

Capítulo 7

Fibras

Las fibras fueron usadas como material de construcción por muchos siglos. En las últimas tres décadas hubo un crecimiento por el interés en el uso de fibras en concreto premezclado, concreto prefabricado y concreto lanzado (hormigón proyectado, gunitado). Las fibras de acero, plástico, vidrio y materiales naturales (celulosa de madera) están disponibles en una amplia variedad de formas, tamaños y espesor; pueden ser cilíndricas, llanas, onduladas (rizadas) y deformadas con longitud típica de 60 mm a 150 mm (0.25 pulg. a 6 pulg.) y espesor variando de 0.005 mm a 0.75 mm (0.0002 pulg. a 0.03 pulg.) (Fig. 7-1). Las fibras se añaden al concreto durante el mezclado. Los factores principales que controlan el desempeño del material compuesto son:

1. Propiedades físicas de las fibras y de la matriz
2. Resistencia de adherencia entre la fibra y la matriz

A pesar de que los principios básicos gobernantes en los refuerzos convencionales y en los sistemas con fibras son los mismos, hay varias características que los diferencian:

1. Las fibras se distribuyen aleatoriamente por toda la sección transversal, mientras que las barras de refuerzo o armadura se ponen sólo donde son necesarias



Fig. 7-1. Se pueden usar en concreto fibras de acero, de vidrio, sintéticas y naturales, con diferentes longitudes y formas. (IMG12412)

2. La mayoría de las fibras son relativamente cortas y poco espaciadas si son comparadas a las barras continuas de refuerzo
3. Generalmente no es posible lograrse la misma relación de área de refuerzo- área de concreto con el uso de fibras si es comparado a la red de refuerzo con barras.

Las fibras se adicionan al concreto normalmente en bajos volúmenes (frecuentemente menos del 1%) y han mostrado eficiencia en el control de la fisuración por contracción (retracción).

En general, las fibras no alteran considerablemente la contracción libre del concreto, pero, si son empleadas en cantidades adecuadas, pueden aumentar la resistencia al agrietamiento (fisuración) y disminuir la abertura de las fisuras (Shah, Weiss e Yang 1998).

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE FIBRAS

Las fibras se distribuyen aleatoriamente por la sección transversal del concreto. Por lo tanto, muchas fibras se localizan inadecuadamente con relación a la resistencia a los esfuerzos de tensión (tensión de tracción) resultantes de las cargas aplicadas. Dependiendo del método de fabricación, la orientación aleatoria puede ser bi-dimensional (2-D) o tri-dimensional (3-D). Normalmente el método de rociado promueve una orientación 2-D de las fibras, mientras que los métodos de producción con mezcladoras promueven una orientación 3-D. Además, se pueden observar que muchas fibras cruzan las fisuras con ángulos diferentes de 90° o pueden tener una longitud embebida (anclaje) menor que la necesaria para el desarrollo de una unión fibra-matriz adecuada. Así, apenas un pequeño porcentaje del contenido de fibras puede resistir eficientemente a las tensiones de tracción (esfuerzo de tensión) o flexión. Los “factores de eficiencia” pueden ser tan bajos cuanto 0.4 para la orientación 2-D y 0.25 para la orientación 3-D. El factor de eficiencia depende de la longitud

de la fibra y de la longitud crítica embebida. Del punto de vista conceptual, el refuerzo con fibras no es un método altamente eficiente para la obtención de la resistencia del compuesto.

Los concretos con fibras son más adecuados para el uso en secciones muy delgadas, donde la correcta colocación de la armadura (refuerzo) convencional sería extremadamente difícil. Además, el concreto con fibras rociado es ideal para la fabricación de productos con formas irregulares. Se puede disminuir considerablemente el peso con el uso de secciones relativamente delgadas de concreto con fibras, las cuales poseen resistencia equivalente a secciones mucho más gruesas de concreto reforzado (armado) convencional.

TIPOS Y PROPIEDADES DE FIBRAS Y SU EFECTO EN EL CONCRETO

Fibras de Acero

Las fibras de acero cortas son pequeños pedazos discontinuos de acero con un aspecto o esbeltez (relación entre longitud y diámetro) que varía entre 20 y 100 y con muchas secciones transversales. Algunas fibras de acero tienen extremos conformados para mejorar la resistencia al arrancamiento de la matriz a base de cemento (Fig. 7-2).

La norma ASTM A 820 clasifica las fibras de acero en cuanto a su manufactura en cuatro tipos: Tipo 1 – las fibras de alambre conformadas en frío son las más fácilmente encontradas en el mercado, fabricadas de alambre de acero conformado. Tipo II – las fibras cortadas de chapas se fabrican como el propio nombre dice: las fibras de acero se cortan de las chapas de acero. Tipo III – las fibras extraídas de fundición, las cuales se fabrican por técnicas relativamente complicadas donde una rueda en rotación

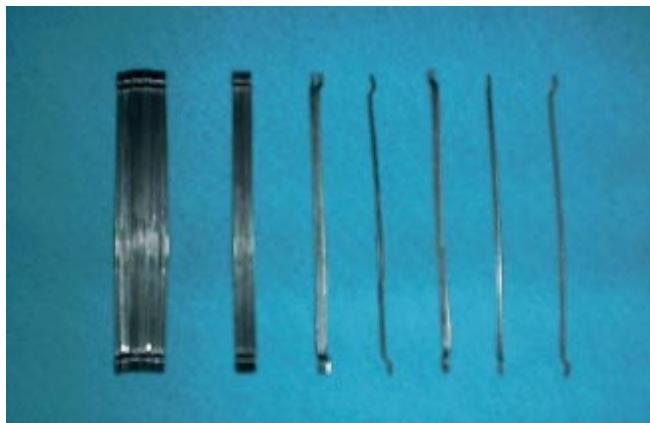


Fig. 7-2. Las fibras de acero con extremos conformados se pegan para formar haces que facilitan el manejo y el mezclado. Durante el mezclado, los haces se separan en fibras individuales. (IMG12411)

se usa para levantar el metal líquido de una superficie de metal fundido, a través de la acción de capilaridad. El metal fundido extraído se congela rápidamente en forma de fibras y se quita de la rueda por la fuerza centrífuga. Las fibras resultantes tienen una sección transversal en forma de medialuna. Tipo IV – otras fibras. Para las tolerancias de longitud, diámetro y esbeltez, bien como las resistencias a tracción (tensión) mínimas y los requisitos a flexión, consulte la ASTM A 820.

Los volúmenes de fibras de acero usados en concreto normalmente varían del 0.25% al 2%. Volúmenes mayores que 2% generalmente reducen la trabajabilidad y la dispersión de las fibras y requieren un diseño especial de las mezclas o técnicas especiales de colado.

La presencia de las fibras afecta ligeramente la resistencia a compresión. La adición del 1.5% (en volumen) de fibras de acero puede aumentar la resistencia a tracción directa hasta 40% y la resistencia a la flexión hasta 150%.

Las fibras de acero no afectan la contracción (retracción) libre. Las fibras de acero retardan la fractura del concreto restringido durante la contracción y mejoran la relajación de tensiones por el mecanismo de fluencia (Altoubat y Lange 2001).

La durabilidad del concreto reforzado con fibras de acero depende de los mismos factores que el concreto convencional. No se disminuye la resistencia a la congelación-deshielo con la adición de fibras de acero, siempre que haya incorporación de aire, se consolide correctamente el concreto y haya un ajuste de la mezcla para que pueda acomodar las fibras. Si se proporciona y coloca el concreto correctamente, va a ocurrir poca o ninguna corrosión de las fibras. Cualquier corrosión de las fibras en la superficie del concreto es sencillamente un problema de apariencia y no una condición estructural.

Las fibras de acero presentan módulo de elasticidad relativamente alto (Tabla 7-1). Se puede aumentar su adherencia o unión con la matriz de cemento a través del anclaje mecánico o de la rugosidad superficial. Las fibras están protegidas de la corrosión por la alta alcalinidad del ambiente en la matriz de cemento (ACI 544.1R-96).

Las fibras de acero se usan comúnmente en pavimentos de aeropuertos y en las capas de revestimiento de las pistas. También se usan en los tableros de puentes (cubiertas para puentes) (Fig. 7-3), pisos industriales y pavimentos de autopistas. El concreto con fibras de acero en estructuras sometidas al agua en alta velocidad han mostrado que pueden durar hasta tres veces más que las alternativas en concreto convencional. El concreto reforzado con fibras de acero se emplea en muchas aplicaciones de concreto prefabricado donde sea necesario un aumento de la resistencia al impacto o de la tenacidad. En los tanques sépticos, las fibras de acero sustituyen el refuerzo convencional.

Las fibras de acero también se usan ampliamente en el concreto lanzado (proyectado) en aplicaciones de capas

Tabla 7-1. Propiedades de Tipos de Fibras Seleccionadas

Tipo de fibra	Masa específica relativa	Diámetro, μm (0.001 pulg.)	Resistencia a tracción, MPa [kg/cm ²] (ksi)	Módulo de elasticidad, MPa [kg/cm ²] (ksi)	Deformación en la rotura, %
Acero	7.80	100-1000 (4-40)	500-2600 [5,100-27,000] (70-380)	210,000 [2100,000] (30,000)	0.5-3.5
Vidrio E	2.54	8-15 (0.3-0.6)	2000-4000 [20,000-41,000] (290-580)	72,000 [730,000] (10,400)	3.0-4.8
RA	2.70	12-20 (0.5-0.8)	1500-3700 [15,000-38,000] (220-540)	80,000 [820,000] (11,600)	2.5-3.6
Sintética Acrílica	1.18	5.17 (0.2-0.7)	200-1000 [2,000-10,000] (30-145)	17,000-19,000 [170,000-190,000] (2,500-2,800)	28-50
Aramida	1.44	10-12 (0.4-0.47)	2000-3100 [20,000-32,000] (300-450)	62,000-120,000 [630,000-1220,000] (9,000-17,000)	2-3.5
Carbón	1.90	8-9 (0.3-0.35)	1800-2600 [18,000-27,000] (260-380)	230,000-380,000 [2300,000-3900,000] (33,400-55,100)	0.5-1.5
Nylon	1.14	23 (0.9)	1000 [10,000] (140)	5,200 [53,000] (750)	20
Poliéster	1.38	10-80 (0.4-3.0)	280-1200 [2900-12,000] (40-170)	10,000-18,000 [100,000-180,000] (1,500-2,500)	10-50
Polietileno	0.96	25-1000 (1-40)	80-600 [800-6100] (11-85)	5,000 [50,000] (725)	12-100
Polipropileno	0.90	20-200 (0.8-8)	450-700 [4600-7100] (65-100)	3,500-5,200 [36,000-53,000] (500-750)	6-15
Natural Celulosa de madera	1.50	25-125 (1-5)	350-2000 [3600-20,000] (51-290)	10,000-40,000 [100,000-400,000] (1,500-5,800)	
Sisal			280-600 [2900-6100] (40-85)	13,000-25,000 [130,000-250,000] (1,900-3,800)	3.5
Coco	1.12-1.15	100-400 (4-16)	120-200 [1200-2000] (17-29)	19,000-25,000 [190,000-250,000] (2,800-3,800)	10-25
Bambú	1.50	50-400 (2-16)	350-500 [3600-5100] (51-73)	33,000-40,000 [340,000-410,000] (4,800-5,800)	
Yute	1.02-1.04	100-200 (4-8)	250-350 [2500-3600] (36-51)	25,000-32,000 [250,000-330,000] (3,800-4,600)	1.5-1.9
Pasto elefante		425 (17)	180 [1800] (26)	4,900 [50,000] (710)	3.6

Adaptado de PCA (1991) y ACI 544.1R-96.

delgadas, especialmente en la estabilización de la inclinación de rocas y revestimiento de túneles. El humo de sílice y los acelerantes han permitido que se coloque el concreto lanzado en capas más espesas. El humo de sílice reduce la permeabilidad del concreto lanzado (Morgan 1987). El concreto lanzado con fibras de acero se ha empleado con altos volúmenes de fibras (hasta 2%) con éxito.

El concreto con fibras impregnadas por lechada (SIFCON) con volúmenes de hasta 20% de fibras se ha usado desde finales de los años 70. El concreto impregnado por lechada se puede emplear para producir un componente o una estructura con resistencia y ductilidad mucho mayores que las encontradas en el concreto convencional y en concreto lanzado. El concreto con fibras impregnadas por lechada (SIFCON) no es barato y nece-



Fig. 7-3. Tablero de puente (cubiertas para puentes) con fibras de acero. (IMG12410)

sita de ajuste minucioso, pero aún mantiene su potencial para las aplicaciones expuestas a condiciones severas y que requieran alta resistencia y tenacidad. Estas aplicaciones incluyen estructuras resistentes al impacto y a la explosión, refractarios, muros de protección (contención, atraque) y reparaciones de pavimentos y pistas (Fig. 7-4). La Tabla 7-2 presenta las proporciones de las mezclas de este material.



Fig. 7-4. Haces de fibras de acero se ponen en la cimbra (encofrado), antes que la pasta de cemento se derrame en esta aplicación de concreto con fibras de acero impregnadas por lechada. (IMG12409)

Tabla 7-2. Diseño de Mezcla del SIFCON

Cemento	1000 kg/m ³ (1686 lb/yd ³)
Agua	330 kg/m ³ (556 lb/yd ³)
Arena siliciosa ≤ 0.7mm (≤ 0.028 pulg.)	860 kg/m ³ (1450 lb/yd ³)
Lechada de sílice	13 kg/m ³ (1.3 lb/yd ³)
Reductor de agua de alto rango	35 kg/m ³ (3.7 lb/yd ³)
Fibras de acero (cerca de 10% vol.)	800 kg/m ³ (84 lb/yd ³)

Fibras de Vidrio

La primera investigación sobre fibras de vidrio a principio de los años 60 usó vidrio convencional de borosilicato (fibras de vidrio-E) (Tabla 7-1) y fibras de vidrio de sílice-cal-soda (fibra de vidrio-A). Los resultados de las pruebas mostraron que la reactividad entre las fibras de vidrio-E y la pasta de cemento reduce la resistencia del concreto. El avance de las investigaciones ha resultado en la creación de las fibras de vidrio resistentes a álcalis (Fibras de vidrio RA) (Tabla 7-1), las cuales aumentaron la durabilidad a largo plazo, pero fueron observadas otras fuentes de pérdida de resistencia. Una fuente conocida es la rigidización de los filamentos por la infiltración de partículas de hidróxido calcio (producto de la hidratación del cemento) entre los haces de fibras. La reactividad con los álcalis y la hidratación del cemento son la base para las dos teorías más aceptadas sobre la pérdida de la resistencia y de la ductilidad, principalmente en concreto reforzado con fibras de vidrio en áreas externas:

- El ataque de las fibras de vidrio por álcalis reduce la resistencia a tensión (tracción) de las fibras y, consecuentemente, baja la resistencia a compresión.
- El proceso de hidratación del cemento promueve la penetración de partículas de hidróxido de calcio en los haces de fibras, aumentando la resistencia de adherencia entre fibra y matriz y la rigidez, siendo que ésta última disminuye la resistencia a tensión por inhibir el arrancamiento de la fibra.

Las modificaciones de las fibras con intención de aumentar la durabilidad comprende: (1) revestimientos químicos especialmente formulados para ayudar en el combate de la rigidización inducida por la hidratación, y (2) uso de una lechada con humo de sílice dispersa para rellenar los vacíos entre las fibras, reduciendo la capacidad de infiltración del hidróxido de calcio.

Japón ha desarrollado un cemento con bajo contenido de álcalis, que no produce hidróxido de calcio durante su hidratación. Ensayos acelerados del concreto producido con este cemento y reforzado con fibras de vidrio resistentes a álcalis han logrado mucho más durabilidad que otros tipos de cemento.

Se puede usar la metacaolinita en concretos reforzados con fibras de vidrio sin afectar considerablemente la resistencia a flexión, la deformación, el módulo de elasticidad y la tenacidad (Marikunte, Aldea, Shah 1997).

La mayor aplicación del concreto reforzado con fibras de vidrio es la producción de paneles de fachada (Fig. 7-5). Otras aplicaciones se presentan en PCA (1991).



Fig. 7-5. (Superior) Los paneles de concreto reforzado con fibras de vidrio son ligeros y suficientemente fuertes para reducir los requisitos estructurales de este edificio. (Inferior) La fabricación por rociado ha facilitado sus perfiles curvados (IMG12404, IMG12327)

Fibras Sintéticas

Las fibras sintéticas son las fibras que se fabrican por el hombre y son resultado de la investigación y el desarrollo de las industrias petroquímicas y textiles. Los tipos de fibras usadas en concreto son: acrílicas, aramida, carbón, nylon, poliéster, polietileno y polipropileno. La Tabla 7-1 resume la variación en las propiedades físicas de estas fibras.

Las fibras sintéticas pueden reducir la contracción (retracción) plástica y consecuentemente la fisuración y pueden ayudar al concreto después que se fisura. La capa ultra delgada de concreto (whitetopping ultra delgado) normalmente usa fibras sintéticas para la contención potencial de las propiedades para retardar el desarrollo de baches. Los problemas asociados con fibras sintéticas incluyen: (1) baja adherencia fibra-matriz; (2) pruebas de desempeño no concluyentes para volúmenes bajos de fibras de polipropileno, polietileno, poliéster y nylon; (3)

bajo módulo de elasticidad de las fibras de polipropileno y polietileno y (4) el alto costo de las fibras de carbón y aramida.

Las fibras de polipropileno (Fig. 7-6), las más populares de las fibras sintéticas, son químicamente inertes, hidrofóbicas y ligeras (livianas). Se producen como monofilamentos cilíndricos continuos que se pueden cortar en longitudes específicas o como filmes y cintas. Estas fibras se componen de finas fibrillas de sección transversal rectangular (Fig. 7-7).

Usadas en un volumen mínimo de 0.1% del volumen del concreto, las fibras de polipropileno reducen la fisuración (agrietamiento) por contracción (retracción) plástica y disminuyen el agrietamiento (fisuración) sobre la armadura de acero (Suprenant y Malish 1999). La presencia de las fibras de polipropileno en el concreto puede reducir el revenimiento (asentamiento) o la sedimentación de las partículas de agregados, así, reduciendo los canales capilares de sangrado (exudación). Las fibras de polipropileno pueden reducir el descascamiento del concreto



Fig. 7-6. Fibras de polipropileno. (IMG12189)



Fig. 7-7. Las fibras de polipropileno se producen como (izquierda) fibrillas finas con sección transversal rectangular o (derecha) monofilamentos cilíndricos. (IMG12403)

de alta resistencia y del concreto de baja permeabilidad expuesto al fuego en un ambiente con humedad.

Los nuevos desarrollos muestran que las fibras monofiladas son capaces de fibrillar durante el mezclado si son producidas con ambas resinas de polipropileno y polietileno. Los dos polímeros son incompatibles y tienden a separarse cuando son manipulados. Por lo tanto, durante el proceso de mezclado, cada fibra se convierte en una unidad con varias fibrillas en su extremo. Las fibrillas proporcionan una adherencia mecánica mejor que los monofilamentos convencionales. El gran número de finas fibrillas también reduce la fisuración por contracción (retracción) plástica y puede aumentar la ductilidad y la tenacidad del concreto (Trottier y Mahoney 2001).

Las fibras acrílicas se han mostrado como el sustituto más prometedor para las fibras de asbestos. Se usan en tabloncillos de cemento y en la producción de tejas, donde el volumen de fibras de hasta 3% puede producir un compuesto con propiedades mecánicas similares a aquéllas de los compuestos de asbesto-cemento. Los compuestos de concreto con fibras acrílicas exhiben alta tenacidad pos-fisuración y alta ductilidad. A pesar de que la resistencia a flexión de los concretos reforzados con fibras acrílicas sea menor que la de los compuestos de cemento-asbesto, aún es más que suficiente para muchas aplicaciones en construcción.

Las fibras de aramida tienen alta resistencia a tensión (tracción) y alto módulo de tensión (tracción). Las fibras de aramida son dos veces y media más resistentes que las fibras de vidrio E y cinco veces más resistentes que las fibras de acero. PCA (1991) presenta una comparación de las propiedades mecánicas de diferentes fibras de aramida. Además de las excelentes características de resistencia, las fibras de aramida también tienen excelente retención de resistencia hasta 160°C (320°F), estabilidad dimensional hasta 200°C (392°F), resistencia a fatiga estática y dinámica y resistencia a fluencia. La hebra de aramida está disponible con gran variedad de diámetros.

Las fibras de carbón se desarrollaron principalmente por sus propiedades de alta resistencia y módulo de elasticidad y propiedades de rigidez para la aplicación en la industria aeroespacial. Comparadas con la mayoría de las otras fibras sintéticas, la producción de las fibras de carbón es costosa y tiene desarrollo comercial limitado. Las fibras de carbón tienen alta resistencia a tensión (tracción) y alto módulo de elasticidad (Tabla 7-1). También son inertes a la mayoría de los productos químicos. Las fibras de carbón se producen normalmente en hebras que deben contener hasta 12,000 filamentos individuales. Las hebras comúnmente se dispersan antes de su incorporación en el concreto para facilitar la penetración de la matriz de cemento y maximizar la efectividad de la fibra.

Hay varios tipos de fibras de nylon en el mercado para uso en vestuario, muebles domésticos y aplicaciones industriales y textiles, pero hay sólo dos tipos de fibras de nylon para uso en concreto, el nylon 6 y el nylon 66. Las

fibras de nylon se tejen de los polímeros de nylon y se transforman a través de extrusión, estiramiento y calentamiento para formar una estructura de fibras orientada y cristalina. En aplicaciones en concreto, se tejen hilos de alta tenacidad (alta resistencia a tensión [tracción]) y estables a altas temperaturas y a la luz y, posteriormente, se cortan en pequeñas longitudes. Las fibras de nylon presentan tenacidad, ductilidad y recuperación de elasticidad buenas. El nylon es hidrófilo, con retención de humedad del 4.5%, que aumenta la demanda de agua en el concreto. Sin embargo, esto no afecta la hidratación y trabajabilidad del concreto con bajo contenido de fibras (del 0.1% al 0.2% en volumen), pero se lo debe considerar si se usan volúmenes más altos de fibras. Esta cantidad relativamente pequeña de fibras tiene potencialmente mayor capacidad de refuerzo que bajos volúmenes de fibras de polipropileno y poliéster. El nylon es relativamente inerte y resistente a una amplia variedad de materiales orgánicos e inorgánicos, incluyendo álcalis fuertes.

Las fibras sintéticas se usan también en estuco y mortero. Para estas aplicaciones, las fibras son más cortas que las fibras sintéticas para concreto. Normalmente se emplean pequeñas cantidades de fibras de 13mm (½ pulg.) de longitud, resistentes a álcalis para basar mezclas de revoque (pañete) de revestimiento. Se las puede usar en pequeñas hileras de estuco y bombas de mortero y pistola spray. Se las debe añadir a la mezcla de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

Para más detalles sobre las propiedades físicas y químicas de las fibras sintéticas y sobre las propiedades del concreto con fibras sintéticas, consulte el ACI 544.1R. La ASTM C 1116 clasifica los concretos y concretos lanzados (proyectados) reforzados con fibras sintéticas, de acero y de vidrio.

La tecnología de molienda conjunta de cementos con fibras tiene la ventaja de que algunas fibras sintéticas no se destruyen o se pulverizan en el molino de cemento. Las fibras se mezclan con el cemento anhidro durante su molienda para que sean uniformemente distribuidas. Además, durante la molienda, la superficie de las fibras se vuelve áspera, mejorando su adherencia mecánica con la pasta de cemento (Vondran 1995).

Fibras Naturales

Las fibras naturales se han usado como una forma de refuerzo desde mucho tiempo antes de la llegada de la armadura convencional de concreto. Los ladrillos de barro reforzados con paja y morteros reforzados con crin de caballo son unos pocos ejemplos de como las fibras naturales se usaron como una forma de refuerzo. Muchos materiales de refuerzo natural se pueden obtener con bajos niveles de costos y energía, usando la mano de obra y la pericia disponibles en la región. Estas fibras se usan en la producción de concretos con bajo contenido de fibras y, ocasionalmente, se han usado en placas delgadas de con-

creto con alto contenido de fibras. Consulte la Tabla 7-1 para más información sobre las propiedades típicas de las fibras naturales.

Fibras Naturales No Procesadas

A final de los años 60, se hicieron investigaciones sobre las propiedades de ingeniería de las fibras naturales y de los concretos producidos con ellas. El resultado fue que se pueden usar estas fibras con éxito para la producción de planchas finas para muros y techos. Se produjeron elementos compuestos de cemento portland y fibras naturales no procesadas, tales como fibras de coco, sisal, bambú, yute, madera y fibras vegetales. A pesar de que los concretos producidos con fibras naturales presentan propiedades mecánicas buenas, tienen algunos problemas de durabilidad. Muchas de estas fibras son altamente susceptibles a los cambios de volumen debido a variaciones de la humedad que contienen. Los cambios de volumen de las fibras que acompañan los de humedad pueden afectar drásticamente la resistencia de adherencia entre la fibra y la matriz.

Fibras de Madera (Fibras Naturales Procesadas)

El método por el cual las fibras se extraen y los procesos de refinamiento influyen grandemente las propiedades de las fibras de celulosa. El proceso por el cual la madera se reduce a una masa de fibras se llama reducción a pulpa. El proceso kraft es uno de los más empleados en la producción de fibras de celulosa. Este proceso consiste en cocinar la viruta de madera en una solución de hidróxido de sodio, carbonato de sodio y sulfuro de sodio. Las fibras de celulosa tienen relativamente buenas propiedades mecánicas si son comparadas con muchas fibras producidas industrialmente, tales como polipropileno, polietileno, poliéster y acrílicas. Fibras de celulosa sin lignina (con la lignina removida) se pueden producir con resistencia a tensión (tracción) de hasta 20,000 kg/cm² o 2000 MPa (290 ksi) con especies seleccionadas de madera y proceso de reducción a pulpa. La resistencia a tensión de las fibras de 5,100 kg/cm² o 500 MPa (79 ksi) se puede producir habitualmente usando un proceso químico de reducción a pulpa y maderas más comunes y menos caras.

SISTEMAS MÚLTIPLES DE FIBRAS

En un sistema múltiple (mixto) de fibras se mezclan dos o más tipos de fibras. El concreto con fibras híbridas combina macro y micro fibras de acero. El uso de una mezcla de macro fibras y las recientemente desarrolladas micro fibras de acero, las cuales tienen menos de 10 mm (0.4 pulg.) de longitud y menos de 100 micrómetros (0.004 pulg.) de diámetro, conduce a un menor espaciamiento

entre las fibras, lo que puede reducir la microfisuración y aumentar la resistencia a tensión (tracción) del concreto. Las aplicaciones indicadas para este material son reparaciones y remiendos delgados (Banthia y Bindiganavile 2001). Se supone que el sistema combine la tenacidad y la resistencia al impacto del concreto reforzado con fibras de acero con la reducción de la fisuración por contracción (retracción) plástica de los concretos con fibras de polipropileno. Se ha empleado una mezcla de 30 kg/m³ (50 lb/yarda³) de fibras de acero con 0.9 kg/m³ (1½ lb/yarda³) de fibras de polipropileno fibrilado en las losas sobre el terreno de un proyecto en el área de Chicago (Wojtysiak y otros 2001). El concreto con una mezcla de fibras tenía un revenimiento (asentamiento) menor si es comparado con el concreto convencional, pero ha alcanzado resistencia elástica y pos-elástica.

REFERENCIAS

ACI Committee 544, *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete (Informe del Estado del Arte del Concreto Reforzado con Fibras)*, ACI 544.1R-96, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1997.

Altoubat, Salah A. y Lange, David A., "Creep, Shrinkage, and Cracking of Restrained Concrete at Early Age (Fluencia, Contracción y Fisuración del Concreto Restringido a Bajas Edades)," *ACI Materials Journal*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, Julio-Agosto 2001, páginas 323 a 331.

Banthia, Nemkumar y Bindiganavile, Vivek, "Repairing with Hybrid-Fiber-Reinforced Concrete (Reparo con Concreto Reforzado con Fibras Híbridas)," *Concrete International*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, Junio 2001, páginas 29 a 32.

Bijen, J., "Durability of Some Glass Fiber Reinforced Cement Composites (Durabilidad de Algunos Compósitos de Cemento Reforzados con Fibras de Vidrio)," *ACI Journal*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, Julio-Agosto 1983, páginas 305 a 311.

Hanna, Amir N., *Steel Fiber Reinforced Concrete Properties and Resurfacing Applications (Propiedades del Concreto Reforzado con Fibras de Acero y Aplicaciones de Recapeo)*, Research and Development Bulletin RD049, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RD049.pdf, 1977, 18 páginas.

Johnston, Colin D., *Fiber Reinforced Cement and Concretes (Concretos y Cementos Reforzados con Fibras)*, LT249, Gordon & Breach, Amsterdam, 2000, 368 páginas.

Marikunte, S.; Aldea, C. y Shah, S., "Durability of Glass Fiber Reinforced Cement Composites: Effect of Silica Fume and Metakaolin (Durabilidad de los Compósitos Reforzados con Fibras de Vidrio: Efecto del humo de sílice y de la metacaolinita)," *Advanced Cement Based Materials*, Volume 5, Numbers 3/4, Abril/Mayo 1997, páginas 100 a 108.

Morgan, D. R., "Evaluation of Silica Fume Shotcrete (Evaluación del Concreto Lanzado con Humo de Sílice)," *Proceedings*, CANMET/CSCE International Workshop on Silica Fume in Concrete, Montreal, Mayo 1987.

Monfore, G. E., *A Review of Fiber Reinforcement of Portland Cement Paste, Mortar and Concrete (Una Revisión sobre el Refuerzo de Fibras en Pastas, Morteros y Concretos de Cemento Portland)*, Research Department Bulletin RX226, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX226.pdf, 1968, 7 páginas.

PCA, *Fiber Reinforced Concrete (Concreto Reforzado con Fibras)*, SP039, Portland Cement Association, 1991, 54 páginas

PCA, "Steel Fiber Reinforced Concrete (Concreto Reforzado con Fibras de Acero)," *Concrete Technology Today*, PL931 Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/PL931.pdf, Marzo 1993, páginas 1 a 4.

Panarese, William C., "Fiber: Good for the Concrete Diet? (Fibra: ¿Buena para la Dieta del Concreto?)," *Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers, New York, Mayo 1992, páginas 44 a 47.

Shah, S. P.; Weiss, W. J. y Yang, W., "Shrinkage Cracking – Can it be prevented? (Fisuración por Contracción – ¿se la puede prevenir?)," *Concrete International*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, Abril 1998, páginas 51 a 55.

Suprenant, Bruce A. y Malisch, Ward R., "The fiber factor (El Factor de las Fibras)," *Concrete Construction*, Addison, Illinois, Octubre 1999, páginas 43 a 46.

Trottier, Jean-Francois y Mahoney, Michael, "Innovative Synthetic Fibers (Fibras Sintéticas Innovadoras)," *Concrete International*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, Junio 2001, páginas 23 a 28.

Vondran, Gary L., "Interground Fiber Cement in the Year 2000 (Cementos con Fibras Molidas Conjuntamente en el Año de 2000)," *Emerging Technologies Symposium on Cements for the 21st Century*, SP206, Portland Cement Association, Marzo 1995, páginas 116 a 134.

Wojtysiak, R.; Borden, K. K.; y Harrison P., *Evaluation of Fiber Reinforced Concrete for the Chicago Area – A Case Study (Evaluación del Concreto Reforzado con Fibras para el Área de Chicago – un Estudio de caso)*, 2001.