

# USO DE LAS FIBRAS NATURALES DE LECHUGUILLA COMO REFUERZO EN EL CONCRETO

CÉSAR A. JUÁREZ ALVARADO<sup>\*\*</sup>, PATRICIA RODRÍGUEZ LÓPEZ<sup>\*</sup>,  
RAYMUNDO RIVERA VILLARREAL<sup>\*\*</sup>, MA. DE LOS ÁNGELES RECHY DE VON ROTH<sup>\*\*\*</sup>.



A partir de que las fibras de asbesto fueron relacionadas con potenciales peligros para la salud,<sup>1</sup> se inició la búsqueda de posibles sustitutos que le proporcionaran al concreto las propiedades tan favorables que el asbesto le daba, además de ser competitivos en calidad y precio.

Las fibras de acero, de vidrio y, más recientemente, las de polipropileno, son alternativas viables para reforzar al concreto. Sin embargo, otro grupo de fibras llamadas naturales o vegetales han sido motivo de varios estudios para su posible aplicación como refuerzo del concreto.

Materiales reforzados con fibras naturales se pueden obtener a un bajo costo, usando la mano de obra disponible en la localidad y las técnicas adecuadas para su obtención, estas fibras son llamadas típicamente fibras naturales no procesadas. Sin embargo, las fibras naturales pueden ser procesadas químicamente para mejorar sus propiedades, estas fibras son generalmente derivadas de la madera. Estos procesos son altamente industrializados y no se dispone en los países en desarrollo, a tales fibras se les conoce como fibras naturales procesadas.<sup>2</sup>

□ El presente artículo está basado en la investigación «Durabilidad y sustentabilidad de materiales compuestos para la construcción de vivienda rural en México», galardonado con el Premio de Investigación UANL 2002 en la categoría de Ingeniería y Tecnología, otorgado en sesión solemne del Consejo Universitario de la UANL, en septiembre de 2003.

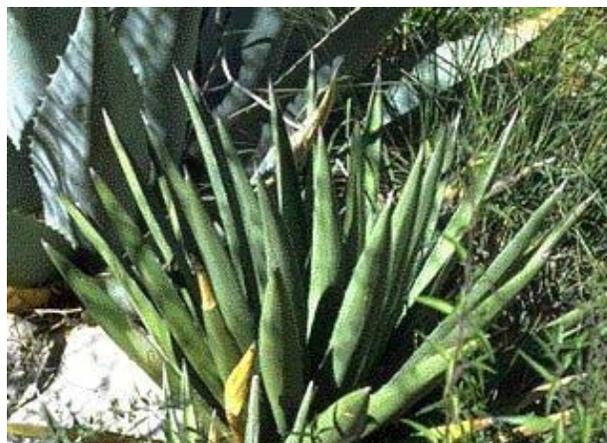


Fig. 1. Planta de lechuguilla (Agave lechuguilla).<sup>7</sup>

Aunque históricamente muchas fibras han sido usadas para reforzar varios materiales de construcción, ha sido hasta años recientes que los científicos han estudiado las fibras naturales como refuerzo, ya que anteriormente su uso se limitaba exclusivamente a la producción de ropa, colchones y cobijas.

\* Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Doctorado en Ingeniería de Materiales, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. 66450.

\*\* Instituto de Ingeniería Civil, Departamento de Tecnología del Concreto, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. 66450. [cjuarez@fic.uanl.mx](mailto:cjuarez@fic.uanl.mx)

\*\*\* Facultad de Ciencias Forestales, Departamento de Tecnología de la Madera, Linares, N.L.

Las fibras naturales están disponibles razonablemente en grandes cantidades en muchos países en desarrollo y representan una fuente renovable continua.<sup>3</sup> México es un país que posee abundante producción de fibras naturales, sobre todo las de la familia del agave.<sup>4</sup> De esta familia la más conocida es el sisal que puede ser obtenida en la península de Yucatán; otras especies de la misma familia son el maguey y la lechuguilla. El primero crece principalmente en el Valle del Mezquital, en el estado de Hidalgo, mientras que la lechuguilla normalmente se desarrolla en la zona noreste de México. Esta última fibra natural es el motivo del presente estudio. En la figura 1 se puede observar la planta de lechuguilla.

La región ixtilera del noreste del país, que comprende los estados de Coahuila, Zacatecas, Nuevo León, San Luis Potosí y Tamaulipas, tiene graves carencias en vivienda,<sup>5</sup> y algunas alternativas para disminuir esta problemática bien pueden ser:

- La autoconstrucción de la vivienda realizada por los mismos campesinos.
- Aplicar la tecnología adecuada que les permita utilizar fibras naturales para reducir los costos de construcción, sobre todo si se utiliza como refuerzo en el concreto.<sup>6</sup>

A finales de los años 60, se llevó a cabo en otros países una evaluación sistemática de las propiedades de ingeniería de las fibras naturales y de los compuestos formados por estas fibras con el cemento. Los resultados de las investigaciones indican que las fibras se pueden usar con éxito para fabricar materiales de construcción. Posteriormente se desarrollaron procesos de manufactura apropiados para la producción comercial en varios países de América Central, África y Asia.

Los productos hechos con cemento portland y fibras naturales no procesadas, tal como el sisal, coco, caña de azúcar, bambú, yute, madera etc., se han probado para determinar sus propiedades de ingeniería y su posible uso en la construcción en al menos 40 diferentes países.<sup>8</sup>

Aunque los resultados fueron alentadores, se encontraron algunas deficiencias respecto a su durabilidad. Estas deficiencias al parecer son resultado de la reacción entre la alcalinidad de la pasta de cemento y las fibras, además de la susceptibilidad al ataque de microorganismos en presencia de la humedad.<sup>9</sup>

Esta investigación pretende encontrar tratamientos adecuados en la fibra, que permitan aumentar la durabilidad del compuesto, reduciendo el deterioro que sufre la misma en el medio alcalino propio del concreto.

## Descripción del programa experimental

El programa consistió en pruebas a las fibras y ensayos en los especímenes de concreto reforzado con fibras naturales (CRFN). Para la caracterización de las fibras se obtuvo su diámetro, longitud promedio, % de absorción de agua, densidad absoluta y porosidad. También se observó su morfología con micrografías de la sección transversal de la fibra. Las propiedades mecánicas obtenidas fueron el esfuerzo último a la tensión y la elongación a la ruptura. Para minimizar el deterioro de las fibras se propuso impregnarlas con seis diferentes sustancias repelentes al agua que fueran económicas y no dañaran al concreto, para una impregnación más eficiente se estudió la variación de la tensión superficial y la altura de capilaridad con relación a la temperatura de estas sustancias. De los resultados obtenidos se seleccionaron las posibles sustancias protectoras. Posteriormente se impregnaron con estas sustancias lotes de 120 fibras cada uno, los cuales fueron sometidos a un medio alcalino ( $\text{pH} = 12.5$ ) producido por una solución de hidróxido de calcio y agua. Se ensayaron a tensión a los 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9 y 12 meses de exposición al medio alcalino. Además, se determinó el porcentaje de absorción de agua en fibras previamente impregnadas con las sustancias protectoras.

Los especímenes de CRFN se fabricaron con agregados de caliza propios de Nuevo León, México. La granulometría de los agregados finos fue la siguiente: Porcentajes parciales de 2.5, 7.5, 22.5, 25, 22.5, 14 y 6 % retenidos en las mallas # 4, 8, 16, 30, 50, 100 y material que pasa la malla 100, respectivamente. Con esta granulometría al concreto se le conoce comúnmente como mortero.

Se utilizaron dos relaciones agua/cemento (A/C): 0.65 y 0.35 con un consumo de cemento de 381  $\text{kg/m}^3$  y 707  $\text{kg/m}^3$ , respectivamente, con el fin de estudiar el comportamiento con matrices permeables (A/C = 0.65) y matrices densas (A/C = 0.35). Los especímenes de concreto fueron reforzados con fibra sin tratamiento y con fibra impregnada con las sustancias, al 1% del volumen total de la mezcla (13.8

kg/m<sup>3</sup>) y con una longitud de la fibra de 20 a 30 mm, en forma preliminar para definir a la mejor sustancia protectora.

Se fabricaron por triplicado para todas las condiciones y las dos relaciones A/C, especímenes de 75 x 75 x 280 mm para la resistencia a flexión o módulo de ruptura de acuerdo a la norma ASTM C 78-94. Una primera serie de 15 especímenes se ensayaron a los 14 días con curado estándar hasta el momento del ensaye. Otra segunda serie de igual número se mantuvo en el cuarto de curado durante 10 meses, posteriormente fue sometida a 10 ciclos de humedecimiento y secado antes de ensayarse. Cada ciclo consistió en 12 h en un horno a 70°C en ambiente húmedo y 12 h en un horno a 70°C en ambiente seco. Adicionalmente, se fabricaron especímenes para flexión sin ningún contenido de fibra para las dos relaciones A/C. Fueron curados y ensayados de igual manera que los especímenes con fibra de la primera serie.

Una vez que fue seleccionada la sustancia protectora para la fibra, se procedió a tratar de determinar el volumen de fibra en la mezcla y la longitud de la misma que proporcionara la mayor resistencia a flexión o módulo de ruptura según se indica en la norma ASTM C 78-94. Se investigaron fibras cortas y largas aleatoriamente distribuidas, para lo cual se usaron fibras tratadas y cortadas a las siguientes longitudes: 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 y 300 mm. Así también, la cantidad de fibra se investigó probando los siguientes porcentajes del volumen total de la mezcla: 0.5, 1, 1.5 y 2%. Todos los especímenes se ensayaron a los 14 días.

## Resultados experimentales y discusión

### *Propiedades físico-mecánicas de la fibra*

Las fibras de lechuguilla fueron compradas en una compañía ixtlera de Santa Catarina, N.L., México. Esta empresa las comercializa en el extranjero principalmente como materia prima. Todas las fibras que fueron utilizadas en esta investigación se lavaron con agua potable para eliminar la presencia de carbohidratos libres, posteriormente fueron secadas al sol. Todas las pruebas realizadas a las fibras fueron hechas en el laboratorio a una temperatura de 23°C. El diámetro de la fibra fue medido en ambos extremos con un vernier digital de 0.01 mm de precisión, el diámetro mayor corresponde al extremo

Tabla 1. Valores típicos de diámetro y longitud de la fibra.			
Cantidad de Fibras	Diámetro Máximo mm	Diámetro Mínimo mm	Longitud Total mm
<b>Promedio</b>			
100	0.26	0.16	451
<b>Desviación Estándar</b>			
100	0.07	0.05	58

anexo al tallo y disminuye gradualmente hasta la punta (ver tabla I). La longitud total es también variable con un promedio de 451 mm, lo que resulta menor a las longitudes reportadas para el sisal y el maguey.<sup>10</sup>

Las fibras están formadas por microceldas individuales unidas entre sí por medio de la hemicelulosa y la lignina.<sup>11</sup> En la micrografía de la figura 2 se pueden observar las microfibras integradas entre sí, las cuales forman la morfología general de la fibra.

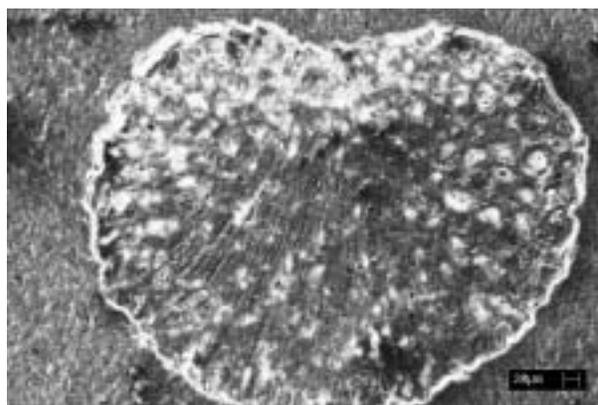


Fig. 2. Sección transversal de una fibra de lechuguilla.

Esta microestructura origina que la fibra posea una alta permeabilidad. Al saturarse absorben una cantidad de agua de casi el 100% de su peso seco. En el caso de fibras sin ningún tratamiento previo absorberán agua durante el mezclado, la cual deberá adicionarse para evitar la pérdida de trabajabilidad de la mezcla. Además, el agua que absorben las fibras origina una inestabilidad en su volumen que propicia la pérdida de adherencia con la matriz de concreto. En la tabla 2 se puede observar que el agua se absorbe rápidamente con poco tiempo de saturación, esto puede deberse a la acción capilar de las microceldas de la fibra.

**Tabla 2. % de Absorción de Agua en las Fibras.**

Muestra	Tiempo de Saturación min	W Seco g	W Saturado Superficialmente Seco g	W del Agua Absorbida g	Absorción Relativa al W Seco %
1	5	0.95	1.71	0.76	80
2	15	0.99	1.77	0.78	79
3	30	0.99	1.83	0.84	85
4	60	0.95	1.85	0.90	95
5	1440 (24 h)	0.95	1.88	0.93	98

La alta absorción de agua está relacionada con la porosidad de la fibra. Se realizaron pruebas de porosidad en dos muestras de fibra sin ningún tratamiento. La muestra 1 contenía fibras con diámetros de 0.15 a 0.25 mm y la muestra 2 estaba formada por fibras con diámetros de 0.25 a 0.35 mm. El equipo utilizado es un porosímetro de intrusión de mercurio, el cual inyecta el metal a presión en toda la muestra saturando sus poros, en la tabla III se resumen los resultados obtenidos en la prueba.

**Tabla 3. Resumen de prueba de porosidad en las fibras.**

Muestra	Volúmen acumulado (mm <sup>3</sup> /g)	Area específica (m <sup>2</sup> /g)	Promedio del radio del poro (10 <sup>-10</sup> )	Promedio del radio del poro (10 <sup>-10</sup> )	Densidad Bruta (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad bruta corregida (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidad total de la muestra (%)
1	167.5214	10.70	530880	190	1.28	1.63	21.44
2	197.9167	13.25	266070	190	1.30	1.75	25.72

Las fibras con diámetros de 0.25 a 0.35 mm de la muestra 2 tienen una mayor cantidad de microceldas, ya que poseen poros más pequeños, pero con mayor área específica lo que permite acumular un mayor volumen de mercurio. Por lo que resulta, que las fibras de mayor diámetro registran una mayor porosidad que las fibras de diámetros de 0.15 a 0.25 mm. La densidad bruta es similar entre ambas muestras y también se acerca al valor de la densidad absoluta reportado a continuación.

Para fines de realizar los proporcionamientos del CRFN, se obtuvo la densidad absoluta de la fibra que es la relación entre el peso seco de la fibra y el volumen seco de la misma. En la tabla IV se presenta un resumen de los datos usados para el cálculo de las densidades.

**Tabla 4. Densidad absoluta de la fibra**

No. Muestra	Peso W1 g	Peso W2 g	Peso W3 g	Peso W4 g	W2-W1 g	W4-W3 g	(W2-W1) - (W4-W5) g
1	188.52	685.70	199.03	687.50	497.18	488.47	8.71
2	188.53	686.00	198.88	687.80	497.47	488.92	8.55
3	188.52	686.10	198.87	687.80	497.58	488.93	8.65

No. Muestra	Densidad del Agua g/cm <sup>3</sup>	Volúmen de Fibras SSS cm <sup>3</sup>	Peso de Fibras SSS g	Volúmen de Fibras secas cm <sup>3</sup>	Peso de Fibras secas g	Densidad Absoluta de la Fibra g/cm <sup>3</sup>
1	1	8.71	10.51	3.71	5.00	1.35
2	1	8.55	10.35	3.55	5.00	1.41
3	1	8.65	10.35	3.65	5.00	1.37
<b>Promedio =</b>						<b>1.38</b>

**Nomenclatura.-**

- W1 = Peso del Matraz de Aforación
- W2 = Peso del Matraz con Agua
- W3 = Peso del Matraz con la Fibra Saturada Superficialmente Seca
- W4 = Peso del Matraz con Agua y con Fibra Saturada Superficialmente Seca

El esfuerzo último a la tensión de la fibra fue evaluado como la relación entre la carga de falla y el diámetro promedio entre los puntos de sujeción de la fibra montada en el dispositivo de prueba esquematizado en la figura 3.

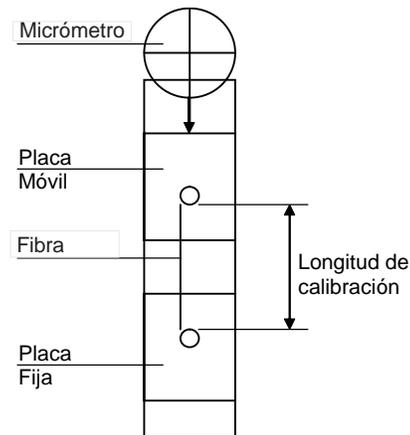


Fig. 3. Croquis del dispositivo para ensayos a tensión.

La carga se fue aplicando en forma gradual mediante pesos conocidos, midiendo la elongación de la fibra con un micrómetro de carátula de 0.01 mm de precisión. Este aparato registraba el deslizamiento de uno de los puntos de sujeción de la fibra. Al momento de la ruptura de la fibra se tomaba la lectura en el micrómetro obteniendo la elongación última, la longitud de calibración fue de 90 mm. En la figura 4 se pueden observar comportamientos típicos de la fibra durante el ensayo.

Debido a la alta variabilidad en lo referente al diámetro de la fibra, se realizaron 160 ensayos a tensión aproximadamente, tratando de obtener un adecuado índice de confiabilidad en los resultados.

En la mayoría de los ensayos a tensión el comportamiento de la fibra presentó una tendencia a ser elastoplástico hasta la falla. Esto puede deberse a que algunas microceldas fluyen individualmente o

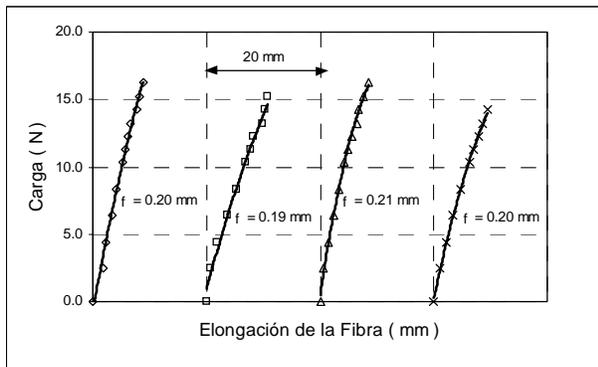


Fig. 4. Curvas típicas de carga vs. elongación.

se separan entre sí, pero las restantes aún pueden mantener la carga; sin embargo, la deformación es permanente. En la figura 5 se puede apreciar la variación de la carga de falla con respecto al diámetro de la fibra. La tendencia es que a mayor diámetro la fibra soporta más carga. Sin embargo, las fibras con diámetros mayores tienen mayor área específica, por lo que la carga de falla se distribuye en una mayor área transversal de la fibra resultando que el esfuerzo último disminuye al aumentar el diámetro. Esto se puede observar en la figura 6.

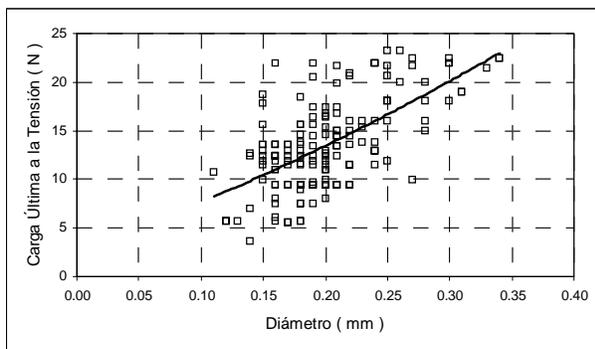


Fig. 5. Variación de la carga última a tensión con respecto al diámetro de la fibra.

La tendencia de los resultados es un esfuerzo último a tensión de 400 MPa y una deformación unitaria de 0.1000 mm/mm, aproximadamente. Los valores de esfuerzos en la fibra aquí reportados, así como sus propiedades físicas son similares a los encontrados por otros investigadores.<sup>2,6,8</sup>

#### Tratamiento a la fibra previo al mezclado

Para reducir la cantidad de agua que puede absorber la fibra, y adicionalmente darle una protección

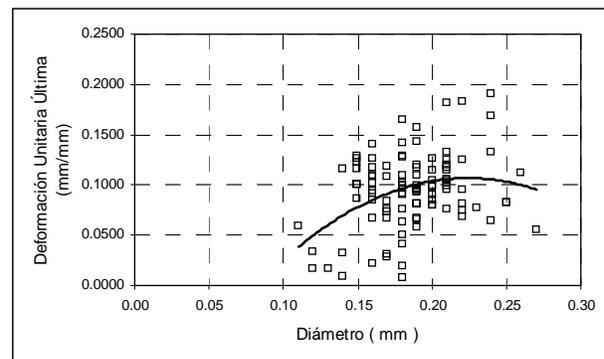
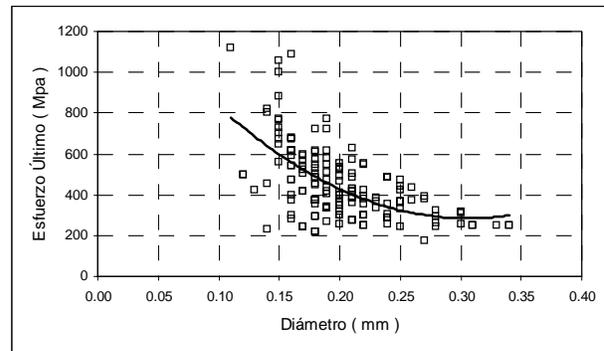


Fig. 6. Variación del esfuerzo último a tensión y la deformación unitaria última con respecto al diámetro de la fibra.

contra el medio alcalino de la pasta de cemento, se consideró utilizar sustancias que fueran hidrófobas y económicas para no encarecer el proceso:

- Aceite de linaza
- Aceite de linaza + resina natural
- Parafina
- Parafina + resina natural
- Sellador para madera
- Creosota

El aceite de linaza se extrae en caliente de la semilla del lino, de color ambarino se oxida y polimeriza con facilidad, produciendo una película elástica. La parafina es una sustancia sólida a temperatura ambiente, con punto de fusión alrededor de los 67°C compuesta por una mezcla de hidrocarburos. La resina natural utilizada se le conoce como breá, la cual se obtiene de varios árboles coníferos, a temperatura ambiente es sólida de color oscuro y frágil. A temperaturas entre los 90°C y 100°C se convierte en una sustancia viscosa, puede ser mezclada con solventes como el aguarrás y no es soluble en el agua. El sellador para madera y la creosota son productos industrializados y de fácil disponibilidad en el mercado.

Aprovechando las propiedades de alta absorción que tiene la fibra, se buscó la temperatura óptima de las diferentes sustancias para que la impregnación por capilaridad fuera adecuada. Una forma inicial de evaluar la capilaridad es la tensión superficial de los líquidos. Las moléculas situadas en la superficie del líquido experimentan menos atracción por parte de las otras moléculas que aquellas que se encuentran en el interior de la fase líquida y para separar esas moléculas de la superficie o dicho de otra manera, aumentar el área de la superficie interfacial líquido - vapor; es necesario realizar un trabajo.<sup>12</sup> Este trabajo o tensión superficial es inversamente proporcional al ascenso capilar y es menor cuando el líquido aumenta su temperatura.

Las unidades típicas de la tensión superficial son unidades de fuerza/ unidades de longitud. En la prueba realizada se colocó un pequeño anillo metálico sobre la superficie de la sustancia, mediante un mecanismo mecánico se determinaba la fuerza necesaria para separar el anillo de la superficie del líquido. Las unidades de la tensión superficial registradas son propias del dispositivo utilizado; sin embargo, esto no afecta ya que los resultados son comparativos entre las diferentes sustancias. En la figura 7 se puede observar que la creosota y el sellador para madera tienen una tensión superficial relativamente mayor que las otras sustancias aún con temperaturas de 80°C. Esto debido a su alta viscosidad, por lo que la impregnación de la fibra por capilaridad se dificultaría con estas sustancias.

De tal modo que la impregnación se llevó a cabo con las sustancias y a las temperaturas que resultaron con mayor ascenso capilar. Esto es los aceites a una temperatura de 80°C y las parafinas a 100°C. La parafina sola y con resina presenta valores únicamente a temperaturas mayores a 70°C ya que su punto de fusión es de 67°C esto impedía tomar las lecturas correspondientes.

La impregnación con los aceites se realizó por inmersión de la fibra seca en la sustancia a 80°C durante 5 min, posteriormente la fibra se sumerge en la misma sustancia a 24°C durante el mismo periodo de tiempo. Este ciclo se repitió tres veces buscando que la sustancia penetrara completamente en la fibra.

Para la impregnación con las parafinas, éstas se calentaron hasta los 100°C sumergiendo la fibra seca en la sustancia durante 5 min. La fibra impregnada se colocó dentro de un horno a 100°C - 110°C du-

rante 15 min, esto redujo la formación de grumos de parafina en las fibras mejorando la disgregación de las mismas antes y durante el mezclado.

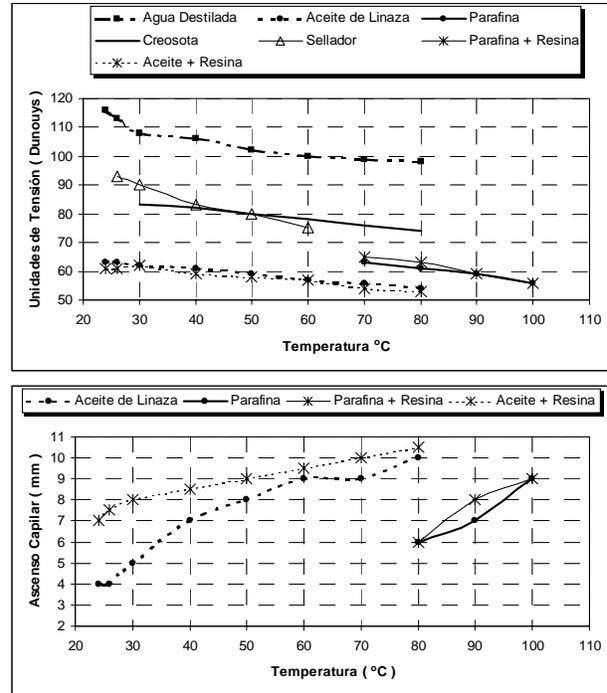


Fig. 7. Tensión superficial y capilaridad de las sustancias con respecto a la temperatura.

### Durabilidad de la fibra

La descomposición en un medio alcalino de la celulosa que es la principal unidad estructural de la fibra, así como también de la hemicelulosa, se puede presentar de acuerdo a dos diferentes mecanismos. Uno es el desfibramiento, el cual sucede cuando la celulosa constituida por cadenas lineales de glucosa se disuelve cuando reacciona con el ión OH<sup>-</sup>, produciendo -CH<sub>2</sub>OH el cual se desprende de la cadena molecular. De esta manera el desfibramiento es continuo durante la exposición al medio alcalino, y ocurre a temperatura ambiente por debajo de los 75°C.<sup>13</sup>

El otro mecanismo de descomposición de la celulosa es la hidrólisis alcalina. Esta causa la división de las cadenas moleculares, y se combina con el mecanismo anterior, ya que la división de la cadena molecular origina la exposición de unidades finales reductivas. Este mecanismo se lleva a cabo generalmente a temperaturas alrededor de los 100°C. Estas temperaturas son difíciles que se presenten en ele-

mentos constructivos convencionales.

La lignina consiste de sustancias aromáticas, y es la matriz que une las microceldas de celulosa. Se fragmenta fácilmente en un medio alcalino y su color llega a ser amarillo y café cuando se oxida. La lignina se reblandece entre los 70°C - 80°C y es parcialmente líquida a los 120°C.

De acuerdo con H. E. Gram<sup>13</sup> la descomposición química de la lignina y la hemicelulosa es la principal causa del deterioro por fragilización de la fibra en el concreto. La alcalinidad del agua en el poro de la matriz de cemento disuelve la lignina. Se rompe la unión de las microceldas individuales las cuales absorben el hidróxido de calcio producto de las reacciones de hidratación del cemento. La fibra pierde su flexibilidad y se fragmenta en pequeñas unidades longitudinales perdiendo su capacidad de reforzar al concreto.

Para simular el medio alcalino del concreto, fibras tratadas se expusieron a una solución concentrada de hidróxido de calcio disuelto en agua a temperatura de laboratorio 23°C. La tendencia del esfuerzo último a tensión fue disminuir al ser mayor el tiempo de exposición (ver figura 8); sin embargo, las fibras impregnadas con parafina mantuvieron el nivel de esfuerzo mas alto con respecto al inicial, alrededor del 53% del esfuerzo.

Las fibras impregnadas con las otras sustancias

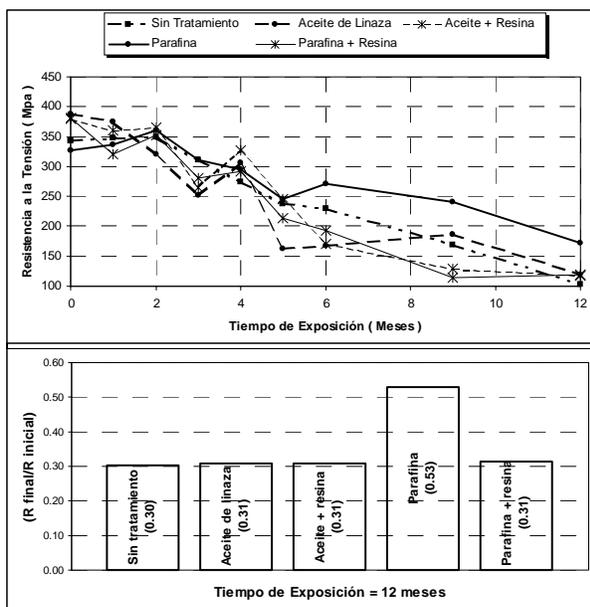


Fig. 8. Efecto del medio alcalino en el esfuerzo a tensión de las fibras tratadas (arriba). Relación de esfuerzo sostenido después de la exposición al medio alcalino (abajo).

mantuvieron un esfuerzo a la tensión bajo muy similar al de las fibras sin ningún tratamiento. Además, se volvieron frágiles y quebradizas después del sexto mes de exposición. Las proporciones utilizadas para las sustancias fueron las siguientes: Parafina + resina (4:1) y Aceite de linaza + resina + aguarrás (4:1:4).

Se obtuvo el porcentaje de absorción de agua para las fibras tratadas con las diferentes sustancias y para la fibra sin ningún tratamiento. Obteniendo una reducción del 35%, aproximadamente, en comparación con lo reportado en la tabla II. Siendo muy similar en todas las fibras impregnadas la cantidad de agua absorbida (ver figura 9).

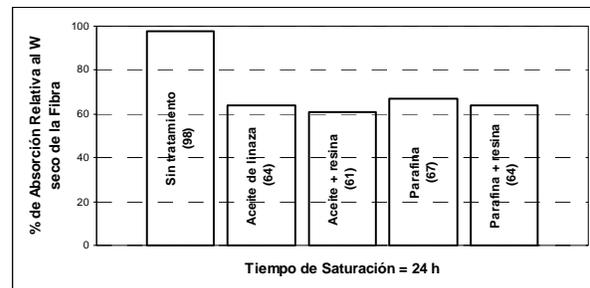


Fig. 9. Porcentaje de absorción de agua en fibras tratadas.

### Ensayes en morteros reforzados con fibras

El concreto o el mortero sin ningún refuerzo tiene generalmente una alta resistencia a la compresión, esto es adecuado para muchas aplicaciones. Sin embargo, cuando se requiere propiedades específicas como resistencia a la tensión, a la flexión, al agrietamiento, es necesario reforzarlo. Los diferentes tipos de fibras como son las de acero, vidrio, plásticas y naturales le proporcionan al concreto ductilidad y capacidad de absorber energía. La más importante contribución de las fibras es la de incrementar la tenacidad del compuesto.<sup>14</sup>

Las propiedades mecánicas del CRFN son afectadas por muchos factores. Algunos de estos son: el tipo, la geometría, la forma y la superficie de la fibra, las propiedades de la matriz de cemento, la proporción de la mezcla, el método de mezclado, de colado y de curado.<sup>15</sup>

En esta investigación se evaluó el comportamiento de especímenes de CRFN con dos diferentes relaciones A/C. La relación de 0.65 con un consumo de cemento de 381 kg/m<sup>3</sup> resultó ser una mezcla trabajable y de fácil manejo con la fibra. Sin em-

bargo, en el estado endurecido presentó una alta permeabilidad, su aplicación puede ser en elementos constructivos de bajo costo y de autoconstrucción. Para la relación de 0.35 con consumo de cemento de  $707 \text{ kg/m}^3$  fue necesario agregar 10 ml de aditivo superfluidificante por kg de cemento, la mezcla resultante fue trabajable y la adición de las fibras se realizó adecuadamente. Este concreto de mayor densidad e impermeabilidad resulta conveniente para aplicaciones estructurales de mayor costo, no se considera viable para la autoconstrucción.

La longitud y el volumen de la fibra fueron de 20 a 30 mm y 1% del volumen total de la mezcla ( $13.8 \text{ kg/m}^3$ ), respectivamente, manteniéndose constantes en todos los colados, ya que se trataba inicialmente de evaluar la eficiencia de los tratamientos en la fibra. La mezcla fue realizada en una revolvedora con una capacidad de 40 L. Primero se homogeneizaron los agregados con su agua de absorción y con el agua de absorción de la fibra, posteriormente se agregó el cemento y el agua de reacción, se mezcló durante un minuto, se dejó reposar un minuto y nuevamente se mezcló durante otro minuto. El aditivo se agregó durante el minuto de reposo para la relación A/C de 0.35. Las fibras se adicionaron durante el minuto del segundo periodo de mezclado, tratando de evitar que se agruparan, lo que se consiguió parcialmente, ya que al vaciar a los moldes se tuvo en algunos casos que separar la fibra manualmente.

La mezcla se vació en moldes metálicos de tres barras por molde para fabricar especímenes de  $75 \times 75 \times 280 \text{ mm}$ , el vaciado fue realizado en dos capas iguales correspondientes a la mitad de la altura del molde (75 mm). Se compactó con una varilla de acero punta de bala diámetro de 9.5 mm ( $3/8''$ ), dando 30 golpes por capa distribuidos en toda el área. Así como 12 golpes al molde metálico con un martillo de goma para cada capa. Se fabricaron tres barras de mortero reforzado con fibra, sin tratar y tratada con las cuatro diferentes sustancias protectoras, para las dos relaciones A/C. Todos los especímenes se mantuvieron en sus moldes durante 24 h protegiéndolos de la pérdida de humedad, posteriormente se colocaron dentro de un cuarto de curado con 95 % de humedad relativa hasta el momento de su ensaye.

Una primera serie de 18 barras para cada relación A/C se ensayó a los 14 días de edad, de acuerdo a la norma ASTM C 78-94. Se obtuvo su módulo de ruptura a flexión, el cual es un índice de la tenacidad del compuesto. Adicionalmente, se regis-



Fig. 10. Ensaye a flexión para obtener el módulo de ruptura de especímenes de CRFN.

tró la deflexión al centro del claro de las barras utilizando un micrómetro de carátula con una precisión de 0.01 mm, como se puede ver en la figura 10.

La figura 11 registra los resultados de los ensayos a flexión en las barras con relación A/C = 0.65. Se puede observar que el tratamiento con parafina le permite al compuesto tener el doble de módulo de ruptura, en comparación con los otros tratamientos; sin embargo, la resistencia a flexión no se incrementó en comparación con el mortero sin fibras. De esta forma, los especímenes sin fibra resistieron mayor carga, pero su falla es frágil. Este tipo de falla no se presentó en los especímenes con fibra.

El sangrado que se presenta en concretos con alta relación A/C, posiblemente influyó para que la resistencia a flexión de los especímenes con fibra fuera menor que la de los especímenes sin refuerzo.

En los especímenes con relación A/C = 0.35, donde el sangrado se reduce sustancialmente, se registra mayor módulo de ruptura de acuerdo a la figura 12. De igual forma, el tratamiento con parafina propicia nuevamente un mejor comportamiento a flexión en los especímenes e incluso un mayor módulo de ruptura. De acuerdo a los resultados obtenidos, el medio alcalino de la matriz de cemento a la edad de 14 días no es factor que reduzca la resistencia a flexión, ya que las barras reforzadas con fibras sin tratamiento mantuvieron un adecuado nivel de resistencia. De tal manera, es posible que sea la disminución de la adherencia y el sangrado

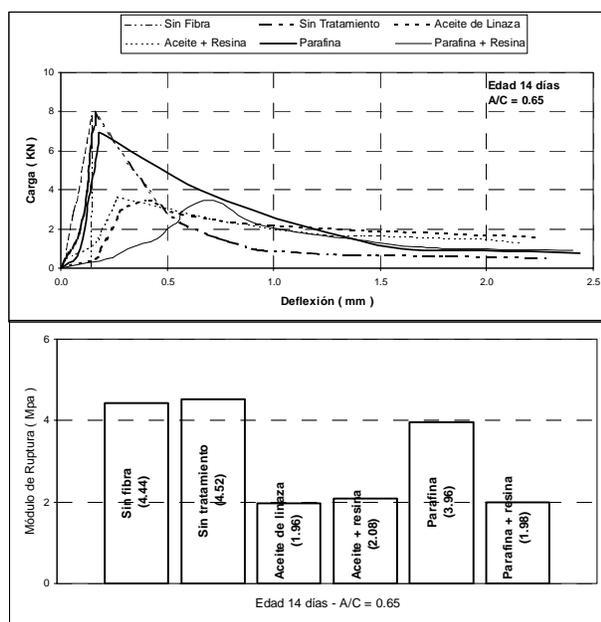


Fig. 11. Comportamiento a flexión y módulo de ruptura de especímenes de CRFN de relación A/C = 0.65

los principales factores que causaron dicho comportamiento.

Cada curva carga vs. deflexión de las figuras 11 y 12 es producto del promedio de tres especímenes de mortero, y su área representa la capacidad de absorber energía o la tenacidad del compuesto. En ambas relaciones A/C la curva con mayor área corresponde al mortero reforzado con fibra impregnada con parafina.

El comportamiento observado en los especímenes durante el ensaye a flexión fue de mínima deflexión hasta que se alcanza la carga máxima, donde aparece la primera grieta. Posteriormente, el espécimen no sostiene la carga, la cual disminuye rápidamente hasta un nivel del 20 % de la carga máxima aproximadamente. En ese punto la carga es sostenida y va disminuyendo paulatinamente, mientras que la deflexión se incrementa sustancialmente. No se observó la formación de pequeñas grietas adicionales a la primera. Al aparecer la primera grieta fue incrementando su ancho durante la aplicación de la carga, por lo que únicamente se generó un solo plano de falla. Esto posiblemente se deba a que la fibra no es capaz de transmitir por adherencia los esfuerzos de tensión a la matriz no agrietada, se observó que la fibra falló por extracción lo que refuerza lo anteriormente mencionado.

Para tratar de evaluar la influencia de las varia-

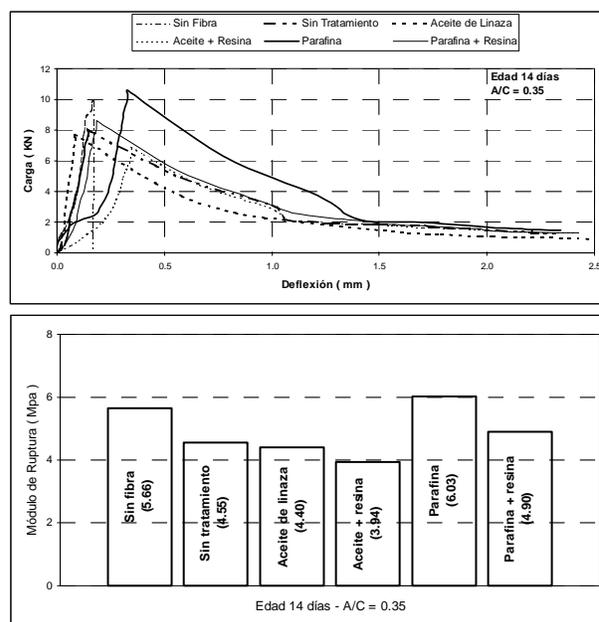


Fig. 12. Comportamiento a flexión y módulo de ruptura de especímenes de CRFN de relación A/C = 0.35

ciones de humedad sobre el comportamiento a flexión de especímenes de CRFN, se sometió a una prueba de ciclos humedecimiento y secado, una segunda serie de 15 barras para ambas relaciones A/C. Todas las barras permanecieron en el cuarto de curado durante 10 meses y posteriormente fueron expuestas a 10 ciclos. Cada ciclo consistió en 12 h dentro de un horno a 70°C en ambiente húmedo y 12 h en un horno a 70°C en ambiente seco.

Del mismo modo que los resultados en especímenes de 14 días de edad, se mantuvo una tendencia muy semejante. El tratamiento con parafina le permite a los especímenes mantener una adecuada resistencia a flexión. Como puede observarse en la figura 13 el efecto de la alcalinidad de la pasta de cemento parece empezar a ser factor en la resistencia a flexión de los especímenes con fibra sin tratar, ya que para la relación A/C = 0.35 tiene uno de los más bajos módulos de ruptura.

De acuerdo con los resultados de la figura 13, la fibra tratada con parafina después de 10 meses en el ambiente alcalino propio de la matriz de cemento y después de ser sometida a variaciones de humedad a 70°C de temperatura, parece mantener la capacidad de reforzar al compuesto.

Según los resultados de los ensayos a flexión mostrados en la figura 13, las fibras que fueron tratadas con los aceites y la resina son las más afectadas por la reacción alcalina de la matriz de cemen-

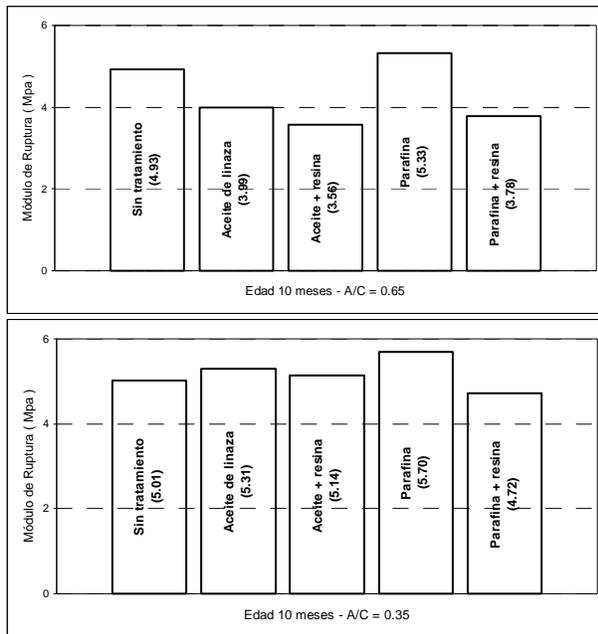


Fig. 13. Efecto de los ciclos humedecimiento y secado en la resistencia a flexión de especímenes de CRFN.

to. Esta reacción propició que la adherencia entre la matriz y la fibra disminuyera, fragilizando a la fibra y por consiguiente, su resistencia a flexión se reduce considerablemente.

*Efecto del volumen y la longitud de la fibra*

Según Aziz, Paramaswivam y Lee<sup>3</sup>, la resistencia última del concreto con fibras depende principalmente del tipo, de la longitud y del volumen en la mezcla de la fibra. La relación de la longitud y el volumen de fibra difiere para cada tipo de fibra natural. Una cantidad alta de fibra dificulta el mezclado y éstas tienden a apelmazarse, generando inadecuada adherencia lo que disminuye su resistencia.

Para estudiar este efecto se fabricaron especímenes para ensayos a flexión reforzados con fibra tratada con parafina, ya que según los resultados referentes al porcentaje de absorción y la resistencia al medio alcalino de la fibra, así como el efecto de las sustancias protectoras en la resistencia a flexión de especímenes, la parafina resultó ser el mejor protector de la fibra en comparación con las otras sustancias estudiadas en esta investigación. Los volúmenes de fibra con respecto al total de la mezcla fueron de 0.5, 1, 1.5 y 2%. Y para cada volumen correspondió las siguientes longitudes de fibra: 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 y 300 mm.

La figura 14 muestra los resultados encontrados con estas variables respecto a la flexión. De acuerdo con los resultados obtenidos, para las dos relaciones A/C el comportamiento es muy similar. Como puede observarse en la figura, la fibra con longitud de 300 mm aumentó la resistencia a flexión de las barras. Siendo la combinación con un volumen de fibra de 0.5% la que resultó con mayor incremento en su resistencia. Comparada con las barras sin fibra la resistencia a flexión aumentó un 20% para ambas relaciones A/C. Se puede observar una tendencia en la resistencia a flexión, la cual disminuyó conforme se incrementó el volumen de fibra.

Es posible que la fibra larga tuviera mayor adherencia debido a su longitud. Esto se confirma al examinar la superficie de falla de los especímenes ensayados, en donde se pudo observar que las fibras cortas normalmente tuvieron un tipo de falla de extracción debido a la falta de adherencia. Mientras que las fibras largas presentaron una falla por ruptura de la fibra, lo que indica una adecuada adherencia.

Shah<sup>16</sup> explica que el compuesto soportará cargas crecientes después del primer agrietamiento de la matriz, si la resistencia a la extracción de las fibras en la primera grieta es mayor que la carga al primer agrietamiento. En la sección agrietada, la matriz no resiste tensión alguna y las fibras soportan toda la carga aplicada al compuesto. Con una carga creciente en el compuesto, las fibras tenderán a transferir el esfuerzo adicional a la matriz a través de esfuerzos de adherencia. Si estos esfuerzos de adherencia no exceden la resistencia de adherencia, entonces puede haber agrietamiento adicional en la matriz. Este proceso de múltiple agrietamiento continuará hasta que fallen las fibras o que la pérdida de adherencia local acumulada conduzca a la extracción de la fibra. Según observaciones durante los ensayos, en los especímenes con fibras cortas la falla por flexión se inició al agrietarse la matriz. En ese momento la carga disminuyó, lo que indica que la fibra no fue capaz de transferir por adherencia los esfuerzos a la matriz, el ancho de la grieta aumentó sin presentarse otros planos de falla hasta que la fibra fue extraída. Para el caso de especímenes con fibras largas, al agrietarse la matriz la fibra fue capaz de sostener la carga de agrietamiento, sin embargo, no pudo soportar cargas crecientes. Al igual que con las fibras cortas, únicamente se presentó un plano de falla, pero la fibra falló por ruptura. Es posible que la fibra no pudiera soportar más

carga después del agrietamiento al no transferir efectivamente los esfuerzos a la matriz debido a su bajo módulo de elasticidad. Es decir, la fibra es flexible con alta capacidad de elongación que impide soportar cargas crecientes una vez agrietada la matriz de concreto.

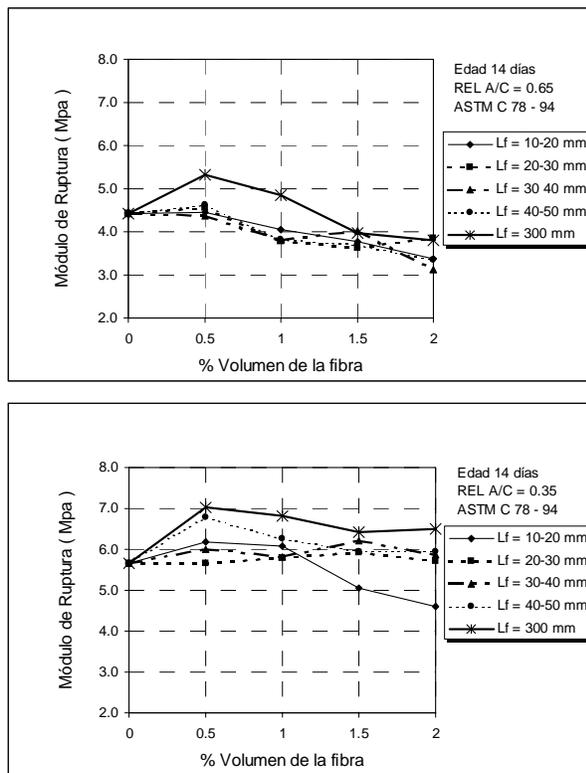


Fig. 14. Efecto del volumen y la longitud de la fibra en la resistencia a flexión. Las fibras largas incrementan el módulo de ruptura con respecto al concreto simple.

## Conclusiones

1. Las fibras de lechuguilla tienen significativas propiedades físico-mecánicas, tal como su resistencia última a tensión, que les permite ser consideradas como posible refuerzo en el concreto.
2. El tratamiento protector con parafina le permite a la fibra reducir su capacidad de absorción de agua. Además de mantener un porcentaje aceptable de su resistencia última a la tensión después de haber estado expuesta durante un año a un ambiente húmedo y alcalino, lo que resulta sumamente crítico.
3. La fibra de lechuguilla permite un comportamiento

to dúctil después del agrietamiento de la matriz de concreto.

4. Las fibras largas adicionadas en bajas cantidades, es decir, con porcentajes bajos del volumen total de la mezcla proporcionan al concreto la capacidad para soportar mayores cargas de flexión en comparación con el concreto simple.

## Resumen

Esta investigación pretende encontrar materiales de construcción que sean económicos y durables. Las fibras de acero, vidrio y poliméricas, son alternativas viables pero costosas. Las fibras naturales pueden ser una posibilidad real para los países en desarrollo, ya que están disponibles en grandes cantidades y representan una fuente renovable continua. La fibra es afectada principalmente por la alcalinidad de la matriz de concreto. La durabilidad del compuesto dependerá entonces de la protección que tenga la fibra y de las características de impermeabilidad propias de la matriz.

*Palabras clave:* Concreto, Refuerzo, Fibra natural, Resistencia a la flexión, Curado, Colado, Reacción de hidratación, Durabilidad.

## Abstract

This research intends to find construction materials which are inexpensive and durable. Steel, glass and polymer fibers are feasible, but expensive alternatives. Natural fibers can be a real possibility for developing countries, due to the fact that these kinds of fibers are available in great quantities and the source from where they are obtained is renewable. The fiber is affected mainly by the alkalinity of the concrete matrix. The composite's durability will depend, therefore, on the protection the fiber has, and of impermeability characteristics of the matrix.

*Keyword:* Concrete, Reinforced, Natural fiber, Bending strength, Curing, Casting, Hydration reaction, Durability.

## Referencias

1. Coutts, R. S. P., Wood Fibre Reinforced Cement Composites, Concrete Technology and Design Vol. 5, Natural Fibre Reinforced Cement and

- Concrete, edited by R. N. Swamy, Blackie and Son Ltd, U.K., 1988, pp. 1–62.
2. ACI Committee 544, State-of-the-Art on Fiber Reinforced Concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 5, 1998, pp. 544.1R-1– 544.1R-66.
  3. Aziz, M. A., Paramasivam, P., Lee, S. L. Prospects of Natural Fiber Reinforced Concretes in Construction, Int. J. Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 3, No. 2, 1981, pp. 123–132.
  4. Romanh, De la Vega, C. F., Principales Productos Forestales no Maderables de México, Universidad Autónoma de Chapingo, Depto. De Enseñanza, Investigación y Servicio en Bosques, Chapingo, Méx., Publicaciones Especiales, 1984, pp. 366 – 408.
  5. Rechy de von Roth, M., Estudio Integral Tecnológico de Cinco Especies del Género Yucca para Uso Industrial, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2000, 91.
  6. Castro, J., Naaman, A. E., Cement Mortar Reinforced with Natural Fibers, ACI Journal, Proceedings, Vol. 78, No. 1, Jan-Feb 1981, pp. 69–78.
  7. Maiti, M. R., Fibras vegetales en el mundo, aspectos botánicos, calidad y utilidad, Editorial Trillas, Méx., D.F., primera edición, 1995, pp. 105–123.
  8. Aziz, M. A., Paramasivam, P., Lee, S.L., Concrete Reinforced with Natural Fibers, Concrete Technology and Design Vol. 2, New Reinforced Concretes, edited by R. N. Swamy, Surrey University Press, U.K., 1984, pp. 106–140.
  9. Lewis, G., Mirihagalia, P., Natural Vegetable Fibers as Reinforcement in Cement Sheets, Magazine of Concrete Research, Vol. 31, No. 107, 1979, pp. 104–108.
  10. Zapién, Barragán, M., Evaluación de la producción de ixtle de lechuguilla en cuatro sitios diferentes, Primera Reunión Nacional sobre Ecología, Manejo y Domesticación de las Plantas Útiles del Desierto, Memoria del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, SARH, Monterrey, N.L., Méx., 1980, pp. 385–389.
  11. Gram, H. E., Natural Fibre Concrete Roofing, Concrete Technology and Design Vol. 5, Natural Fibre Reinforced Cement and Concrete, edited by R.N., Swamy, Blackie and Son Ltd, U.K., 1988, pp. 256–285.
  12. Levine, I. N., Fisicoquímica, Cuarta edición, Vol. 1, ed. by McGraw Hill, 1996, pp. 379–382.
  13. Gram, H. E., Durability of Natural Fibres in Concrete, Concrete Technology and Design Vol. 5, Natural Fibre Reinforced Cement and Concrete, edited by R. N. Swamy, Blackie and Son Ltd, U.K., 1988, pp. 143–172.
  14. Mehta, K., Monteiro, P., Concreto estructura, propiedades y materiales, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., México, 1998, pp. 286–297.
  15. Fördös, Z., Natural or Modified Cellulose Fibres as Reinforced in Cement Composites, Concrete Technology and Design Vol. 5, Natural Fibre Reinforced Cement and Concrete, edited by R. N. Swamy, Blackie and Son Ltd, U.K., 1988, pp. 173–207.
  16. Shah, S. P., Marikunte, S.S., Fiber Reinforced Concrete, Proc. of ACBM Faculty Enhancement Workshop, 1993, pp. 226–252.