras de vidrio).

Los parámetros físicos de definición de las fibras serán la longitud, el diámetro y la relación longitud/diámetro, denominada aspecto (equivalente al concepto de esbeltez) y que tendrá una importancia preponderante en el comportamiento de las fibras.

2.2.1. Fibras de mayor utilización

Hasta hace pocos años la fibra de uso más extendido y sobre la que se había profundizado más en investigaciones era la de acero. Sin embargo, en los últimos tiempos se está extendiendo la utilización de la fibra de vidrio, en gran parte debido a los avances realizados en la protección del vidrio de los ataques de los álcalis del cemento y a la obtención de fibras de mayor resistencia que permiten el mezclado por procedimientos convencionales, sin que se produzca la separación de los filamentos que las componen. Interés creciente se está desarrollando en torno a la fibra de polipropileno. Las fibras de carbono y alúmina han sido desechadas por las dificultades que presentan en el mezclado.

2.2.1.1. Fibra de vidrio

Se estudió en principio la utilización del vidrio como cordón de armadura tradicional, con y sin pretensado. Esta aplicación no resultó competitiva frente a la armadura de acero convencional y hoy no se considera.

En 1966, el British Building Research Establishment (7) inició los primeros estudios de la aplicación de estas fibras a cementos y hormigones.

Como se vio en los primeros trabajos y se confirmaría más tarde, las fibras de vidrio que se utilizasen con cemento Portland debían ser fuertemente resistentes a la acción corrosiva de los alcalis del cemento.

Esta resistencia a los alcalis se ha conseguido de dos maneras:

- Utilizando vidrios resistentes a los alcalis, compuestos del tipo $\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ y $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{MgO}$: Pyrex, E-glass y A-glass.
- Recubriendo las fibras con un polímero. La resina epoxy es la más utilizada. Con ello se consiguen otros efectos favorables adicionales (8).
 - Aumento de las resistencias a compresión y a tracción del compuesto.
 - Aumento de los valores del límite elástico y de la tensión de rotura.
 - Aumento de la adherencia entre fibra y hormigón, por lo que se evita el fallo por despegue de las fibras, aprovechándose toda su resistencia.

Se presenta el problema de que al cortar las fibras después de su impregnación en resina las secciones extremas de éstas no tienen recubrimiento, suponiendo puntos vulnerables al ataque de los alcalis. Por ello se tiende a utilizar cada vez más el primer procedimiento (9).

Otras soluciones que se han propuesto a este problema han sido la utilización de cementos aluminosos (4) o la adición a la mezcla de determinados aditivos: cenizas volantes o inhibidores. Con todo ello, la reducción de la resistencia con el tiempo no está del todo clara (10).

Los diámetros de las fibras de vidrio oscilan entre 0,005 mm. y 0,015 mm., pero se emplean formando trenzas de 0,015 a 1,5 mm.

2.2.1.2. Fibra de acero

El acero utilizado es de bajo contenido de carbono. Su módulo de elasticidad es diez veces mayor que el del hormigón, su adherencia es bastante buena, su deformación en rotura es elevada y son muy fáciles de mezclar, pudiéndose hacer por los procedimientos convencionales.

En un principio se obtuvieron mediante el corte de cables cilíndricos; hoy en día se utiliza tanto este método como el del corte de chapas de acero. Pueden ser lisas o tener anclajes en sus extremos. En algunos casos se han utilizado fibras con otras formas (11).

Su diámetro oscila entre 0,25 y 0,75 mm., siendo muy empleadas las fibras de 0,5 mm. de diámetro y 50 mm. de longitud. Su aspecto varía entre 30 y 150; siendo 100 el valor más común.

Aunque estas fibras son susceptibles de oxidarse si se encuentran cerca de la superficie de la pieza, la experiencia indica que ello sólo puede afectar a la estética, pero no a la resistencia.

2.2.1.3. Fibra de polipropileno

La utilización de fibras de polipropileno, en forma de filamentos, como refuerzo del hormigón se estudió hace años en Estados Unidos (12). La falta de adherencia de las fibras con la matriz observada en estos ensayos fue la causa de que entonces se rechazaran este tipo de fibras. Más recientemente, la posibilidad de obtener fibras multifilamento de polipropileno parece haber asegurado la adherencia.

2.2.1.4. Otras fibras

Importante ha sido hasta ahora la utilización de fibras de amianto en la obtención de amianto-cemento. Su método de obtención es muy diferente del hormigón convencional.

Las fibras de amianto en el hormigón requieren grandes cantidades de agua, por lo que hay

HORMIGON CON LA INCORPORACION DE FIBRAS

Tipo de fibra	Resistencia a tracción kp/cm ² × 10 ³ .	Módulo de Young kp/cm ² × 10 ³ .	Peso específico kg/dm ³ .	Diámetro m.	Alargamiento último %
Acrílica	2,1-4,2	21,1	1,1	—	25-45
Asbestos.....	5,6-9,8	842-1.406	3,2	0,02-20	0,6
Algodón	4,2-7,0	49,2	1,5	10-20	3-10
Acero	2,8-42,2	2.039	7,8	5-500	0,5-3,5
Grafito.....	24-26	24-28	1,9	9	1,00
Lana de roca	4,9-7,7	703-1.195	2,7	—	0,6
Nilón.....	7,7-8,4	42,19	1,1	—	10,20
Poliéster	7,3-8,8	84,37	1,4	—	11-13
Polietileno	7,1	1,41-4,22	0,95	—	10
Polipropileno	5,6-7,7	35,16	0,90	20-200	20
Rayón	4,2-6,3	70,32	1,5	—	10-25
Vidrio	10,5-38,7	703,2	2,5	9-15	1,5-3,5

que utilizar altos porcentajes de agua/cemento, con la consiguiente disminución de resistencias. Es difícil obtener distribuciones uniformes con ellas. Los yacimientos existentes son pocos y se están agotando. Todo ello, unido al cáncer de pulmón (asbestiosis) que producen, está llevando a su sustitución por fibras de vidrio.

Las fibras de alúmina y carbono se utilizan sólo en la obtención de hormigones por extrusión.

Las fibras de algodón, rayón y poliéster son muy atacables por los alcalis.

Las fibras de nylon son especialmente adecuadas en usos en los que se requiera elevada resistencia al impacto y a las explosiones.

2.3. Adherencia entre fibra y matriz

Según Swamy (13), las fibras introducidas en el hormigón están sólo parcialmente adheridas a éste. Esto se debe a la pérdida de humedad durante la fabricación, los cambios de volumen en el fraguado y las reacciones superficiales entre las fibras y la matriz, con la consiguiente aparición de tensiones internas en el sistema.

La adherencia se produce por dos tipos de fenómenos:

- Físicos: por combinación de adhesión, fricción y trabado mecánico.
- Químicos: por reacciones superficiales entre la fibra y el hormigón.

Sobre los primeros se puede actuar dándole formas adecuadas a las fibras. Si bien es cierto que se produce un aumento de la adherencia, comprobándose en muchos casos que se llega al fallo del material por rotura de la fibra y no por deslizamiento, como suele ocurrir en fibras lisas, también es verdad que los costes de obtención son mayores [fibras anulares (11)] y en muchos casos se producen dificultades en el mezclado que requieren tratamientos especiales [fibras con anclajes en los extremos (12)].

La adherencia se puede mejorar por procedimientos químicos, recubriendo la fibra de una resina epoxy. En el caso de fibras de acero se han utilizado con éxito los procedimientos de oxidación a 600° C y la galvanización (15).

Como es de esperar, el curado también tiene importancia. Un curado deficiente puede reducir la resistencia al arrancamiento de la fibra a la mitad, mientras que un curado bajo el agua a través de un tratamiento a alta temperatura o a presión la puede aumentar en un 70 por 100.

3. COMPORTAMIENTO MECANICO DEL HORMIGON ARMADO CON FIBRAS

Cuando una pieza de hormigón armado con fibras es sometida a flexión se observan dos tipos de comportamiento en la curva de tensión-deformación (figura 1).

Hasta el punto A se puede considerar que existe proporcionalidad entre la carga aplicada y

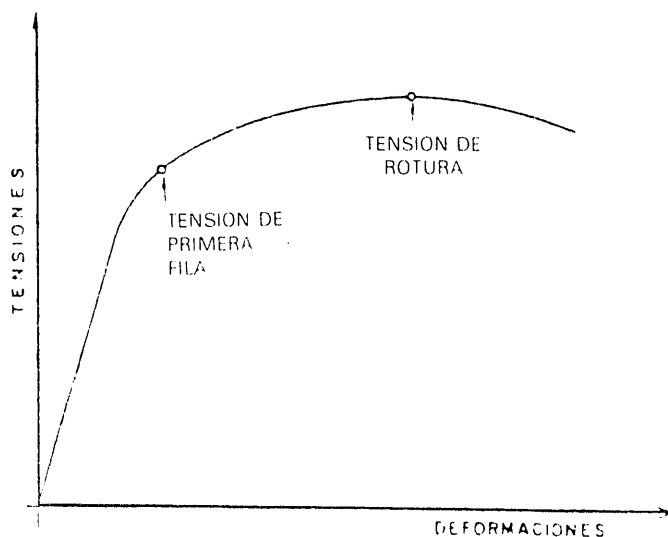


Figura 1

la deformación originada, aplicando incrementos sucesivos de carga. A este punto se le denomina «Tensión de primera fisura» o «límite elástico». Posteriormente aparece un nuevo punto B, a partir del cual se produce una caída en la tensión. A este punto B se le denomina «Tensión de rotura» o «resistencia final».

En un hormigón convencional, una vez fisurada la zona en tracción se produce la rotura de la pieza.

Antes de llegar a la tensión de primera fisura se puede suponer un comportamiento elástico, tanto para el hormigón como para las fibras, ya que el módulo de elasticidad de las fibras es mayor que el del hormigón (10 veces en el caso de las fibras de acero), el incremento del volumen de fibras aumenta el límite elástico del compuesto.

No obstante, este efecto es menor que en el caso de hormigón armado convencional para el mismo volumen de acero y fibras uniformemente distribuidas.

Por otra parte, la linealidad hasta alcanzar la primera fisura o límite elástico puede ser perfecta o sufrir desplazamientos si el volumen de fibras es elevado.

Dos mecanismos se han propuesto para la explicación de la tensión de primera fisura. La primera por antigüedad corresponde a Romualdi y Batson y se basa en la separación de las fibras;

la segunda relaciona el límite elástico con el volumen, orientación y aspecto de las fibras.

Romualdi y Batson emplearon un mecanismo de rotura lineal elástica para demostrar que la resistencia a la primera fisura es inversamente proporcional a la separación entre las fibras para un volumen determinado de éstas. El aumento del límite elástico se puede conseguir mediante la adición directa de las fibras a la mezcla. En estos estudios se llegó a la siguiente expresión para la separación entre fibras (2).

$$S = 13,8 d \sqrt{\frac{1}{P}}$$

donde:

S = La separación media entre los ejes de las fibras.

d = El diámetro de las fibras.

p = El porcentaje de fibras en volumen.

Las experiencias de Snyder y Lankard (16) utilizando esta expresión pusieron de manifiesto que también influye la longitud de las fibras.

McKee (17) ha desarrollado otra ecuación ligeramente diferente para la separación entre fibras:

$$S = 3 \sqrt{\frac{V}{P}}$$

donde:

V = El volumen de una fibra.

P = El porcentaje en volumen de fibras.

Estas ecuaciones suponen una distribución geométrica de las fibras, pero cuando están aleatoriamente orientadas y distribuidas el empleo del concepto separación basado únicamente sobre una supuesta distribución geométrica pierde su significado (18).

Una idea aproximada de la influencia de las fibras en las propiedades elásticas del compuesto se desprende de la siguiente ecuación (19).

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m$$

donde:

E_c, E_f y E_m = Los módulos de elasticidad del compuesto, de las fibras y de la matriz.

V_m = La fracción en volumen de la matriz.

V_f = El volumen de fibras.

Esta ecuación sólo es válida para mezclas con fibras continuas, comportamiento elástico de los componentes y no deslizamiento entre fibras y matriz. Dado que las fibras tienen longitud finita, puede haber alguna microfisura antes del límite elástico a causa de que ocurra algún fallo de adherencia entre las fibras. Por tanto, esta ecuación es únicamente una solución límite para el módulo de elasticidad y límite elástico en el hormigón armado con fibras.

Se han hecho algunos estudios teóricos para predecir la influencia de la orientación de las fibras en las propiedades elásticas del compuesto. El factor de eficacia, que se define como el porcentaje total del volumen de fibras que contribuye en una dirección determinada varía del 17 (2) por 100 al 41 y 80 por 100.

Una vez sobrepasado el límite elástico, la curva de tensión-deformación deja de ser lineal, alcanzando un máximo en el punto B. El fallo se produce generalmente por arrancamiento de las fibras, sin que éstas lleguen a alcanzar su tensión de rotura salvo en aquellos casos en que se mejora la adherencia de las fibras, con lo que algunas pueden llegar a la rotura.

Después de la carga máxima la disminución de tensiones con el incremento de las deformaciones es mucho menor en el hormigón armado con fibras que en el convencional, y, por tanto, la energía total absorbida antes de la rotura completa de la pieza ensayada es mucho mayor en el hormigón de fibras que en uno convencional, dependiendo esta diferencia del volumen de fibras empleado.

Se produce, además, un importante aumento de la tenacidad, que se pone de manifiesto en la menor pendiente de la curva tensión-deformación del hormigón de fibras respecto al convencional.

En las proximidades de la máxima carga de

flexión, parte de la sección transversal de la pieza se agrieta y algunas de las fibras pueden sufrir deslizamientos parciales, dependiendo su cuantía, entre otras cosas, de que se haya mejorado por algún sistema la adherencia de las fibras. Por ello, no es posible predecir racionalmente la carga de rotura del hormigón con fibras; sin embargo, basándose en los resultados experimentales y en las teorías de composición pueden lograrse aproximaciones empíricas.

Los factores que tienen mayor influencia en la carga máxima son el porcentaje en volumen de fibras y el aspecto de las mismas. También se ha visto que evitando el fenómeno de segregación el incremento del porcentaje de fibras aumenta de forma más o menos lineal la carga de rotura del hormigón. Se ha observado también que por encima de un aspecto de 150 aumenta la carga de rotura.

Slah, Swendra, Rangen y Vijaya proponen la siguiente carga de rotura:

$$\sigma_r = A \sigma_m (1 - V_f) + B V_f \frac{L}{D}$$

donde:

σ_r y σ_m = La tensión de rotura del hormigón de fibras y de la matriz de hormigón.

L = Longitud de las fibras.

D = Diámetro de las fibras.

V_f = Volumen de fibras.

A y B = Constantes.

El primer término del segundo miembro representa la contribución de la matriz de hormigón a la carga máxima. El máximo valor de A es la unidad. La constante de B depende del esfuerzo de ligazón entre las fibras y la matriz y de la aleatoriedad de distribución de las fibras.

Swamy propone los siguientes valores:

— Tensión de primera fisura:

$$\sigma_c = 0,834 \sigma_m (1 - V_f) + 2,00 V_f \frac{L}{D}$$

— Tensión de rotura:

$$\sigma_c = 0,970 \sigma_m (1 - V_f) + 2,00 V_f \frac{L}{D}$$

Hoy en día este grupo de teorías ha desplazado a la de Romualdi y Batson, aceptándose de forma generalizada que la separación de las fibras no es un factor determinante en el comportamiento del hormigón (20).

Se define la tenacidad como la energía absorbida para producir la separación completa de la pieza. Está representada por el área de la curva de tensión-deformación. También se puede medir mediante ensayos de impacto. La adición de fibras al hormigón, por lo que se ha visto, aumenta hasta el doble la tenacidad del hormigón. Dependerá de los mismos parámetros que la carga de rotura: orientación de las fibras, volumen y porcentaje de ellas y de su aspecto. Aumenta mucho al mejorar el anclaje de las fibras.

4. MEZCLADO Y PUESTA EN OBRA

En la mezcla del hormigón con las fibras habrá que conseguir una dispersión uniforme de las fibras en la matriz y evitar el apelmazamiento de éstas. La segregación y el apelmazamiento de las fibras se debe a diversas causas: aspecto de las fibras, porcentaje en volumen de las mismas, cantidad y tamaño del árido grueso, relación agua cemento y método de mezclado. Al aumentar el aspecto, el porcentaje de fibras y el tamaño y cantidad del árido grueso aumenta la tendencia al apelmazamiento.

Para conseguir un mezclado uniforme el aspecto no debe ser mayor de 100. La longitud parece no tener importancia. El porcentaje en volumen de fibras no debe exceder del 2 por ciento y algunos autores señalan como no aconsejables porcentajes superiores al 1 por 100 (J. Takagy y J. Derdere). La docilidad de la mezcla y el pequeño espaciado entre fibras requerido aconsejan no emplear áridos de tamaño superior a 10 mm. La cantidad de agua necesaria variará con la distinta absorción de las diversas fibras.

La plasticidad de la mezcla es importante para asegurar la adecuada dispersión de las fibras. La experiencia aconseja la utilización de relaciones agua/cemento de 0,4 a 0,6 con clasificaciones de cemento altas y mayor proporción

de finos que en hormigón convencional para cubrir la gran superficie específica de las fibras.

Se han venido utilizando con éxito aditivos como plastificantes, aireadores y controladores de la retracción.

El contenido de cemento se ha visto que se puede reducir utilizando cenizas volantes. Con ello no se afecta la resistencia a tracción o a compresión, pero se desconoce el efecto sobre otras propiedades.

En cuanto a la dosificación de los distintos componentes hay que decir que no se puede hablar de que existe una dosificación típica u óptima para todos los casos. Se han obtenido buenos resultados con dosificaciones muy diferentes. Habrá que hacer ensayos en cada caso particular para determinar la dosificación más adecuada.

El tiempo de mezclado es el mismo que en hormigones ordinarios y se puede hacer en hormigoneras convencionales. Los mejores resultados se han obtenido mediante el mezclado previo de los áridos con las fibras, siguiendo después el proceso tradicional. También se puede realizar introduciendo las fibras en una mezcla de agua y áridos e introduciendo el cemento y el agua posteriormente. Los problemas de mezclado de las fibras de acero conformadas se han resuelto introduciendo las fibras encoladas en peines. Con ello se consigue que el aspecto al introducirlas sea el del manojo de fibras, que no sobrepasa un valor de 20, y no el de las fibras aisladas, que es mucho mayor, aumentando mucho la trabajabilidad. La cola se disuelve y las fibras se dispersan uniformemente durante el amasado (14).

Para su puesta en obra se suele requerir un vibrado más importante que en el caso del hormigón convencional. El vibrado interno puede producir segregación de las fibras, pero normalmente esta segregación es favorable al refuerzo que deseamos conseguir. Por ejemplo, en pavimentos un vibrado interno colocará las fibras paralelamente a la superficie, que va a ser la dirección de mayores tracciones.

En los casos en que no se desee esta orientación se puede utilizar un vibrado externo.

El curado se realizará utilizando las mismas técnicas que en el hormigón convencional.

Hasta ahora se han utilizado los mismos ensayos para el control de calidad que en los hormigones ordinarios (consistencia, densidad, contenido de aire y ensayos de carga); sin embargo, estos ensayos no son perfectamente adecuados a este tipo de hormigones. Las medidas con el cono de Abrahams eran difíciles de realizar y poco representativas. Se soslayó este inconveniente mediante la determinación de la docilidad con el «cono invertido» (18).

Se pueden utilizar encofrados fijos o deslizantes para su puesta en obra. Se consiguen buenos resultados mediante proyección neumática o bombeo con contenido de fibras de 1 por ciento o menores.

Para la obtención de piezas prefabricadas tiene interés la extrusión de este tipo de hormigón (25). Con este procedimiento se consigue aumentar la adherencia entre las fibras y el hormigón y orientar las fibras en la dirección de los esfuerzos.

La uniformidad de las piezas así producidas es mayor que la obtenida con otros procedimientos.

5. PROPIEDADES MECANICAS ESPECIFICAS

En este capítulo se analizan las propiedades mecánicas más importantes del hormigón reforzado con fibras, quedando implícitas las comparaciones con el hormigón de composición normal.

5.1. Comportamiento frente a esfuerzos estáticos

5.1.1. Resistencia a la compresión

La incorporación de fibras no afecta de una manera significativa a la resistencia o la compresión.

Los resultados obtenidos muestran un diferente comportamiento según la naturaleza de las fibras. Así, si se emplean fibras rectas de acero se observa (21) un ligero incremento de la

resistencia (máximo cuando la proporción de fibras es del 3 al 4 por 100 en peso), dependiendo de la forma de las fibras, pues en el caso de que sean onduladas (22) la resistencia a la compresión disminuye, pudiendo deberse esto a la menor compacidad que logra por causa de la forma de las fibras.

No se observa disminución cuando la adición es de otro tipo de fibras de acero, siempre que

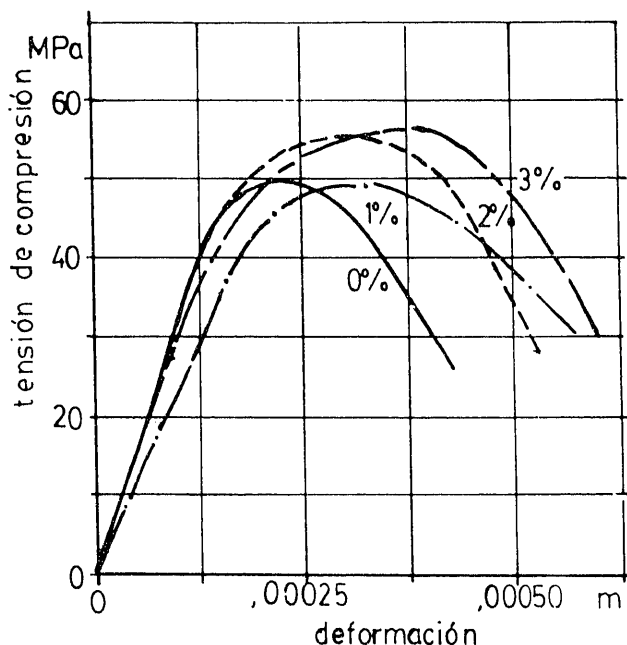


Fig. 2.—Diagrama para fibras de acero.

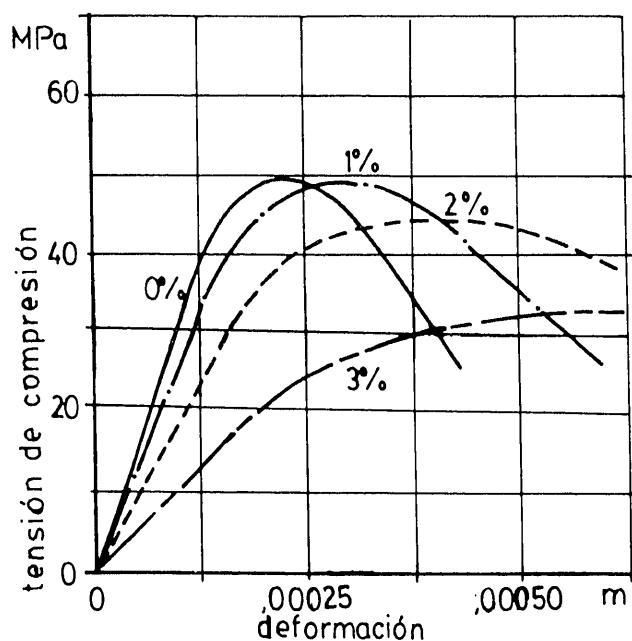


Fig. 3.—Diagrama para fibras de vidrio.

la compactación sea la adecuada. Caso particular es el empleo de fibras anulares de acero (11), en los que se produce un importante aumento de la resistencia a compresión, siendo éste máximo cuando la proporción de fibras es del 3,1 por 100 en peso.

Utilizando fibras de vidrio se produce un ligero decrecimiento en todos los casos.

Las curvas de las figuras 2 y 3 corresponden a ensayos efectuados sobre probetas cilíndricas de 76 — 152 mm., de acuerdo con la especificación C 39-72 de las normas ASTM y a una temperatura de 75° F. Se utilizaron fibras de acero de 0,40 mm. de diámetro y 30 mm. de longitud, con anclajes en los extremos (externos doblados). Las fibras de vidrio utilizadas tienen un diámetro de 0,0127 mm. a 0,0140 mm. y una longitud de 12,7 mm.

Es importante señalar que, en general, se produce un menor módulo de deformación, obteniéndose un valor de E inferior en un 5 por ciento al de un hormigón de composición idéntica pero sin fibras, apuntándose la posibilidad de que pueda ser debido a una desigual distribución del árido grueso a causa de la inclusión de las fibras.

De igual manera se observan unas curvas de tensión de deformación más achatadas en las puntas, así como una mayor ductilidad del hormigón en la tensión de colapso (lo que da lugar a una mayor área bajo la curva y, por tanto, a una mayor capacidad de absorción de energía hasta la rotura) cuando se emplean fibras de vidrio.

Finalmente, en el caso de que se empleen fibras recubiertas con resinas epoxy (8) que, utilizadas para evitar la corrosión de las fibras, se observa un incremento en la resistencia a la compresión, que puede ser debido a la rigidez proporcionada a las fibras por el revestimiento, así como al cambio en la interacción entre las fibras y la matriz.

5.1.2. Resistencia a la tracción

No es probable el empleo de hormigón con fibras en tracción directa, aún así analizaremos los resultados obtenidos por diversos autores.

Para ello estudiamos los gráficos siguientes:

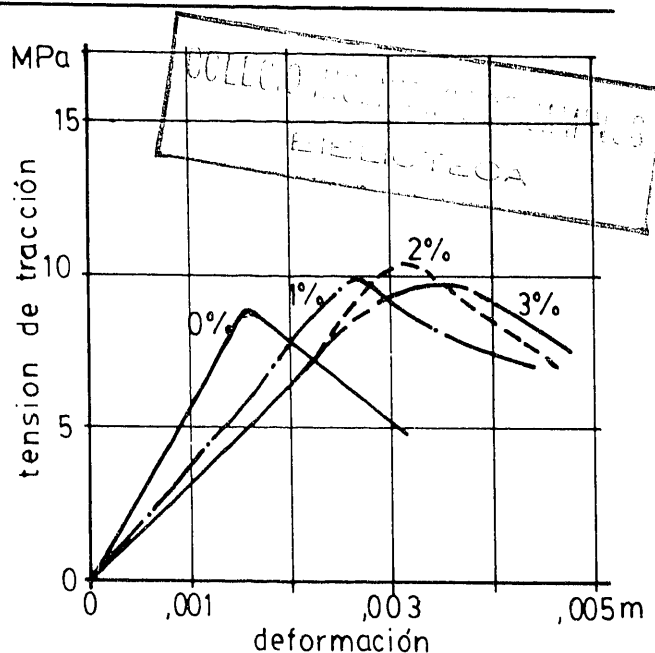


Fig. 4.—Diagrama para fibras de vidrio.

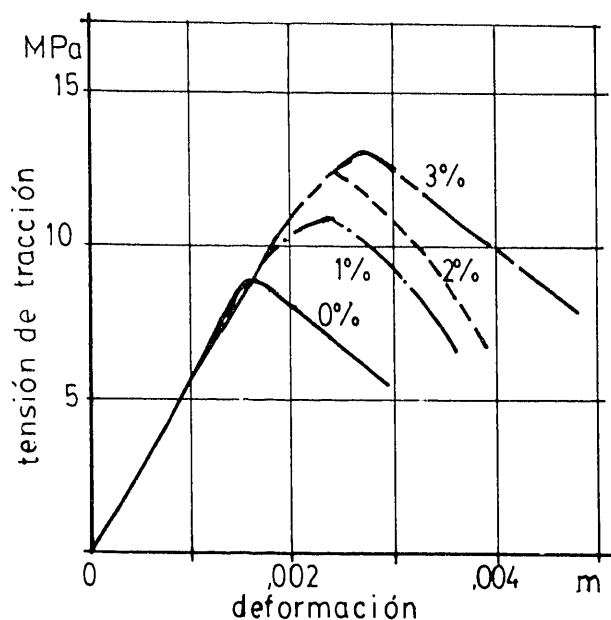


Fig. 5.—Diagrama para fibras de acero.

Las condiciones de estos ensayos son análogas a las del ensayo a compresión, efectuándose según la especificación C-496-71 de las normas ASTM.

Cuando se emplean fibras de acero se producen sucesivos incrementos de la tensión máxima al aumentar el porcentaje de fibras. Algunos autores han querido dar a esta relación un

sentido lineal, aunque realmente pierden validez sus expresiones al no limitar el porcentaje máximo de fibras y no tener en cuenta factores como la orientación, doblado, adherencia, etcétera.

En cuanto a las fibras de vidrio, el incremento que se produce en la tensión máxima es más pequeño. Claramente la resistencia a la tracción es un fenómeno muy relacionado con la adherencia de las fibras al hormigón (21), de tal manera que al aumentar factores como la longitud de las fibras, tal y como ya vimos en el capítulo anterior, se producen mayores resistencias. Como antes, ocurre que la resistencia a la tracción aumenta con el porcentaje de fibras, de forma que diversos autores parecen estar de acuerdo que esta correlación (6) se mantiene hasta un porcentaje en volumen del 6 por 100. Es conveniente, para terminar, hacer notar que se produce un notable aumento del valor de la resistencia en el colapso para las fibras de vidrio, con las mismas consecuencias que para la resistencia a compresión.

5.1.3. Resistencia a flexión

Acerca de la resistencia a la flexión del hormigón reforzado con fibras se han realizado muchos estudios, destacando los de Johnston, Swamy, Lankard y Edgington. Todos estos autores vienen a afirmar que los principales factores que afectan a la resistencia a la flexión son:

- Porcentaje de las fibras V_f .
- Esbeltez (longitud/diámetro) de las fibras cuya influencia, como ya vimos anteriormente, se puede expresar según la fórmula:

$$\sigma_c = A \sigma_m (1 - V_f) + B V_f \frac{L}{D}$$

Analizando la ecuación se aprecia que un aumento de los parámetros anteriores origina una mayor resistencia a la flexión.

Otros parámetros también importantes son:

- La orientación de las fibras.
- La adherencia de las fibras a la matriz.

La forma de estudiar y mejorar estos factores ya la hemos visto en capítulos anteriores, aunque es conveniente puntualizar que según los

ensayos realizados con hormigón sin retracción (23) se demuestra que un control de la retracción se traduce en una mayor adherencia entre las fibras (rectas, principalmente) y la matriz, ya que como consecuencia de la retracción aparecen microfisuras en el contorno de las fibras.

Intentando mejorar la adherencia se tiende al empleo de fibras conformadas, notándose en este caso muy poco la acción del hormigón sin retracción.

Una vez vistos los principales factores que influyen en la resistencia a la flexión y teniendo en cuenta el comportamiento mecánico del hormigón con fibras, podemos analizar los resultados obtenidos mediante ensayos sobre probetas de 76 — 76 — 360 mm., con las mismas condiciones que los ensayos anteriores y bajo la especificación C78-75 de las normas ASTM.

En estos ensayos sólo se varía el porcentaje en volumen de las fibras, pero nos sirven perfectamente para apreciar el comportamiento de estos materiales, pues no pretendemos hacer un estudio exhaustivo de la influencia de todos los factores, para lo cual remitimos al lector a la bibliografía apuntada. Los resultados obtenidos se pueden apreciar en las figuras 6 y 7.

Se observa que para fibras de acero el punto de primera fisura corresponde a un 80-85 por ciento de la tensión de rotura cuando las fibras son rectas, y, aproximadamente, a un 60-70 por ciento cuando las fibras son conformadas (ensayos representados en los gráficos). Los valores que corresponden a las tensiones son mucho más sensibles a la técnica de compactación que en el caso del hormigón normal.

Hay que destacar que los incrementos de tensión hasta la rotura son menores para el caso de fibra de vidrio; sin embargo, y tal y como ya se destacó en la resistencia a compresión, se produce una mayor deformación en la pieza hasta el instante del colapso, lo que implica una mayor capacidad de absorción de energía hasta la rotura.

Finalmente, hay que destacar que toda mejora de la resistencia a la flexión es consecuencia de una buena dosificación de fibras (13), así como de una adecuada proporción de finos y gruesos (mucho árido grueso disminuye la ad-

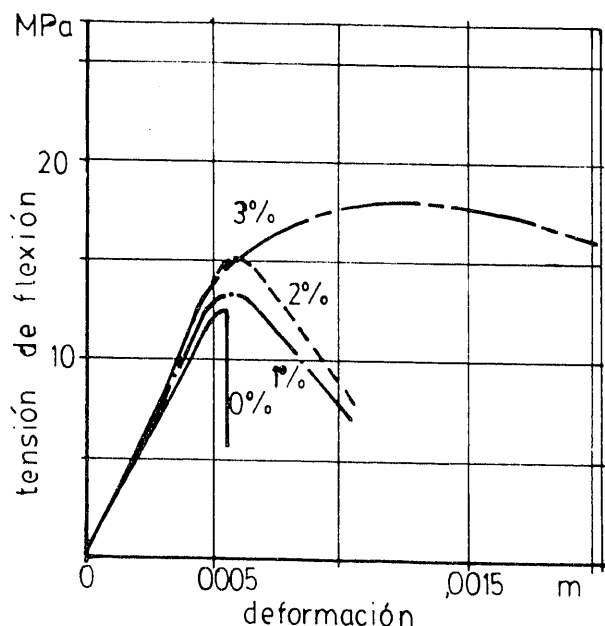


Fig. 6.—Diagrama para fibras de acero.

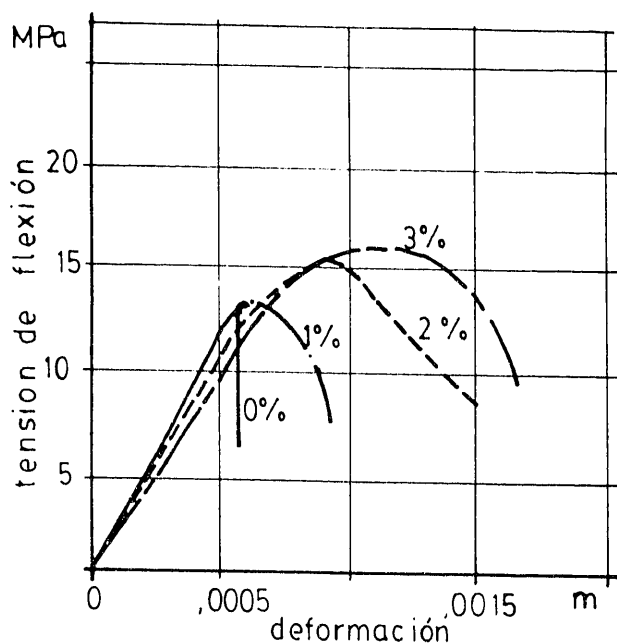


Fig. 7.—Diagrama para fibras de vidrio.

herencia), de la relación agua/cemento (hay un óptimo para lograr la máxima adherencia) y de la resistencia a la flexión y a compresión de la matriz. En cuanto a las fibras de vidrio, otro parámetro a considerar es la utilización de resinas epoxy, que, como ya vimos, aumenta la adherencia (en un 200 por 100) y la tensión de primera fisura (8) en un 20 por 100.

5.1.4. Resistencia a la torsión

Los principales factores que influyen en la resistencia a la torsión del hormigón reforzado con fibras son (24):

- El porcentaje de fibras en la mezcla.
- El espaciamiento entre las fibras.
- La esbeltez de las fibras (L/D).

La resistencia crece de forma lineal con el porcentaje de fibras, pero para pequeños aumentos de ésta se producen aumentos considerables en la deformación de rotura. Efecto contrario produce la separación entre las fibras, pues es inversamente proporcional al aumento de la resistencia.

La influencia de la esbeltez es tal que un aumento, a diámetro constante, de la longitud de las fibras origina aumentos en la resistencia y deformación de rotura.

Como conclusión de lo anterior resulta que la tensión tangencial por torsión resistida y, por tanto, el máximo valor del momento torsor varía casi linealmente con el coeficiente LP/d (donde P es el porcentaje de fibras). En la rotura se puede obtener un alto valor del momento torsor gracias a la presencia de las fibras (6).

5.1.5. Resistencia a esfuerzos cortantes

No se ha estudiado en profundidad este tema, pero los datos de que se dispone indican un aumento importante de la resistencia, lo cual se traduce en la posibilidad del empleo de las fibras de acero como elementos sustitutos de estribos en vigas u otros elementos. No obstante, sería muy conveniente profundizar en este estudio, pues de resultar ciertos los datos anteriores estaríamos ante una alternativa económica al empleo de estribos de hormigón armado.

5.2. Comportamiento frente a esfuerzos dinámicos

El hormigón reforzado con fibras absorbe una gran cantidad de energía durante la fractura bajo cargas dinámicas. Las principales causas del aumento de esta energía (6) son debidas a:

- La adherencia fibra matriz.
- Fluencia y fractura de las fibras.
- Apertura de grietas.

El corto tiempo de aplicación de las cargas o de la variación de éstas no permite una adecuada redistribución de esfuerzos, por lo que los resultados obtenidos de diferentes ensayos y solicitaciones resultan bastante dispersos. No obstante, se aprecia (26) que porcentajes elevados de fibras aumentan poco la resistencia a impactos con relación a bajos contenidos, y que con el hormigón reforzado con fibras se logran resistencias seis veces o más superiores a las del hormigón normal.

En el caso de fibras de nylon y con solicita-

ciones por cargas explosivas se ha estudiado el porcentaje óptimo de aplicación, que resulta estar entre el 0,5 y el 1 por 100 en volumen.

En cuanto a la energía absorbida, en la figura 8 se puede apreciar la comparación con el hormigón normal de los resultados obtenidos con el péndulo de Charpy modificado, para probetas de 100 — 100 — 500 mm. (6) con una luz de 400 mm. (figura 8).

La energía ha sido obtenida por integración de la curva carga-tiempo y se puede apreciar lo siguiente:

- Ambos gráficos presentan en el diagrama de la carga un máximo absoluto similar para $T = 75 \cdot 10^{-6}$ seg.

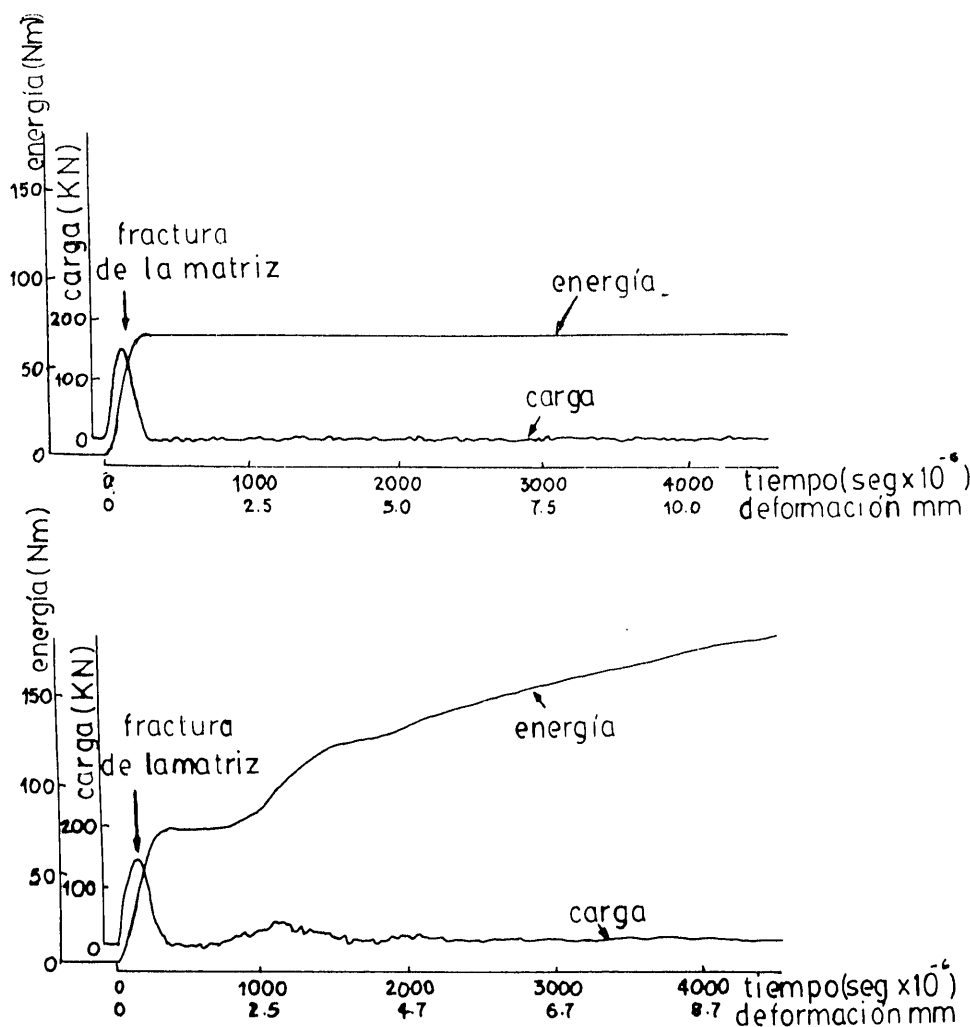


Figura 8.

- El hormigón reforzado con fibras presenta un máximo relativo para aproximadamente $t = 1.000 \times 10^{-6}$ seg., debido a las causas apuntadas al principio de este apartado.

Este segundo máximo, inexistente en el hormigón normal, es el que contribuye al gran aumento de la energía absorbida en la fractura, tal y como muestra la curva de energía.

De este comportamiento del hormigón con fibras surgen una gran cantidad de aplicaciones que se estudiarán más adelante.

5.3. Comportamiento frente a la fatiga

Se han realizado muy diversos tipos de ensayos para analizar este comportamiento, no siendo muchas veces posible comparar los resultados, pues existen factores tales como el tamaño de las vigas a ensayar, condiciones de sollicitaciones y el criterio de rotura a fatiga que impiden llevar a cabo este propósito.

No obstante, por lo general se puede apreciar (19) un incremento de la resistencia a fatiga con el incremento de fibras. Además, se ha comprobado un aumento del 10 al 13 por 100 en la resistencia para aquellas piezas que han tenido una historia anterior de cargas, pudiendo explicarse esto por la reducción de las tensiones de retracción, por escurrimiento plástico de la pieza, etcétera.

El hormigón con fibras también ha sido ensayado a la fatiga con carga de compresión por Ranney y McCabe (27), quienes usaron fibras de 12.5 mm. de longitud y 0,15 mm. de diámetro, con una proporción del 2 por 100 en volumen, apreciando que no existe una aparente diferencia con el hormigón normal.

5.4. Comportamiento frente a otras acciones

5.4.1. Abrasión

Según ensayos de laboratorio del United States Steel Corporation (19), en los que se utilizó hormigón con fibras de acero con porcentajes en volumen de fibras del 2,5 por 100, y hormigón normal y empleando el método de desgaste NBS modificado, resulta para el hormigón con

fibras un desgaste del 27 por 100 menor que el del hormigón normal, midiéndolo como pérdida de espesor de la placa de ensayo. La abrasión y la erosión de las superficies de ensayo fueron simulados con el chorro de arena y rueda con cepillo de acero.

5.4.2. Fricción y resistencia al deslizamiento

Los resultados obtenidos de fricción para superficies secas de hormigón (con o sin fibras) demuestran que el deterioro de la superficie (19) es independiente del contenido de fibras. Sin embargo, las resistencias al deslizamiento y a la rodadura sobre superficies con abrasión y erosión provocadas son aproximadamente un 15 por 100 mayores en el hormigón con fibras respecto al hormigón normal, bajo condiciones de humedad, sequedad y helada.

5.5.3. Comportamiento frente al calor

Al aumentar la cantidad de armadura (acero) de un hormigón, provocamos una mayor desigualdad de la dilatación térmica de las distintas partes que integran la mezcla, lo que provoca pérdidas de adherencia y microfisuras en el contorno de las fibras. Por lo general, las estructuras sometidas a sollicitación térmica presentan también exigencias mecánicas y de durabilidad, por lo que el empleo de fibras de bajo coeficiente de dilatación térmica (fibras de vidrio, polipropileno) muchas veces no resulta posible, por lo que resulta aconsejable utilizar fibras de acero inoxidable que conserven sus características hasta temperaturas muy altas. La adición de fibras al hormigón refractario sometido a temperaturas altas y fuertes choques térmicos permite alargar de forma importante la vida del hormigón.

6. APLICACIONES

Una vez estudiadas las propiedades mecánicas del hormigón reforzado con fibras, las aplicaciones no son más que una consecuencia de los diferentes comportamientos que se obtienen.

En este capítulo vamos a analizar las aplicaciones de cada tipo de fibra, pues para proyectos similares se ha venido usando fibras de la

misma naturaleza, tendiendo hacia su uso específico para cada tipo. Finalmente, haremos mención a las principales aplicaciones que han tenido lugar en España.

6.1. Fibras de acero

Para el hormigón reforzado con fibras de acero y hormigonado "*in situ*", las principales aplicaciones son:

Pavimentos

Esta aplicación se encuentra perfectamente contrastada por ensayos en modelo reducido (6), dando lugar a una buena experiencia en el manejo de este material, así como la obtención de importantes datos para conocer su comportamiento (6, 28, 29).

Las propiedades más importantes en relación con esta aplicación son:

- Aumento de la resistencia a la flexotracción.
- Mejora de la ductilidad después de las primeras fisuras.
- Aumento de la resistencia al impacto y fatiga.
- Disminución del descascarillamiento del hormigón.
- Mejoras en la resistencia frente a la abrasión.
- Aumentos de las resistencias al deslizamiento y rodadura.

Así, la aplicación en pavimentos, bien solamente en las capas superficiales de rodadura, bien en todo el espesor, es el campo de mayor utilización del hormigón con fibras de acero. Hay importantes ejemplos, principalmente en Estados Unidos, tanto de carreteras y losas de puentes como en aeropuertos, pudiendo destacar entre ellos:

- Aeropuerto internacional de Tampa.
- Aeropuerto internacional de Las Vegas.
- Dos calles residenciales y avenidas en Cedar Rapids (Iowa) (1972).
- Realizaciones en Gante (Bélgica).
- Capa de rodadura del puente Dyckman Street (Nueva York).

Finalmente, es importante destacar una gran

aplicación asociada con los pavimentos, que es la reparación de juntas (debido a la gran resistencia al impacto).

Soleras industriales

Para factorías y para almacenes de todo tipo se han hecho investigaciones sobre las ventajas que presenta el empleo del hormigón con fibras de acero, principalmente por Industrial Flooring Services (Cheshire). Se han aplicado también las técnicas utilizadas en los pavimentos de carreteras. Se trata de un campo con grandes posibilidades, sobre todo en aquellos casos en que el pavimento pueda estar afectado por diferentes tipos de impactos.

Obras hidráulicas

Se han obtenido unos resultados muy esperanzadores en el uso del hormigón con fibras de acero frente a la cavitación y a la erosión producida por el agua, así como a los daños por impacto en estructuras hidráulicas, como:

- Aliviaderos de superficie.
- Embocadura de aliviadores de fondo.
- Muros de guía y muros de exclusas.

Minas, túneles y estabilización de taludes

Se han realizado diversas estabilizaciones de taludes de roca o de materiales sueltos mediante la utilización de morteros u hormigones con fibras de acero, aplicados mediante procesos de gunitado o torcretado.

La principal ventaja que presenta es la reducción de costos por la eliminación de la necesidad de sujetar la malla de refuerzo a la superficie de la roca, además de contornear mejor la superficie que en el caso de la utilización de mallas.

Las principales aplicaciones del hormigón armado con fibras de acero están en el campo de los elementos prefabricados.

Tapas de registro o pozos

Se emplean como elementos sustitutivos de los actuales, de hierro fundido o de hormigón.

Placas de pavimento

Otra aplicación importante es la utilización de placas prefabricadas para pavimentos, sopor-

tados por una estructura especial de acero. Un conocido ejemplo es el aparcamiento desmontable del aeropuerto Heathrow de Londres, donde fueron empleadas placas cuadradas de 1,1 metros de lado y 65 milímetros de espesor, con un 3 por 100 en peso de fibras de 0,25 mm. de diámetro y 22 mm. de longitud, con un tamaño máximo de árido de 10 mm.

Elementos sometidos a la acción de aguas marinas o agresivas de otro tipo

Se han hecho importantes aplicaciones en oleoductos submarinos y en gaviones para mantos de escollera (resistencia al impacto y a la corrosión). Otro uso considerado es el de la protección de pilares expuestos a la acción del agua salada (30) mediante el empleo de camisas prefabricadas de hormigón con fibras que se colocan alrededor de las pilas y se rellenan con un mortero de resina epoxy que elimine el agua y adhiera la camisa a la pila.

Tuberías

Se ha utilizado el hormigón con fibras para la fabricación por centrifugación de tuberías de gran diámetro que no estén sometidas a presiones elevadas.

Elementos refractarios

Una gran variedad de aplicaciones comerciales se han derivado de su gran resistencia a esfuerzos mecánicos y térmicos a temperaturas superiores a 1.500° C. Se utilizan fibras de acero inoxidable [con 18 por 100 de níquel y 8 por 100 de cromo (AISI 302), o bien 25 por 100 de níquel y 20 por 100 de cromo (AISI 314)].

Algunas aplicaciones ya realizadas:

- Soportes de lingotes de acero (1.100° C).
- Palas agitadoras de la colada de acero (1.500° C.)
- Recubrimiento refractario de hornos (industrias petroquímicas, acerías, cementeros, etcétera).
- Recubrimiento de perfiles de acero para aumentar la resistencia al fuego.

Estructuras sometidas a explosiones

Como resultado de la alta resistencia al im-

pacto del hormigón reforzado con fibras, se han llevado a cabo importantes realizaciones en el campo de la ingeniería militar (bunkers, polvorines, etc.), así como el de la industria en general (paneles protectores de depósitos de elementos altamente explosivos, etc.). Finalmente, y debido a esta misma característica, se está desarrollando en Europa el hormigón reforzado con fibras de acero en las estructuras de cajas fuertes.

Otras aplicaciones

Entre otras podemos citar: escaleras, cimientos y estructuras de máquinas, vigas para la construcción (aunque en este caso se emplean más las fibras de vidrio por su menor peso), etcétera.

6.2. Fibras de vidrio

El uso de las fibras de vidrio frecuentemente se reduce a elementos no estructurales o semiestructurales (como es el caso de encofrados permanentes o perdidos).

Antes de iniciar el estudio de las aplicaciones conviene hacer una reseña de las utilizaciones que se han llevado a cabo con fibras de vidrio de borosilicatos (E-glass). Se utilizaron por primera vez, en 1963, en la URSS, como material de cobertura en paneles de 6 m. de luz y 7 mm. de espesor y como impermeabilizante en depósitos de hormigón; en ambos casos fue utilizada con cemento aluminoso. Poco después fue empleada en Inglaterra para paneles de revestimiento, chimeneas, impermeabilizaciones, botes, casas flotantes sobre pontones, etcétera.

Sin embargo, su utilización se vio muy limitada por la necesidad de utilizar cemento aluminoso, y por las dudas existentes en cuanto a su durabilidad.

Los recientes avances, ya comentados, en la protección de las fibras del ataque de los álcalis han supuesto un relanzamiento en la utilización, fabricación industrializada y comercialización de este tipo de fibras.

Paneles de cerramiento

Estos paneles se obtienen mediante la pulverización de morteros de cemento sobre las fi-

bras, colocadas en moldes. Su espesor es de unos 6 a 9 mm., y su contenido de fibras es de un 5 por 100 en peso.

Se utilizan muy profusamente en todo el mundo, principalmente en Inglaterra. Por su trabajabilidad en fresco se puede moldear con facilidad, haciendo los paneles a gusto del proyectista. Hay importantes ejemplos de este uso: la sede de Credit Lyonnaise Bank, en Londres; la utilización en la remodelación del estadio Santiago Bernabeu, de Madrid (3), donde se utilizó para la fachada y cierres frontales, interior y exterior, de la marquesina del estadio. Como prueba de la gran manejabilidad y ligereza de estos elementos está el equipo utilizado: un soldador, un gruísta, un manipulador de la zona de acopios y dos en el lugar de colocación para aplomado, nivelación y alineación.

Encofrados perdidos

El cemento reforzado con fibras de vidrio posee una alta resistencia a flexotracción y al impacto. Estos factores son los que exigimos a un encofrado, por lo que su utilización resulta muy adecuada a la ingeniería civil, principalmente en aquellos casos en que necesitamos unos encofrados de muy ligero peso o de formas caprichosas difíciles de conseguir, y costosas con los materiales convencionales.

Pequeños elementos

Por su gran trabajabilidad y ligereza y con procedimientos de extrusión o inyección en moldes, se pueden obtener diversos productos sustitutivos de los convencionales de madera, hierro, fibrocemento o plástico. Algunos ejemplos son: postes de cercas, paletas, estructura de puertas o ventanas, puertas incombustibles, cunetas de drenaje, tuberías, paneles de techos, cubiertas para máquinas, barreras de ruido, señalización urbana, y manos y tapas de conductos de gas.

Aplicaciones hidráulicas y marinas

En Holanda se ha utilizado en el tablestacado de revestimiento de canales. También se utiliza en diques flotantes, casas flotantes sobre pontones y cascos de barcos, formados por dos capas de 10 mm. de espesor, separados por espuma de poliuretano rígida.

6.3. Aplicaciones en España

Fibras de acero

- Capa de rodadura del tablero del puente del nudo de comunicaciones de Vía Favencia (Barcelona).
- Pavimento de entrada en las nuevas explotaciones de las minas de Almadén.
- 45.000 m² de pavimento en la estación de distribución de mercancías por carretera de Oviedo.
- Pruebas de gunitado en las minas de Almadén y túneles de FEVE.
- Muros y almacén para un almacén de radioisótopos en Madrid.
- Soleras para las naves-talleres de la Compañía Metropolitana de Madrid.
- Canales y arquetas de distribución de una piscifactoría en Oña (Burgos).
- Diversos pavimentos industriales de mataderos e industrias afines.
- Reparaciones en los aeropuertos de Málaga y Palma de Mallorca.
- Construcción mediante encofrados, túnel de una promoción de viviendas en San Sebastián de los Reyes (Madrid), por Dragados y Construcciones, S. A. (un total de 150 viviendas, y se utilizaron fibras de acero galvanizadas).
- Complejo Hidráulico de Mocalets (Lérida): construcción de una losa de hormigón para la ubicación de diversos servicios para la obra.
- Naves-talleres de los centros penitenciarios de Lugo y Valladolid.
- Helipuerto en Albacete.
- Pruebas para la utilización en el ciclón de una fábrica de Portland Valderribas (hormigón refractario con fibras galvanizadas).
- Aplicaciones militares de diverso tipo.

Fibras de vidrio

Utilizada en paneles de cerramiento de fachadas en diversos edificios (estadio Santiago Bernabeu, edificio Adriática de la Plaza de Emilio Castelar de Madrid, etcétera).

7. CONCLUSIONES

La utilización de materiales fibrosos para el refuerzo de materiales frágiles o quebradizos se remonta a los albores de la Humanidad. Desde el principio de este siglo, y en especial en los últimos veinte años, el estudio de este tipo de materiales ha adquirido carácter científico y, hoy en día, ha alcanzado un grado importantísimo de industrialización y comercialización.

Este material ha venido a ocupar un vacío existente entre el hormigón en masa y el hormigón armado convencional, que anteriormente era cubierto con menos posibilidades y ventajas por otras armaduras ligeras, de tipo mallazo.

Las fibras controlan el crecimiento de las grietas y microfisuras internas del hormigón. La resistencia de las fibras a tracción da lugar a un incremento importante de la resistencia a flexotracción. Evitan la rotura brusca y tienen una gran capacidad de absorción de energía hasta la rotura. Sus resistencias al impacto, a la fatiga y a la erosión son importantes.

Hoy se considera que el aspecto y el volumen de fibras son los parámetros que mayor influencia tienen en el comportamiento de este tipo de hormigones.

Las fibras de vidrio tuvieron problemas de durabilidad en sus comienzos, debido a su alto grado de atacabilidad por los álcalis del cemento Portland. Hoy en día, estos problemas se han superado, utilizando compuestos químicos resistentes a este tipo de corrosión.

La baja adherencia que presentan las fibras de acero se ha resuelto utilizando fibras conformadas. Su puesta en obra requería procedimientos especiales que permitiesen el mezclado sin apilotamiento ni segregación de las fibras. El encolado de estas fibras en peines de bajo aspecto, que se dispersan durante el amasado, ha solventado con éxito esta cuestión.

Actualmente, estos dos tipos de fibras, acero y hormigón, son las más utilizadas, observándose una clara diversificación de sus aplicaciones, empleándose las fibras de vidrio en elementos no estructurales o semiestructurales, en las que su poco peso compense su mayor coste. Desarrollo importante están teniendo las fibras de polipropileno, una vez superados sus problemas de adherencia.

BIBLIOGRAFIA

1. J. P. ROMUALDI, y G. B. BATSON: «Mechanics of crack arrest in concrete». Proceeding ASCE, V. 89, EM 3, pp. 147-168, junio 1963.
2. J. P. ROMUALDI y J. A. MANDEL: «Tensile strenght of concrete affected by uniformly distributed closely spaces short lengths of wire reinforcement». ACI Journal, Proceeding. V. 61, num. 6, pp. 657-671, junio 1964.
3. A. BARROS; J. M. CABALLERO, y V. ZALCO: «Aplicaciones del cemento reforzado con vidrio». Informes de la Construcción 333-334-335-336, Instituto E. Torroja, 1982.
4. RILEM: «Fibre concrete materials». Rilem Technical Committee 19-FRC. Materiaux et Constructions, 56, marzo-abril, 1977.
5. R. HALSBERGE: «Fibras de acero Bekaert para el refuerzo del hormigón». Informe Bekaert, sep., 1981.
6. D. J. HANNANT: «Fibre cements and fibre concretes». John Wiley and Sons, Interscience Publication, 1978.
7. A. J. MAJUMDAR y J. F. RYDER: «Glass fiber reinforcement of cement products». Glass Technol, 9, 3, pp. 78-84, 1968.
8. N. C. KOTHARI y E. A. BONEL: «Strength properties of concrete reinforced with epoxy-coated steel fibers». J. Amer. Conc. Inst., 75, 10, pp. 350-553, 1978.
9. D. S. CAHN y cols.: «Durability of the fiber-glass-Portland cement composites». J. Amer. Concrete, 70, 3, pp. 187-189, 1973.
10. A. S. ARGON y cols.: «Refuerzo de morteros con fibra de vidrio y metálicas». J. Mater Science, 7, pp. 21-22, 1979.
11. A. STAGES y J. MINOR: «Hormigón reforzado con fibras anulares». Jour. Amer. Conc. Inst., pp. 78-32, septiembre-octubre, 1981.
12. A. D. FAIRWEATHER: «Use of polipropilene film fibers to increase impact resistance of concrete» Prospects for fiber reinforced construction material

- Proceedings of International Building and Exhibition Conference, BRS, Olympia, London, England, pp. 41-44, noviembre 1971
13. R. N. SWAMY: «The interfacial bond stress in steel cement composites». Cement and Concrete Research, V. 6, pp. 641-650, 1976.
 14. OV. RAMAKRISHNAN y cols.: «A comparative evaluation of concreta reinforced with straight steel fibers with deformed ends glued together in bundles». ACI Journal, mayo-junio, 1980.
 15. G. H. TATTERSHALL: «Bond strength in steel-fiber reinforced concrete». Mag. of Concrete Research 87, pp. 105-113, junio, 1974.
 16. M. SNYDER y D. LANKARD: «Factors affecting cracking strength of steel fibers concrete». ACI Journal, V. 60, 7, pp. 863-867, julio, 1963.
 17. D. C. McKEE: «The properties of an expansive cement mortar reinforced with random wire fibers». Ph D Thesis, University of Illinois, 1969.
 18. M. FERNANDEZ CANOVAS y A. GUERRERO ARANTEVE: «Hormigones de fibra de acero». Asinto núm. 103, 1979.
 19. ACI Committee: 544 «State-of-the art report or fiber reinforced concrete». ACI Journal, noviembre 1973
 20. «Steel fiber reinforced concrete. A review of the state of art». Batelle, Derd. Corporation, mayo, 1982
 21. T. W. BROCKENBROUGH y D. N. PATTERSON: «Fiber reinforced methacrylate polymer concrete». ACI Journal, 79, 33, 1982.
 22. B. P. ANGHEs y N. I. FATTUHI: Cement and Concrete Research. V. 7, pp. 173-184, 1977.
 23. B. K. PAUL, M. POLIVKA y P. K. MEHTE: «Properties of fiber reinforced shrinkage. Compensating concrete». ACI Journal, 78, 6, pp. 488-492, 1981.
 24. T. A. KAFFEZ KLANN y cols.: «An experimented study of fiber reinforced concrete beams under pure torsion». Ind. Concrete Journal, 50, 10, pp. 314-317, 1976
 25. R. F. ZOLLO y R. B. CAMPBELL: «Extrusion of glass fiber reinforced concrete mortars». ACI Journal, noviembre 1977.
 26. V. RAKRISHNAN, W. COYLE y cols.: «Perfomance characteristics of fiber reinforced concretes». ACI Journal 78, 5, pp. 388-394, 1981.
 27. M. R. RANNEY y P. J. McCABE: «Compression fatigue of FRC». Journal of Engineering. Mechanics Division. Americam Society of Civil Engineers, núm. EM 2, abril, 1974.
 28. ACI An International Simposium: «Fiber reinforced concrete». Amer. Concrete. Institute. Pubiicacion SP-44.
 29. D. R. LANKARD: «Fiber reinforced cement based composites». Amer. Ceram. Soc. Bull. 54, 3, pp. 272-276, 1975.
 30. D. W. SCHEFFEL: «Repair of piles using fiber reinforced jackets». Concrete International, marzo, 1982.
 31. J. A. SANCHEZ REY: «Los hormigones reforzados con fibras». Revista de Obras Públicas, febrero, 1978.

Diego Prado Pérez-Seoane



Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la Universidad Politécnica de Madrid en la especialidad de Transportes. Promoción 1983. Ha realizado estudios como «Los faros en la provincia de Vizcaya» o «La reutilización de aguas residuales». Desde agosto de 1983 participa, con Agromán, en la construcción del grupo 2 de la Central Térmica de Aboño (Asturias).

Fernando Rodríguez López



Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la Universidad Politécnica de Madrid en la especialidad de Cimientos y Estructuras. Promoción 1983. Desde octubre de 1983 es colaborador de la Cátedra de Edificación y Prefabricación de la Escuela de Caminos de Madrid. Desde enero de 1984 está en posesión de una beca del Plan de Formación de Personal Investigador en

España, realizando su tesis doctoral sobre «Investigación experimental de las longitudes de anclaje de las armaduras de los pilares de hormigón armado en los cimientos», bajo la dirección del doctor ingeniero don José Calavera Ruiz.