

# *Fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en materiales de construcción*

## *Natural fibers of lechuguilla as reinforcement in construction materials*

*César Juárez\*, Pedro Valdez\*, Alejandro Durán\**

*\* Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nueva León, MÉXICO  
cjuarez@fic.uanl.mx*

*Fecha de recepción: 30/ 12/ 2003  
Fecha de aceptación: 24/ 05/ 2004*

### *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 natural es afectada principalmente por la alcalinidad de la matriz cementante del concreto. La durabilidad del compuesto dependerá entonces de la protección que tenga la fibra y de las características de impermeabilidad propias de la matriz cementante.*

*Palabras clave: Concreto, refuerzo, fibra natural, resistencia a la flexión, curado, colado, reacción de hidratación, durabilidad*

### *Abstract*

*This research intends to identify both inexpensive and durable construction materials. Steel, glass and polymer fibers are feasible, 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, while they are also renewable. Natural fiber affected mainly by the alkalinity of the cementitious matrix in the concrete. The durability of the composite will depend on the protection which the fiber has, and on the impermeability features of the cementitious matrix.*

*Keyword: Concrete, reinforcement, natural fiber, bending strength, curing, casting, hydration reaction, durability*

## *1. Introducción*

*Desde que las fibras de asbesto fueron relacionadas con potenciales peligros para la salud (Coutts, 1998), se inició la búsqueda de posibles sustitutos que le proporcionaran al concreto las propiedades tan favorables que el asbesto le daba, y que además fuesen 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, existe otro grupo conocido como Fibras Naturales (FN) o vegetales que han sido motivo de diversos estudios para su posible aplicación en este propósito. Materiales reforzados con FN 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 FN no procesadas. No obstante, las FN pueden ser procesadas químicamente para mejorar sus propiedades y son generalmente derivadas de la madera. Estos procesos son altamente industrializados, por lo que resultan económicamente no atractivos en*

*países en desarrollo, a tales fibras se les conoce como FN procesadas (ACI 544, 1998).*

*Las FN están disponibles razonablemente en grandes cantidades en muchos países en desarrollo y representan una fuente renovable continua (Azis et al., 1981). México es un país que posee abundante producción de FN sobre todo las de la familia del agave (Romanh, 1984). 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 maguey crece principalmente en el Valle del Mezquital ubicado en el estado de Hidalgo, mientras que la lechuguilla normalmente se desarrolla en la zona noreste de México (Maiti, 1995). Es esta última FN el motivo del presente estudio. En la Figura 1 se puede observar la planta de lechuguilla. La región ixtlera del noreste del país que comprende los estados de Coahuila, Zacatecas, Nuevo León, San Luis Potosí y Tamaulipas tiene graves carencias en vivienda (Rechy de von Roth,*

## 2. Descripción del programa experimental

2000), algunas alternativas para disminuir esta problemática bien pueden ser, la autoconstrucción de vivienda y aplicar la tecnología adecuada que les permita utilizar las FN para reducir los costos de construcción, sobre todo si se utiliza como refuerzo en el concreto (Castro y Naaman, 1981).



Figura 1. Planta de lechuguilla (*Agave lechuguilla*)

A finales de los años 60, se llevó a cabo en varios países una evaluación sistemática de las propiedades ingenieriles de las FN y de los compuestos formados por estas fibras con el cemento. Los resultados de las investigaciones indicaron que algunas FN pueden ser usadas 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, sin embargo ninguno de estos procesos involucró a la lechuguilla. Los productos hechos con cemento portland y FN no procesadas tal como el sisal, coco, caña de azúcar, bambú, yute, madera, etc., se han estudiado para determinar sus propiedades ingenieriles y su posible uso en la construcción en al menos 40 diferentes países (Azis et al., 1984). 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 FN, además de la susceptibilidad al ataque de microorganismos en presencia de la humedad (Lewis y Mirihagalia, 1979).

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

El programa consistió en pruebas a las fibras y ensayos en especímenes de concreto reforzado con FN (CRFN). Para la caracterización física de las fibras se determinó su diámetro, longitud promedio, porcentaje de absorción de agua, densidad absoluta y porosidad. También se observó para la sección transversal de la fibra, morfología por microscopía electrónica de barrido. 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 una solución alcalina ( $\text{pH} = 12.5$ ) 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 con tamaño máximo de 9 mm con una graduación conforme a ASTM C 33. Se utilizaron dos relaciones Agua / Cemento (A/C): 0.65 y 0.35, con una dosis 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). Para definir la mejor sustancia protectora, se fabricaron especímenes de referencia sin FN, así como especímenes de concreto reforzados con FN sin tratamiento y con tratamiento al 1% del volumen total de la mezcla ( $13.8 \text{ kg/m}^3$ ) y con una longitud de la fibra de 20 a 30 mm. Lo anterior se realizó por triplicado para los diferentes tratamientos y relaciones A/C. Para determinar la resistencia a flexión o módulo de ruptura de acuerdo a la norma ASTM C 78-94 se ensayaron especímenes de  $75 \times 75 \times 280 \text{ mm}$ . Una primera serie de 15 especímenes se ensayaron a los 14 días con curado estándar hasta el momento del ensayo. La 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 horas en un horno con humedad relativa de 95% a  $70^\circ\text{C}$  y posteriormente 12

horas en un horno a 70°C en ambiente seco (humedad relativa aproximadamente 50%).

Una vez que fue seleccionada la sustancia protectora para la FN, se procedió a determinar el volumen y la longitud de la FN que proporcionara el mayor módulo de ruptura de acuerdo a ASTM C 78-94. Se investigaron fibras cortas y largas distribuidas aleatoriamente, para lo cual se usaron fibras tratadas y cortadas con las siguientes longitudes: 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 y 300 mm. Asimismo, se investigó la cantidad de fibra para diferentes volúmenes absolutos de FN en la mezcla: 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0%. Todos los especímenes se ensayaron a los 14 días.

### 3. Resultados experimentales y discusión

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

Las FN fueron compradas en una compañía ixtlera de la localidad, se lavaron con agua potable para eliminar la presencia de carbohidratos libres, posteriormente fueron secadas al sol. Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio a una temperatura de 23°C. El diámetro de la fibra fue medido en ambos extremos con un vernier digital con precisión de 0.01 mm, el diámetro mayor corresponde al extremo anexo al tallo y disminuye gradualmente hasta la punta (ver Tabla 1). 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 (Zapien, 1980).

Las fibras están formadas por microceldas individuales unidas entre sí por medio de la hemicelulosa y la lignina (Gram, 1988a). En la micrografía de la Figura 2 se pueden observar las microfibras integradas entre sí las cuales forman la morfología general de la fibra. 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, éstas absorberán agua durante el mezclado, por lo cual deberá agregarse agua adicional para mantener la relación A/C. Además, las variaciones en el contenido de humedad de las fibras origina una inestabilidad en su volumen que conducirá a una pérdida de adherencia con la matriz de concreto.

En la Tabla 2 se puede apreciar que el agua se absorbe rápidamente con poco tiempo de inmersión, esto puede deberse a la acción capilar de las microceldas de la fibra.

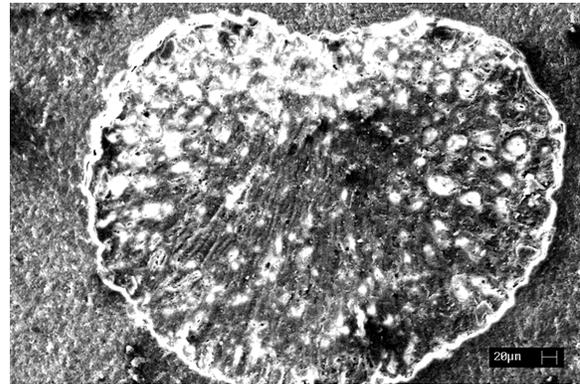


Figura 2. Sección transversal de una fibra de lechuguilla

La alta absorción de agua esta 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 3 se resumen los resultados obtenidos en la prueba. 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. Para el diseño de los proporcionamientos del CRFN, se obtuvo la densidad absoluta de la fibra en condición seca. En la Tabla 4 se presenta un resumen de los datos usados para el cálculo de las densidades.

El esfuerzo último a la tensión de la fibra fue evaluado como la relación entre la carga de falla y el área promedio bruta, determinada con el diámetro promedio medido en tres diferentes secciones transversales entre los puntos de sujeción de la fibra montada, en el dispositivo de prueba esquematizado en la Figura 3. La carga se fue aplicando en forma gradual mediante pesos conocidos midiendo la elongación de la fibra con un micrómetro de carátula con precisión de 0.01 mm. Este aparato registraba el desplazamiento 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 puede observar el comportamiento típico 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, tratando de obtener un adecuado índice de confiabilidad en los resultados.

Tabla 1. Valores de diámetros y longitudes de FN

Cantidad de fibras medidas N°	Diámetro máximo mm	Diámetro mínimo mm	Longitud total mm
PROMEDIO			
100	0.26	0.16	451
DESVIACIÓN ESTÁNDAR			
100	0.07	0.05	58

Tabla 2. Porcentaje de absorción de agua en las fibras

Muestra	Tiempo de saturación (min)	Peso saturado superficialmente seco (g)	Peso seco (g)	Peso del agua absorbida (g)	Absorción relativa al peso seco (%)
1	5	1.71	0.95	0.76	80
2	15	1.77	0.99	0.78	79
3	30	1.83	0.99	0.84	85
4	60	1.85	0.95	0.90	95
5	1440 (24 h)	1.88	0.95	0.93	98

Tabla 3. Resumen del análisis porosimétrico de las fibras

Muestra	Volumen acumulado (mm <sup>3</sup> /g)	Área específica (m <sup>2</sup> /g)	Promedio del radio del poro (Å)	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	1.28	1.63	21.44
2	197.9167	13.25	266070	1.30	1.75	25.72

Tabla 4. Densidad absoluta de la fibra

Muestra	Volumen de fibras saturadas superficialmente secas (cm <sup>3</sup> )	Peso de fibras saturadas superficialmente secas (g)	Volumen de fibras secas (cm <sup>3</sup> )	Peso de fibras secas (g)	Densidad absoluta de la fibra (g/cm <sup>3</sup> )
1	8.71	10.51	3.71	5.00	1.35
2	8.55	10.35	3.55	5.00	1.41
3	8.65	10.45	3.65	5.00	1.37

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 se separan entre sí, pero las restantes aún pueden soportar 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 fue que a mayor área bruta, la fibra soporta mas carga. Sin embargo, el esfuerzo último disminuye en las fibras con áreas brutas mayores ya que la carga se distribuye en una mayor área bruta transversal (Figura 6). Los esfuerzos últimos a la tensión en la fibra aquí reportados, para diámetros entre 0.15 y 0.25 mm, presentan una tendencia de 600 a 300 MPa, respectivamente. Todas las propiedades físico-

mecánicas determinadas resultaron similares a las reportadas por otros investigadores (Azis, 1984 y Castro, 1981).

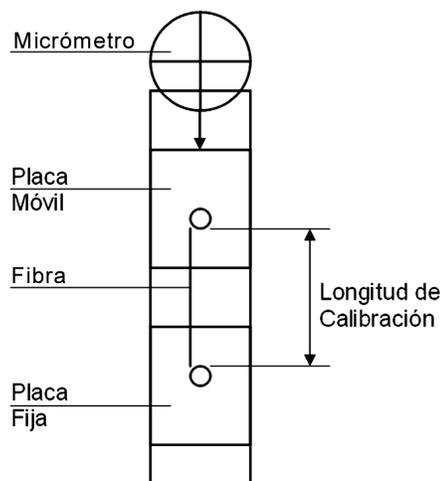


Figura 3. Croquis del dispositivo para ensayos a tensión

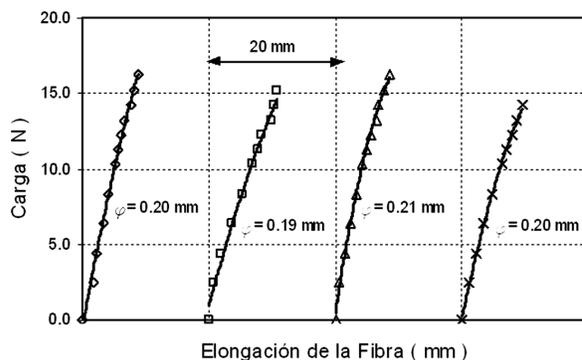


Figura 4. Curvas típicas de carga vs elongación

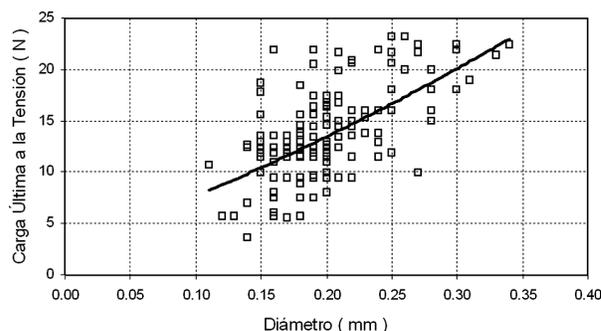


Figura 5. Variación de la carga última a tensión con respecto al diámetro de la fibra

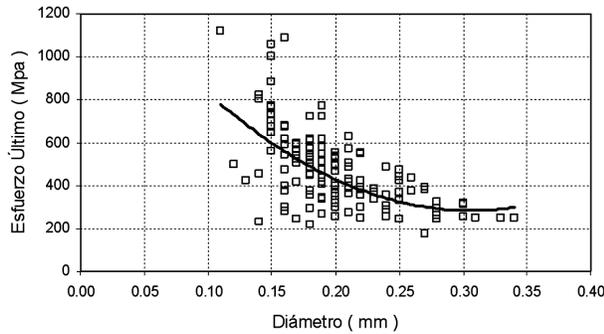


Figura 6. Variación del esfuerzo último a tensión con respecto al diámetro de la fibra

### 3.2 Tratamiento a la fibra previo al mezclado

Para reducir la cantidad de agua que puede absorber la fibra, así como para proporcionarle protección contra el medio alcalino de la pasta de cemento, se consideró utilizar sustancias que fueran hidrófobas y económicas para no encarecer el proceso tales como:

- Aceite de linaza (AL)
- Aceite de linaza + resina natural (AL+RN)
- Parafina (P)
- Parafina + resina natural (P+RN)
- Sellador para madera (S)
- Creosota (Cr)

El AL es de color ámbar, se oxida y polimeriza con facilidad, generando una película elástica. La P es una sustancia sólida a temperatura ambiente, con punto de fusión alrededor de los 67°C. La RN utilizada se le conoce como brea, a temperatura ambiente es sólida de color oscuro y frágil, entre 90 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 S y la Cr son productos industrializados y de fácil disponibilidad en el mercado.

Aprovechando las propiedades de alta absorción que tiene la fibra, se buscó la temperatura para la cual las diferentes sustancias presentan la mejor impregnación por capilaridad. Una forma inicial de evaluar la capilaridad es la tensión superficial de los líquidos que es inversamente proporcional al ascenso capilar y es menor cuando el líquido aumenta su temperatura (Levine, 1996). Para determinar la tensión superficial se utilizó un dispositivo que consiste de un anillo metálico el cual se coloca sobre la superficie de la sustancia, mediante un mecanismo mecánico se determinó la fuerza necesaria para separar el anillo de esta superficie. Los resultados obtenidos se registran en las unidades propias del dispositivo y son comparativos entre las diferentes sustancias. En la Figura

7 se puede observar que hasta temperaturas de 80°C, la Cr y el S tienen una tensión superficial mayor que las otras sustancias. Esto debido a su alta viscosidad, por lo que se dificultaría la impregnación por capilaridad de la fibra.

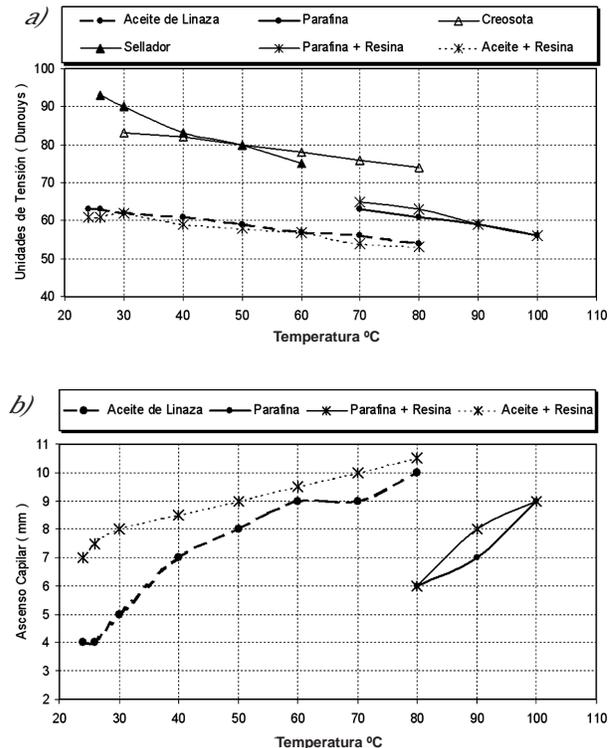


Figura 7. (a y b) Tensión superficial y capilaridad de las sustancias con respecto a la temperatura

Por esta razón, la impregnación se llevó a cabo con las sustancias AL, AL+RN, P y P+RN, que resultaron con mayor ascenso capilar. Para las sustancias AL y AL+RN la temperatura de impregnación fue 80°C y para las sustancias P y P+RN fue de 100°C. La impregnación con AL y AL+RN se realizó por inmersión de la fibra seca durante 5 minutos, 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 lo más posible en la fibra. Para la impregnación con las P y P+RN, las fibras secas se sumergieron en la sustancia durante 5 minutos, a continuación la fibra impregnada se colocó en un horno a 105°C ± 5°C durante 15 minutos para reducir la formación de grumos alrededor de las fibras, logrando con esto una distribución uniforme durante el mezclado. Las FN se trataron con las diferentes sustancias en las siguientes proporciones: AL + aguarrás (1:1), AL + RN + aguarrás (4:1:4), P no se diluyó y P + RN (4:1).

### 3.3 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, el desfibramiento y la hidrólisis alcalina (Gram, 1988b). De igual manera, la lignina que es la matriz que une las microceldas de celulosa, se fragmenta fácilmente en un medio alcalino. De acuerdo con H. E. Gram (Gram, 1988b) 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, se utilizó una solución concentrada de hidróxido de calcio disuelto en agua a temperatura de laboratorio 23°C, en la cual se sumergieron las FN tratadas. Como se puede observar en la Figura 8, el esfuerzo último a tensión en todas las fibras tuvo una tendencia a disminuir al aumentar el tiempo de exposición en la solución alcalina. Las fibras impregnadas con P presentaron un 53% del esfuerzo a tensión con respecto al esfuerzo inicial de referencia correspondiente a las fibras no expuestas a la solución alcalina, que resultó ser el porcentaje más alto. Las fibras impregnadas con el resto de las sustancias, presentaron esfuerzos últimos a la tensión bajos, similares a los obtenidos para las fibras sin tratamiento. Se observó que después del sexto mes de exposición, el ataque alcalino propició que la FN se fragilizara. En la Figura 9 se observa que el efecto de los cuatro tratamientos a las FN redujo en promedio un 35% la absorción de agua en relación a las FN sin tratar:

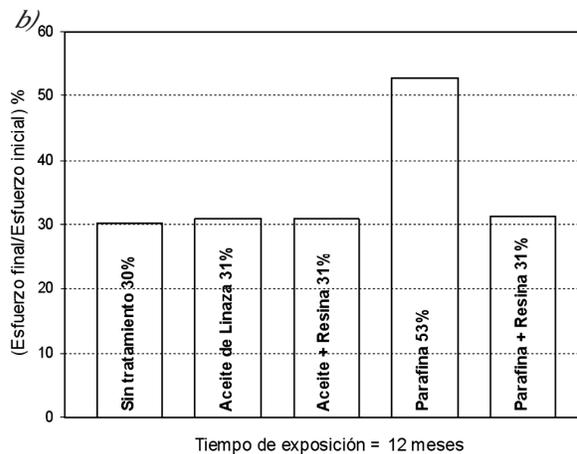
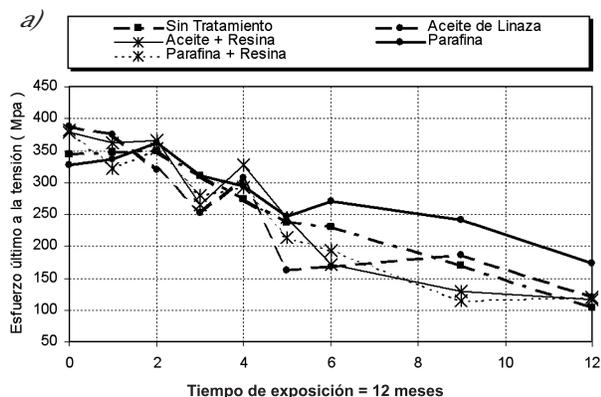


Figura 8. Efecto del medio alcalino en el esfuerzo a tensión de las fibras tratadas (a). Relación de esfuerzo sostenido después de la exposición al medio alcalino (b)

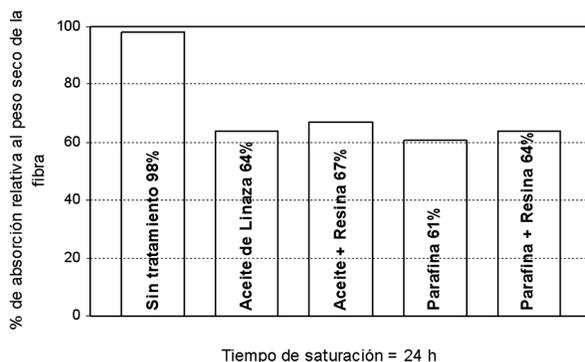


Figura 9. Porcentaje de absorción de agua en fibras tratadas

### 3.4 Ensayes en concretos reforzados con fibras

Los diferentes tipos de fibras que son utilizadas como refuerzo son las fibras de acero, vidrio, plásticas y naturales, proporcionándole al concreto ductilidad y capacidad de absorber energía. La más importante contribución de las fibras es la de incrementar la tenacidad del compuesto (Mehta y Monteiro, 1998). 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 (Fördos, 1988).

En esta investigación se evaluó el comportamiento de especímenes de CRFN con dos diferentes relaciones A/C. La relación A/C = 0.65 resultó ser una mezcla trabajable incluso con la fibra. No obstante, en el estado endurecido presentó una alta permeabilidad, por lo que su aplicación puede limitarse a elementos constructivos de bajo costo y de autoconstrucción. Para la relación A/C = 0.35 fue necesario agregar 10 ml de

aditivo superfluidificante base naftaleno 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 las sustancias protectoras de la fibra. La mezcla fue realizada como lo recomienda el Comité del ACI 544 y se vació en moldes metálicos de tres barras por molde para fabricar especímenes de  $75 \times 75 \times 280 \text{ mm}$ . Se fabricaron por triplicado barras de CRFN con fibras sin tratar y tratadas con las cuatro diferentes sustancias protectoras, para las dos relaciones A/C. Todos los especímenes se mantuvieron en sus moldes durante 24 horas protegiéndolos de la pérdida de humedad y 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 el cual es un índice de la tenacidad del compuesto. Adicionalmente, se registró 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. Del mismo modo, la Figura 11 registra los resultados de los ensayes a flexión en las barras con relación A/C = 0.65. Se puede observar que el tratamiento con P 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 concreto sin fibras. Los especímenes sin fibra resistieron mayor carga, pero su falla es frágil. Este tipo de falla no se presentó en los especímenes con fibra.



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

En los especímenes con relación A/C = 0.35 se registra mayor módulo de ruptura de acuerdo a la Figura 11. De igual forma, el CRFN tratadas con P tiene un mayor módulo de ruptura. De acuerdo a los resultados obtenidos para las dos relaciones A/C, 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 el CRFN sin tratamiento mantuvo un nivel de resistencia similar a la tratada con P. Es posible que la disminución de la adherencia debido a los cambios volumétricos de la fibra durante el proceso de mezclado provocaran la reducción del módulo de ruptura en comparación con el concreto sin fibras en el caso de la relación A/C = 0.65. En ambas relaciones A/C las curvas con mayor área de las Figuras 11 corresponde al CRFN tratada 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. 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 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 variaciones 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. Del mismo modo que los resultados en especímenes de 14 días de edad, se mantuvo una tendencia muy semejante. El tratamiento con P permite al CRFN mantener una adecuada resistencia a flexión después de los 10 ciclos. Como puede observarse en la Figura 12, el efecto de la alcalinidad de la pasta de cemento parece empezar a ser un factor de importante en la disminución de la resistencia a flexión del CRFN sin tratar, ya que para la relación A/C = 0.35 este compuesto presenta uno de los más bajos módulos de ruptura. Según los resultados de los ensayes a flexión mostrados en la Figura 12, las fibras que fueron tratadas con los aceites y la resina son las más afectadas por la reacción alcalina de la matriz de cemento. Esta reacción pudo propiciar que la adherencia entre la matriz y la fibra disminuyera fragilizando a la fibra y por consiguiente, su resistencia a flexión se redujera considerablemente.

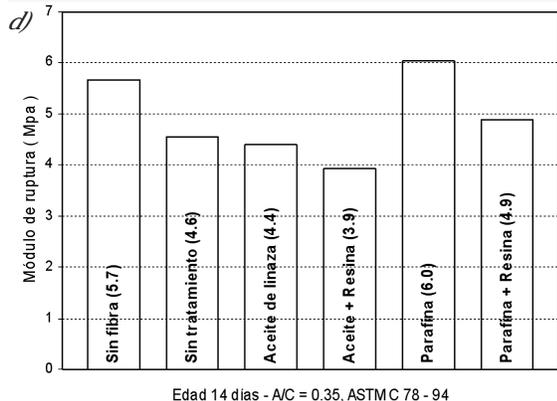
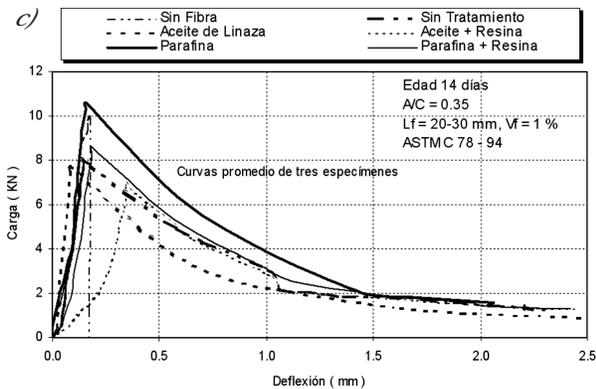
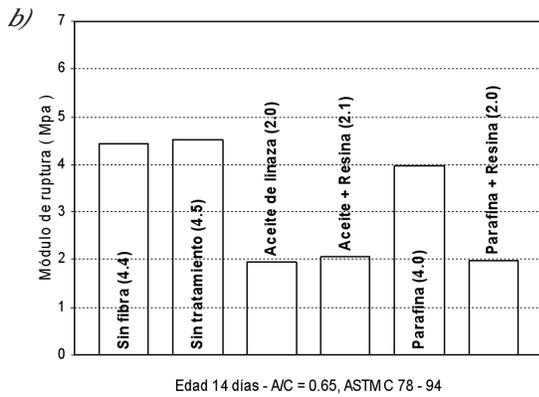
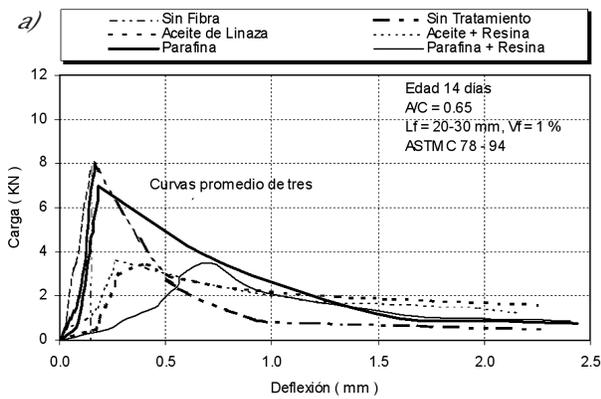


Figura 11. (a,b,c,d, respectivamente), comportamiento a flexión de especímenes de CRFN de relación A/C= 0.65 y 0.35

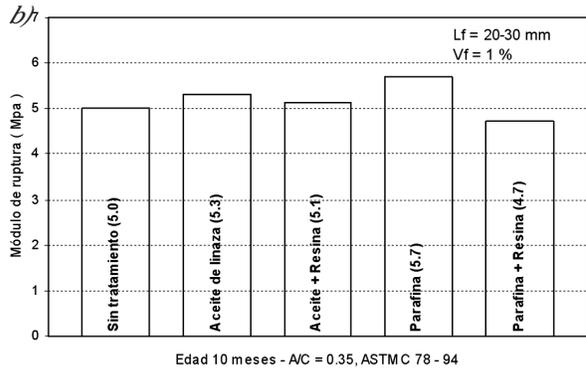
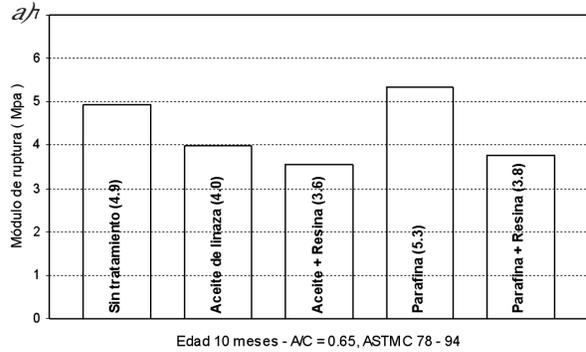


Figura 12. (a y b respectivamente), efecto de los ciclos humedecimiento y secado en la resistencia a flexión de especímenes de CRFN

### 3.5 Efecto del volumen y la longitud de la fibra

Según Aziz, Paramaswivam y Lee (Aziz, 1981), la resistencia última del CRFN depende principalmente del tipo, de la longitud y del volumen de la fibra en la mezcla. La relación de la longitud y el volumen de fibra difiere para cada tipo de FN. 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 P, 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 sustancia protectora P resultó ser la mejor 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, 1.0, 1.5 y 2.0%, y para cada volumen correspondió las siguientes longitudes de fibra: 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 y 300 mm. La Figura 13 muestra la variación del módulo de ruptura con respecto a estas variables.

De acuerdo con los resultados obtenidos para las dos relaciones A/C, el comportamiento es muy similar. Como puede observarse en la Figura 13, la fibra con longitud de 300 mm aumentó la resistencia a flexión del CRFN siendo la combinación con un volumen de fibra de 0.5% la que resultó con mayor incremento en su resistencia. Comparada con los especímenes 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 mejor adherencia.

El profesor Surendra P. Shah (Shah, 1993) 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 que produjo el primer agrietamiento, ya que en la sección agrietada la matriz no resiste tensión alguna y las fibras soportan toda la carga aplicada al compuesto. 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, lo que impide soportar cargas crecientes una vez agrietada la matriz de concreto.

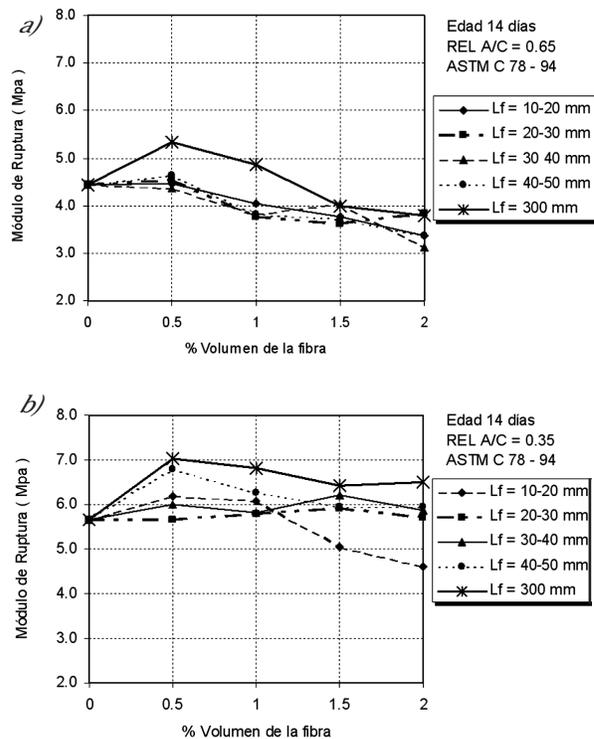


Figura 13. (a y b respectivamente), efecto del volumen y la longitud

#### 4. Conclusiones

1. Por sus significativas propiedades físico mecánicas tal como su resistencia última a tensión, las fibras naturales de lechuguilla representan una alternativa viable 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 en general resulta sumamente crítico.
3. La fibra de lechuguilla permite un comportamiento dúctil del compuesto después del primer agrietamiento de la matriz de concreto.
4. Las fibras largas adicionadas en 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.
5. La densificación de la matriz mediante la disminución de la relación A/C ayuda a reducir la absorción de agua y a incrementar su resistencia a flexión de manera significativa, para los compuestos reforzados con fibras.

## 5. Referencias

- ACI 544 (1998), Comité ACI 544 "State-of-the-Art on Fiber Reinforced Concrete", *ACI Manual of Concrete Practice, Part 5*, pp. 544.1R-1 - 544.1R-66.
- Aziz M. A., Paramasivam P., y Lee S. L. (1981), "Prospects of Natural Fiber Reinforced Concretes in Construction", *Int. J. Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 3, No. 2, pp. 123 - 132.
- Aziz M. A., Paramasivam P., y Lee S. L. (1984), "Concrete Reinforced with Natural Fibers", *Concrete Technology and Design Vol. 2, New Reinforced Concretes*, edited by R. N. Swamy, Surrey University Press, U.K., pp. 106 - 140.
- Castro J., Naaman A. E. (1981), "Cement Mortar Reinforced with Natural Fibers", *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 78, No. 1, Jan-Feb, pp. 69 - 78.
- Coutts R. S. P. (1988), "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., pp. 1 - 62.
- Fördös Z. (1988), "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., pp. 173 - 207.
- Gram H. E. (1988a), "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., pp. 256 - 285.
- Gram H. E. (1988b), "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., pp. 143 - 172.
- Levine I. N. (1996), "Físicoquímica", Cuarta edición, Vol. 1, ed. by McGraw Hill, pp. 379 - 382.
- Lewis G., Mirthagalia P. (1979), "Natural Vegetable Fibers as Reinforcement in Cement Sheets", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 31, No. 107, pp. 104 - 108.
- Maiti M. R. (1995), "Fibras Vegetales en el Mundo, Aspectos Botánicos, Calidad y Utilidad", Editorial Trillas, México D.F., Primera Edición, pp. 105 - 123.
- Mehta K., Monteiro P. (1998), "Concreto Estructura, Propiedades y Materiales", Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., México, pp. 286 - 297.
- Rechy de von Roth M. (2000), "Estudio Integral Tecnológico de Cinco Especies del Género Yucca para Uso Industrial", Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, p. 91.
- Romanh De la Vega C. F. (1984), "Principales Productos Forestales no Maderables de México", Universidad Autónoma de Chapingo, Depto. De Enseñanza, Investigación y Servicio en Bosques, Chapingo, México, Publicaciones Especiales, pp. 366 - 408.
- Shah S. P. (1993), Marikunte, S. S., "Fiber Reinforced Concrete", *Proc. of ACBM Faculty Enhancement Workshop*, pp. 226 - 252.
- Zapién Barragán M. (1980), "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., México*, pp. 385 - 389.

