
Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes.

En muchas civilizaciones de la antigüedad, las fibras se usaron para reforzar materiales. Por ejemplo, la paja se usaba como refuerzo en los adobes de arcilla para controlar la tensión por el secado y reducir el agrietamiento. Posteriormente, en la era moderna el asbesto comenzó a ser utilizado frecuentemente en muchos países. La industria de la construcción usó a gran escala las fibras minerales de asbesto en una matriz de cemento [1]. Sin embargo, debido a que se detectaron algunos daños a la salud como la asbestosis al fabricar productos de asbesto-cemento, su aplicación disminuyó considerablemente. Debido a esto, se buscó entonces sustituir el asbesto por fibras de otros materiales las cuales resultaron ser una alternativa viable [2].

En la actualidad, los materiales compuestos a base de matrices de cerámicos, plásticos y cemento incorporan fibras para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, tales como la resistencia a la tensión, a la compresión, al agrietamiento, al impacto, a la abrasión y la tenacidad [3]. Existen en la industria varios tipos de fibras que se comercializan mundialmente, los tipos básicos son las de acero, vidrio y las derivadas de hidrocarburos (plásticas). Otro grupo de fibras estudiadas para su posible aplicación, son las fibras naturales de origen vegetal. Su principal ventaja es la amplia disponibilidad sobre todo en los países pobres y en desarrollo [2].

Este grupo de fibras naturales vegetales tiene un bajo costo de producción en comparación con los otros tipos de fibras. La manufactura de fibras de acero, vidrio y plásticas requiere una considerable inversión económica lo que es difícil para los países pobres y en desarrollo, además, su producción genera un alto consumo de energía. Las

fibras naturales vegetales requieren menos energía en su proceso de extracción, aún siendo éste mecánico [4]. Esto resulta atractivo principalmente para los países en vías de desarrollo, que como ya se mencionó, tienen una amplia disponibilidad del recurso natural, pero graves carencias de vivienda e infraestructura.

Es de consideración el incremento de las actividades de investigación y las aplicaciones que se están dando al concreto reforzado con fibras en todo el mundo. La industria está interesada en las oportunidades de negocios potenciales al respecto, esto impulsa la continuación de nuevos avances en diferentes materiales fibroreforzados para su uso en la construcción [5].

1.1.1 Clasificación de las fibras.

Las fibras pueden ser clasificadas de acuerdo a su origen. Esta clasificación no pretende ser exhaustiva, sin embargo, es la utilizada por la mayoría de los investigadores en el tema [2], ver la figura 1.

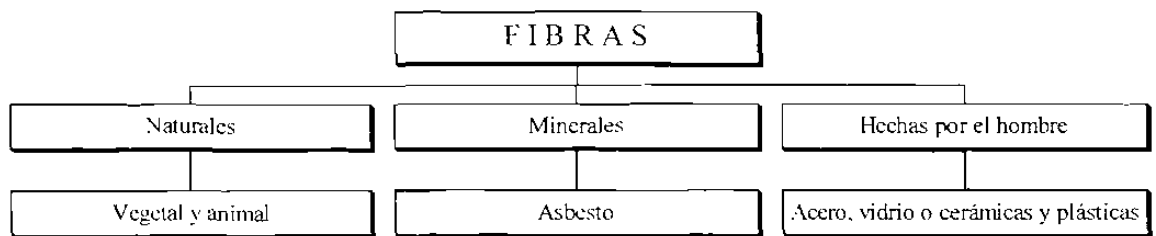


Fig. 1 Clasificación de las fibras según su origen.- Las fibras minerales y las hechas por el hombre señaladas en esta figura son las que tienen mayor aplicación como refuerzo en el concreto [2].

1.1.2 Fibras naturales vegetales.

Históricamente, las fibras naturales vegetales o simplemente fibras naturales eran usadas empíricamente para reforzar varios materiales de construcción, o bien para la producción de material textil. Sin embargo, es hasta años recientes que los científicos se han dedicado a estudiar el uso de este tipo de fibras como refuerzo en el concreto [2].

Las 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 generalmente fibras naturales no procesadas. Sin embargo, las fibras naturales pueden ser procesadas química o mecánicamente para mejorar sus propiedades, estas

fibras son generalmente de celulosa derivada de la madera. Los países desarrollados utilizan estos procesos químicos o mecánicos para su aplicación industrial, desafortunadamente su alto costo impide que sean usados en los países pobres y en desarrollo, a tales fibras se les conoce como fibras naturales procesadas [2].

Las fibras naturales están disponibles en razonablemente grandes cantidades en muchos países y representan una fuente renovable continua. A finales de los años sesenta, se llevó a cabo una evaluación sistemática de las propiedades de ingeniería de las fibras naturales, y de los compuestos hechos de estas fibras con el cemento. Aunque los resultados fueron alentadores ya que se encontró que mejoraban la resistencia a flexión y al impacto del concreto, también se reportaron algunas deficiencias respecto a su capacidad de refuerzo a largo tiempo [2]. Estas deficiencias al parecer son resultado del deterioro que sufre la fibra debido a la reacción con la pasta alcalina de cemento y al aumento del volumen de las fibras en presencia de la humedad [6].

1.1.3 Origen de las fibras naturales.

Las fibras naturales pueden provenir principalmente del tallo y de las hojas de las plantas, también puede obtenerse fibras de la cáscara superficial de algunas frutas. Sin embargo, sólo algunas de estas fibras tiene un verdadero potencial para ser consideradas como refuerzo en el concreto. A continuación se describen de manera general las fibras naturales más estudiadas para este fin.

1.1.3.1 Provenientes del tallo.

El yute, el lino, el bambú, la caña de azúcar, la hierba de China (ramie), el sunn y el kenaf son ejemplos de fibras naturales que provienen del tallo de la planta.

- a. El yute (*Corchorus capsularis*).- Crece abundantemente en Bangla Desh, China, India y Tailandia. El yute tiene una altura aproximada de 2.5 m y 25 mm de diámetro en la base del tallo. Tiene un color entre amarillo a café y está formado por grupos de fibras que se mantienen unidas por la lignina de la planta. El proceso de extracción de la fibra es simple, la planta se corta en tramos, se agrupa y se sumerge en agua por cuatro semanas para que se sature. La fibra se extrae manualmente y se deja secar al sol. El yute tiene buena resistencia a los

microorganismos e insectos. La humedad tiende a deteriorar la planta, pero en estado seco tiene una aceptable duración. Aunque ésta no es una típica planta de América, Brasil la produce a gran escala principalmente en la región del Amazonas y su explotación la realiza con bajos costos en la mano de obra [7], ver figura 2.

- b. El lino (*Linum usitatissimum*).- Es esbelto y se mantiene erguido por sus fibras. Su longitud varía de 0.15 a 0.65 m. Se considera que proporciona una fibra sumamente fuerte y tiene una alta absorción de agua [8], ver figura 2.
- c. El bambú (*Bambusa vulgaris*).- Como vegetación natural el bambú crece abundantemente en regiones tropicales y subtropicales. Es también común en América Latina y llega a tener una altura de hasta 15 m, su diámetro varía de 25 a 100 mm. Las fibras representan del 60 al 70% de su peso y se concentran en la parte exterior del bambú, además de ser relativamente largas de 2.5 a 3.5 m [9], ver figura 2.
- d. La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*).- El bagazo es el residuo fibroso que se obtiene de la caña de azúcar después de la extracción del jugo. Llega a crecer más de 6 m de alto dependiendo de la especie y del área de cultivo, tiene un diámetro de alrededor de 60 mm. El cultivo generalmente se realiza en las regiones húmedas tropicales y subtropicales [7], ver figura 2.
- e. La hierba de China o ramie (*Boemmeria nivea*).- Esta fibra crece en el sureste de Asia. Las fibras son largas y muy finas, puede procesarse generalmente para productos textiles, pero esta operación es difícil y costosa lo que hace a la fibra *incosteable* para uso general. El ramie tiene la mitad de la densidad del lino pero más fuerte y absorbente [8].
- f. El sunn (*Crotalaria juncea*).- Las fibras crecen de 1.20 a 1.50 m de longitud y se extraen en forma similar que el yute. La planta tiene un 80% de celulosa y es altamente resistente a la humedad. Esta fibra es producida principalmente en la India y en pequeñas cantidades crece en Uganda. Se utiliza generalmente para fabricar cordones, costales y papel. En la India también se utiliza como red para pescar y en algunas ocasiones como sustituto del yute en bolsas para ropa [8].

- g. El kenaf (*Hibiscus cannabinus*).- La altura del tallo de esta planta varía entre 2.40 a 3.70 m. La planta es originaria de la India y Pakistán, pero también crece en África, en el sureste de Asia, Indonesia, Rusia, México, Filipinas, Cuba y Estados Unidos. Se utiliza principalmente para fabricar cordones, lonas y costales. En algunas ocasiones sustituye al yute [8].

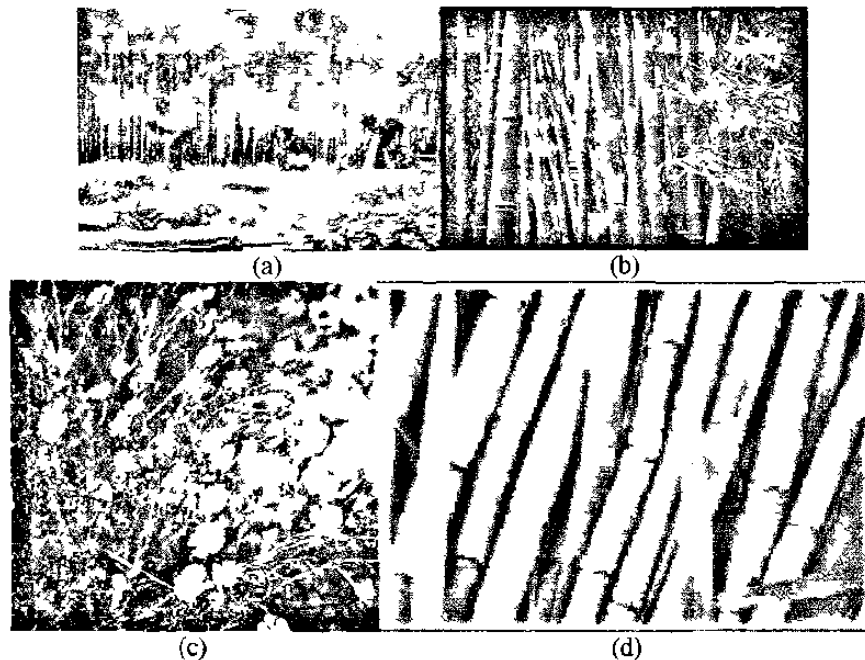


Fig. 2 (a) yute, (b) bambú. (c) lino y (d) caña de azúcar.

1.1.3.2 Provenientes de la hoja.

Las fibras naturales que provienen de las hojas de la planta, son entre las más importantes: el sisal, el henequén, la yuca, el pasto del elefante, el plátano y la piassava.

- a. El sisal (*Agave sisalana*).- Pertenece a la familia del agave y crece en México especialmente en la península de Yucatán. La planta también se cultiva en África y en algunas áreas de Suramérica. Esta fibra natural vegetal es de las más fuertes, tradicionalmente se usa como refuerzo en placas de yeso para la construcción Australiana. En los años recientes ha despertado interés en algunos grupos de investigadores y compañías de construcción el producir elementos de concreto reforzados con estas fibras naturales. Se busca que estos elementos constructivos sean durables y de buena calidad [7,10,11], ver figura 3.
- b. El henequén (*Agave fourcroydes*).- Esta planta es nativa de México. Sus fibras se obtienen por tallamiento mecánico de las hojas que tienen una longitud de 1.20 a

- 1.50 m, es también conocido como falso sisal. Es posible obtener más del 3% del peso de la hoja en fibras. Estas fibras se secan al sol tal como se hace con el sisal, sin embargo, no es tan apreciada por la industria textil ya que prefiere al sisal por su mejor trabajabilidad en la maquinaria. El principal uso del henequén es la producción de cuerdas o mecate [9], ver figura 3.
- c. La Yucca (Liliaceae).- En México las que presentan mayor densidad y tamaño son la yucca filifera, la yucca decipiens y la yucca carnerosana. Las condiciones climáticas para que se desarrollen son las clásicas de las zonas semidesérticas de México. Las fibras se obtienen separándolas manualmente, pero en algunos casos se realiza mecánicamente. El aprovechamiento de las fibras de la yucca carnerosana es principalmente para fabricar cestos, cordelería, sacos, sandalias, bolsas de mano, tejido artesanal, relleno de muebles, escobas y cepillos [12], ver figura 3.
- d. Pasto del elefante (*Pennisetum purpureum*).- Esta planta es alta y erguida, crece comúnmente cerca de arroyos y ríos. Puede llegar a crecer hasta 3 m de alto y tiene un diámetro de 20 mm. El tallo es sólido, contiene una médula de fibras blandas, la corteza es delgada y fibrosa. Las fibras son fuertes y agudas por lo que la extracción a mano se complica [7], ver figura 3.

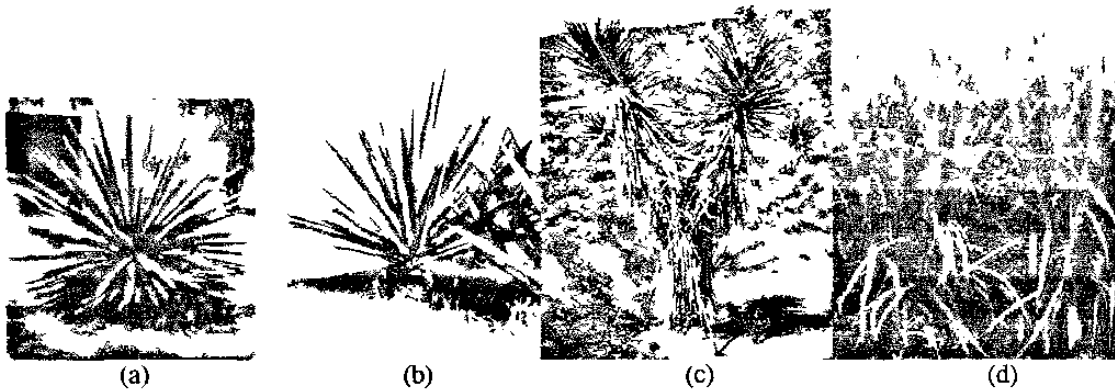


Fig. 3 (a) sisal. (b) henequén. (c) yucca y (d) pasto del elefante.

- e. El plátano (*Musa sapientum*).- Es una planta tropical de la familia de la banana. El tronco es fibroso y la fibra es fácilmente extraída a mano. Las fibras frescas son moderadamente fuertes y flexibles [7].

- c. La piassava (*Attalea funifera*).- Es una planta típica del género americana tropical, crece principalmente en el noreste de Brasil. Una vez plantada toma largo tiempo para que las hojas produzcan fibras, mínimo cuatro años. Cada hoja tiene de 500 a 800 g de fibras; éstas son de 0.5 a 0.6 m de longitud. Las fibras se fijan en los pecíolos de las hojas y son fácilmente extraídas [9].

1.1.3.3 Provenientes de la cáscara.

La principal fibra utilizada como refuerzo y que proviene de la superficie exterior de una fruta es la fibra del coco.

- a. El coco (*Cocos nucifera*).- El cultivo de esta planta se concentra en el cinturón tropical de Asia y el este de África, también se encuentra en América Latina en pequeña escala. La fruta esta cubierta por una capa superficial, la cual tiene un gran contenido de fibras. La cáscara del coco consiste de una capa dura que contiene a las fibras, éstas son normalmente de 0.15 a 0.35 m de longitud y están compuestas principalmente de lignina, taninos, celulosa, pectina además de otras sustancias solubles en agua. Las fibras son usualmente extraídas disolviendo los taninos y pectinas en el agua, del mismo modo la mayoría de las otras sustancias se descomponen. Las fibras pueden ser también extraídas por medios mecánicos [9], ver figura 4.

1.1.3.4 Celulosa proveniente de la madera.

Este tipo de fibra natural es la más utilizada en el mundo industrializado, con esta fibra se producen productos como tableros compactos para aplicaciones arquitectónicas. se obtienen generalmente de árboles de madera blanda y latifoliaeda tal como el pino. Las virutas de madera son saturadas en agua con sulfato de sodio y desfibradas mecánicamente. Las fibras de celulosa son fuertes y durables [7]. Además de la fibra, la madera se puede utilizar como virutas o como pequeñas partículas, las cuales quedan embebidas en matrices de resinas plásticas o en mezclas de concreto muy secas compactadas con presión.



Fig. 4 Palmera o árbol de coco.

1.1.4. Propiedades mecánicas de las fibras naturales.

Las fibras naturales necesitan tener adecuadas propiedades mecánicas para ser consideradas como posible refuerzo en matrices de cemento. En los últimos 30 años los investigadores interesados en este tema realizaron un gran número de trabajos para obtener esta información [2,7,9]. A continuación se presenta en la tabla 1 un resumen de las propiedades físico mecánicas de fibras naturales con mayor uso como refuerzo de concreto base cemento portland.

Tabla 1.- Propiedades Mecánicas Típicas de las Fibras Naturales [2,7,9].							
Tipo de Fibra	Longitud mm	Diámetro mm	Densidad Absoluta g/cm ³	Módulo de Elasticidad Gpa	Resistencia Última a Tensión Mpa	Elongación a la Ruptura %	Absorción de Agua %
Yute	1800 - 3000	0.10 - 0.20	1.02 - 1.04	26 - 32	250 - 350	1.5 - 1.9	62
Lino	500	-----	-----	100	1000	1.8 - 2.2	-----
Bambú	2500 - 3500	0.05 - 0.40	1.52	33 - 40	350 - 500	-----	40 - 45
Caña de azúcar	50 - 300	0.20 - 0.40	1.20 - 1.30	15 - 19	170 - 290	-----	70 - 75
Sisal	-----	0.10 - 0.50	-----	13 - 26	280 - 568	3 - 5	60 - 70
Henequén	-----	0.36	1.40	-----	91 - 307	2.3 - 7.6	163.10
Pasto de elefante	-----	0.45	-----	5	178	3.6	-----
Plátano	-----	0.43	0.298	1.4	92	5.9	276
Musamba	-----	0.82	-----	0.9	83	9.7	-----
Coco	50 - 350	0.10 - 0.40	1.12 - 1.15	19 - 26	120 - 200	10 - 25	130 - 180

1.1.5 Concreto base cemento portland reforzado con fibras.

De acuerdo con Mehta y Monteiro [13], un cemento es llamado hidráulico cuando los productos de hidratación son estables en un medio acuoso. El cemento hidráulico más común para fabricar concreto es el portland y consiste principalmente de silicatos de calcio hidráulico. Así también definen, que el concreto hidráulico es un material compuesto que consiste esencialmente de un medio conglomerante formado por una mezcla de cemento hidráulico y agua, dentro del cual se hallan ahogadas partículas o fragmentos de agregados. Los agregados pueden ser la arena, la grava o escoria de acero de alto horno. El comité 544 del Instituto Americano del Concreto (ACI) [2], define que el concreto base cemento portland reforzado con fibras naturales no procesadas o simplemente concreto reforzado con fibras está constituido por los siguientes materiales:

- a. Cemento portland.- Se recomienda que cumpla con las normas ASTM C 150 o C 595 o las equivalentes. Puede ser utilizado el ordinario (CPO), el compuesto (CPC) o los cementos con mayor contenido de silicato tricálcico (SiCa_3) y aluminato tricálcico (AlCa_3) que reducen el efecto retardante del fraguado producido por la glucosa presente en las fibras.
- b. Agregados.- Es recomendable que cumpla con la norma ASTM C 33 o su equivalente. Normalmente el concreto reforzado con fibras se fabrica con tamaños de agregado menores a 4.75 mm, por lo que también pueden ser llamados morteros. Sin embargo, en esta tesis se usará el término de concreto.
- c. Agua y aditivos.- El agua a utilizar deberá ser potable, se pueden agregar aditivos acelerantes para disminuir la influencia de la glucosa, aditivos fluidificantes para mejorar la trabajabilidad de la mezcla y también fungicidas para prevenir el ataque de bacterias y hongos.
- d. Fibras naturales.- Pueden ser utilizadas diversos tipos de fibras naturales como las descritas con anterioridad. No puede generalizarse el contenido de fibra ni su longitud, ya que cada tipo tiene sus valores idóneos. Se recomienda que estén libres de carbohidratos y sin señales aparentes de ataque de microorganismos.

Para fabricar concreto reforzado con fibras, generalmente se utiliza el siguiente método de mezclado:

- a. Mezclado húmedo.- Se utiliza un bajo contenido de fibras. Primero se colocan los agregados, se agrega el cemento con el agua y posteriormente los aditivos, todo es mezclado en una revolvedora mecánica. Finalmente se agrega la fibra tratando de dispersarla en la mezcla. El procedimiento de mezclado deberá cumplir con la norma ASTM C 94 o equivalente.

El colado se puede realizar con equipo convencional usando vibradores internos o externos para su mejor compactación. El procedimiento de mezclado, colado y compactado es muy similar al sugerido para concretos reforzados con fibras de acero, vidrio o plásticas [14]. Sin embargo, éste relativamente nuevo material de construcción requiere de cuidados especiales para evitar que se afecten sus propiedades. En la tabla 2 se presentan los diferentes factores que pueden hacer variar las propiedades del concreto. Este listado no es exhaustivo, pero enfatiza la complejidad para producir un concreto de buena calidad. El tipo y la longitud de la fibra, así como también el volumen de la fibra en la mezcla, son los factores que más influyen en la resistencia del concreto [2].

Tabla 2.- Factores que afectan las propiedades de los concretos reforzados con fibra natural [7]	
Factores	Variables
Tipo de fibra	Coco, sisal, maguey, caña de azúcar, bambú, yute, madera, pasto de elefante, plátano y musamba.
Geometría de la fibra	Longitud, diámetro, sección transversal, anillos y puntas.
Conformación de la fibra	Monofilamento, multifilamentos, rizado y nudos simples
Condiciones superficiales	Hongos, presencia de recubrimientos.
Propiedades de la matriz	Tipo de cemento, tipo de agregado y granulometría, tipos de aditivos.
Diseño de la mezcla	Contenido de agua, relación agua/cemento, trabajabilidad y contenido de fibra.
Método de mezclado	Tipo de mezcladora, secuencia al agregar los ingredientes, método para agregar las fibras, duración y velocidad del mezclado.
Método de compactación	Vibración convencional, por presión y por impacto.
Técnica de colado	Colado convencional, lanzado o por extrusión
Método de curado	Convencional, métodos especiales.

Las propiedades mecánicas de los concretos reforzados con fibras varían cuando está en estado fresco y cuando ha endurecido.

- a. Concreto fresco.- La adición de fibras naturales a la mezcla tiende a reducir la trabajabilidad, debido principalmente a la absorción de agua, al incremento del

área superficial y especialmente a la forma y tamaño de las fibras en relación con las otras partículas que constituyen la mezcla. Esto es importante, ya que una mezcla muy seca tendrá problemas de compactación originando huecos en el producto final y una distribución no uniforme de las fibras. Por otra parte, una mezcla con alto contenido de agua disminuirá considerablemente la resistencia mecánica del compuesto endurecido. Otro aspecto importante es la tendencia que tienen las fibras de aglomerarse entre sí, esto ocurre principalmente cuando se tiene una alta relación de aspecto (longitud/diámetro) de la fibra. Al aglomerarse las fibras producen una segregación en la mezcla y se incrementa la porosidad del concreto. También, se ve afectada la resistencia y se producen variaciones entre especímenes de una misma mezcla. Algunos métodos de mezclado se pueden usar para minimizar este problema, normalmente agregando las fibras en forma progresiva después que han sido mezclados los otros ingredientes. Sin embargo, las fibras permiten que la mezcla en estado fresco tenga la suficiente plasticidad para ciertas aplicaciones, como por ejemplo, en placas delgadas de pasta de cemento o mortero y cascarones como estructuras arquitectónicas [2.7].

- b. Concreto endurecido.- El concreto simple posee una excelente resistencia a la compresión, sin embargo, es frágil. Las fibras proporcionan ductilidad al concreto y permite mejorar propiedades tales como la tensión, la flexión, el impacto y la tenacidad, mientras que la resistencia a la compresión en algunas ocasiones es afectada adversamente con respecto al concreto simple. El microagrietamiento se reduce distribuyendo los esfuerzos internos. El comportamiento plástico posterior al agrietamiento es considerablemente afectado por la adherencia, el volumen y la longitud de las fibras, además de las propiedades mecánicas de éstas. La adherencia puede verse afectada debido a la expansión de la fibra dentro de la mezcla húmeda, y la posterior contracción por secado. Otras propiedades que se han evaluado son la absorción de energía, aspectos térmicos tales como conductividad, difusividad, calor específico y coeficiente de expansión térmica. Adicionalmente, se han investigado propiedades acústicas como la absorción y la transmisión del sonido, así también, la permeabilidad, la absorción de agua y las características de expansión – contracción [2.7].

1.2 Análisis de los fundamentos.

1.2.1 Reseña de estudios anteriores.

A continuación se resumen los resultados de trabajos de investigación realizados en varios lugares del mundo. Estas investigaciones dan una idea de los logros obtenidos en cada país, en donde se pretende utilizar las fibras naturales propias de cada región para aplicarlas a la construcción de infraestructura y vivienda.

1.2.1.1 Cemento – sisal.

Swift y Smith [15], fabricaron especímenes de concreto para determinar su resistencia a flexión y tenacidad. Usaron 5% en volumen de fibras de hasta 1 m de longitud alineándolas en el molde para reforzar concretos de relación agua/cemento (A/C) = 0.5. Los resultados encontrados en comparación con especímenes sin fibra fueron que se incrementó 3 veces la resistencia a flexión, 7 veces la tenacidad y 7 veces la resistencia al impacto. También se ensayaron especímenes reforzados con fibras cortas de 25 mm de longitud y distribuidas aleatoriamente encontrándose que la resistencia a flexión únicamente se incrementa un 50% y la tenacidad e impacto un 100%. Por lo que de acuerdo a sus resultados las fibras largas resultaron más efectivas. Así también, se encontró que adicionando fibras cortas junto con las fibras largas se incrementaba la resistencia a la primera grieta cuando el compuesto es sujeto a flexión.

Ribas y Moreira [16], han estudiado en Brasil el uso de fibras naturales de sisal como refuerzo en pastas y morteros. Se compararon resultados de ensayos a compresión, flexión y tensión para especímenes con fibra y sin ella. Se fabricaron cilindros de 50 mm de diámetro y 100 mm de alto, losetas de 600x600x30 mm y barras de 150x150x600 mm. Se utilizó longitudes de fibra de 20 y 50 mm que se distribuyeron aleatoriamente en la mezcla con relación $A/C = 0.74$, para las losetas se colocó fibra de 100 mm a manera de malla en la mitad del espesor. De acuerdo con los resultados obtenidos por estos investigadores los especímenes con fibras cuya longitud fue de 20 y 50 mm mantienen la misma resistencia a compresión, tensión y flexión que los especímenes sin fibra. Así

también, se observó que el agrietamiento y la ruptura ocurrían gradualmente en las losetas.

Filho [17], realizó ensayos en Brasil con fibras de sisal reforzando morteros, el estudio consideró la variación en la longitud y el volumen de la fibra, además de la condición inicial de humedad de la fibra, saturada y seca. Los resultados encontrados indican que el mortero sin fibra tiene una resistencia a flexión ligeramente mayor que los morteros con fibra de 7 y 28 días de edad, sin embargo, esta diferencia se incrementa hasta un 10% a los 63 días de edad. En lo que respecta a la humedad en la fibra se encontró que la resistencia disminuía cuando la fibra estaba previamente saturada. Finalmente, el investigador comentó que la resistencia a flexión de los especímenes es mayor en las matrices de mortero que tienen menos cantidad de fibra, en comparación con las matrices con alto contenido de fibra.

1.2.1.2 Cemento – maguey.

Castro y Naaman [18], realizaron estudios en México para tratar de utilizar las fibras de maguey en compuestos base cemento portland. De la caracterización física que realizaron en las fibras reportan longitudes de 304 a 508 mm y diámetro promedio de 0.35 mm, también obtuvieron el porcentaje de absorción de agua de la fibra resultando que se satura un 67% relativo a su peso seco en menos de 20 min y alcanza el 70% en 24 hrs. La densidad de la fibra fue obtenida con un valor de 1.24 g/cm³. Las propiedades mecánicas obtenidas de la fibra fueron la resistencia última a tensión de 552 MPa y el módulo de elasticidad de 21 GPa. Se probaron fracciones de volumen de 5 hasta 12% y según los resultados de los especímenes sometidos a ensayos de flexión, se encontró que el volumen de la fibra no influye significativamente en la resistencia a la primera grieta. Así también, los investigadores sostienen que se produce un comportamiento elástico-plástico posterior al agrietamiento para fracciones de volumen mayores a 7% y fibras continuas de 300 mm alineadas en los moldes. Estas propiedades mecánicas disminuyen cuando los especímenes son sometidos a ciclos de humedecimiento y secado, además de variaciones de temperatura. Sin embargo, reportan que la exposición de los especímenes a ambientes alcalinos generados por hidróxido de calcio y sulfato de sodio no parecen afectar su resistencia a flexión.

1.2.1.3 Cemento – coco.

Paramasivan, Nathan y Das Gupta [19], trataron de sustituir total o parcialmente las fibras de asbesto por fibras de coco en Singapur, con la finalidad de producir láminas acanaladas de concreto. Se fabricaron en el laboratorio láminas acanaladas de 10 mm de espesor y se ensayaron a flexión, así también, se fabricaron especímenes para evaluar sus propiedades térmicas y acústicas. En los ensayos de resistencia a flexión se encontró que una fracción de volumen de 3% y longitud de fibra de 25 mm resultan en mayores módulos de ruptura, comparados con otras combinaciones de cantidad y longitud de fibra. Se observó que la fibra falla por extracción. En lo que respecta a la conductividad térmica, el compuesto presenta valores entre 0.61 a 0.68 W^oK/m, lo que es comparable con resultados encontrados en placas de asbesto cemento 0.65 W^oK/m. Además, se encontró que para altas frecuencias la propiedad de absorción del sonido es mejor en este tipo de compuestos que en el asbesto cemento.

Hussin y Zakaria [20], realizaron en Malasia pruebas para utilizar en la construcción la fibra de coco como refuerzo de placas delgadas de cemento. Se ensayaron a flexión placas planas y acanaladas con un espesor de 10 mm, con relación A/C = 0.35 y contenidos de fibra de 1 a 6% por peso. Algunas placas se mantuvieron en el ambiente natural durante 3, 6 y 12 meses. Se reportó que la resistencia a flexión se incrementa conforme aumenta la cantidad de fibra hasta un 5%, después de este porcentaje la resistencia disminuye ligeramente, siendo el 4% el que presentó mayor resistencia. El comportamiento a flexión resultó ser dúctil con las mayores cantidades de fibra y en la superficie de falla se observó la ruptura de la fibra. Las placas expuestas al ambiente natural redujeron su resistencia post agrietamiento en un 30%.

Savastano Jr. [21], estudió el uso de fibras de coco como refuerzo en morteros base cemento portland en Brasil. Se probaron dos longitudes promedio de fibra de 38.2 y 9.7 mm, otras variables fueron la condición inicial de humedad en la fibra saturada y seca, la fracción de volumen de la fibra y la relación A/C de la mezcla. Se realizaron ensayos de impacto, flexión y compresión. De los cuales los resultados obtenidos indicaron que la resistencia al impacto aumentaba con la fracción de volumen, pero disminuía la resistencia a compresión. Así también, con una fracción de volumen de 3.2% se llegó a

lograr un valor máximo a flexión y tensión, y para impacto la fracción de volumen fue de 4.4%. En comparación con el mortero sin fibra se obtuvieron incrementos a tensión e impacto en un 165 y 400% respectivamente. En lo concerniente a la condición inicial de humedad de la fibra los resultados no señalan una clara diferencia. Finalmente, el investigador encontró que las fibras más largas de 38.2 mm originaron especímenes con mayor resistencia a flexión y compresión, mientras que por impacto, no parece influir el uso de fibras de 38.2 o 9.7 mm.

1.2.1.4 Cemento – bambú.

Smith [22], trabajó con fibras que fueron extraídas del bambú, encontró que utilizando la fibra sin ningún tratamiento previo el fraguado de la mezcla se retardaba debido a la acción de la glucosa presente en las fibras. Además, la resistencia a flexión del compuesto no presentaba una mejoría significativa en comparación con un concreto sin fibras. Se probaron dos métodos como posibles tratamientos a la fibra, el primero de ellos consistía en sumergir las fibras durante 15 min en cemento diluido en agua o lechada, mientras que el segundo método fue hervir las fibras durante el mismo intervalo de tiempo en agua. Posteriormente, se fabricaron cubos con las fibras ya tratadas y se ensayaron a compresión. Los cubos reforzados con fibras tratadas por el segundo método dieron una más alta carga de falla 42.2 kN, sin embargo, esta carga es menor que la carga de falla de un cubo sin fibra la cual fue 60.5 kN. Por otra parte, se fabricaron paneles encontrando que el procedimiento de compactación de los elementos afectaba considerablemente la resistencia de los mismos, así como la adecuada distribución de la fibra en la matriz. Otra observación que se realizó fue que la fibra pierde humedad dentro de la matriz de cemento y esto origina una contracción que afecta seriamente la adherencia fibra–matriz.

Krishnamurthy [23], estudió en Jordania el uso del bambú como sustituto del acero de refuerzo convencional. La investigación se concentró en mejorar la adherencia entre el bambú y la matriz de cemento, propuso tres técnicas basadas en materiales baratos y fácilmente disponibles. La primera técnica consistió en aplicar al bambú un material bituminoso y adherir arena para dar una superficie rugosa. En la segunda técnica se aplicó el mismo material bituminoso y se colocaron pequeños clavos a cada 75 mm.

Finalmente, la tercera consistió en rodear al bambú con una soga impregnada del material bituminoso, al modo de las corrugaciones en las varillas de acero. Se fabricaron 12 vigas de 100x200x1200 mm con porcentajes de refuerzo de bambú igual a 1, 2, 3 y 4%. Se observó que todas las vigas desarrollaron grietas por flexión hasta el momento de su falla y las deflexiones se incrementaron considerablemente a partir de la primera grieta. No se reporta deslizamiento del bambú en ningún caso, sin embargo, según el investigador la tercera técnica desarrolla una mejor adherencia, los resultados encontrados muestran que los porcentajes de refuerzo que proporcionan una mayor resistencia a flexión son el 3 y 4%.

1.2.1.5 Cemento–celulosa de madera.

Campbell y Coutts [24], realizaron estudios en Australia trabajando con fibra de celulosa producto de la madera, las fibras utilizadas tenían una relación de aspecto entre 50 a 60. Las propiedades mecánicas obtenidas fueron la resistencia a la tensión de la fibra que se reporta de 500 a 900 MPa y un módulo elástico de 25 a 40 GPa. Sus estudios reportan que las fibras de celulosa extraídas químicamente se mantienen estables en el medio altamente alcalino de la matriz de cemento. Otros resultados indican que las fibras extraídas utilizando sulfato de sodio (Na_2SO_4) favorecen la resistencia a flexión del compuesto, mientras que las que fueron tratadas con hidróxido de sodio (NaOH), ocasionaron una disminución en la resistencia a flexión. También reportaron, que los métodos de extracción de la fibra ya sean químicos o termomecánicos influyen considerablemente en las propiedades mecánicas del concreto. Siendo más costoso el primer método de extracción, pero los compuestos fabricados con fibras químicamente extraídas presentan una mayor resistencia a flexión.

Sarja [25,26,27], estudió en Finlandia el uso de pequeñas fibras de celulosa que junto con el cemento portland, servían para fabricar tableros con altos contenidos de fibra alrededor del 20% en volumen. Los diferentes productos que se comercializan son la lana de madera con longitud de fibra mayor a 80 mm, virutas de madera con longitud de fibra menor a 20 mm, y los tableros de cemento con pequeñas partículas de madera. La aplicación que tienen estos tableros son generalmente como paneles acústicos y térmicos. Sin embargo, agregando arena o grava, así como algunos aditivos estos

panciles pueden tener aplicación estructural. Para concretos reforzados con lana, con virutas y con partículas de celulosa de madera, además del concreto reforzado con fibra de celulosa, la densidad así como la resistencia a flexión fueron reportadas de 350–600, 400-600, 1000-1200, 1200-2000 kg/m³, y de 0.4-1.7, 0.7-1.0, 10-15 y 2-6 MPa, respectivamente. Otros resultados obtenidos por el investigador indican que la contracción del material es controlada por la pasta de cemento, mientras que la humedad presente en el material es gobernada por las fibras. Las fibras le dan porosidad al tablero, lo que ocasiona que su contenido de humedad varíe de acuerdo a las condiciones externas, esto produce contracciones y expansiones al material. La aplicación recomendada por el investigador es la construcción de pequeñas casas y remodelaciones, la fabricación de los tableros se ha industrializado en países de Europa, EUA y Canadá.

1.2.1.6 Otros tipos de fibras como refuerzo.

Lewis y Mirihagalia [28,29], realizaron en Zambia estudios sobre cuatro tipos de fibras, pasto de elefante, plátano, musamba y junco de agua. La fibra con mayor resistencia a la tensión fue el pasto de elefante con 178 MPa y un módulo de elasticidad de 5 GPa. Se reporta que todas las fibras estudiadas se ven afectadas por el medio alcalino, sin embargo, el pasto de elefante mantiene el 91% de su resistencia original a tensión después de seis meses de exposición. Mientras que, las otras fibras pierden casi toda su resistencia. Así también, se realizaron pruebas de susceptibilidad a la formación de hongos en las fibras, al exponerlas a condiciones de humedad y secado. Los resultados indicaron que la fibra de pasto de elefante mantuvo el 87% de su resistencia original, y las otras fibras se deterioraban considerablemente. Los resultados en especímenes de concreto indicaron que los compuestos reforzados con fibras de pasto de elefante mejoran la resistencia a flexión en comparación con el concreto simple.

Azim [30,31], utilizó la palma que existe abundantemente en Egipto alrededor de 15 millones de árboles. Con la finalidad de sustituir las varillas de acero de refuerzo por este tipo de fibras. Las propiedades mecánicas de las fibras de palma que se reportan son, la resistencia última a tensión entre 150 y 200 MPa y el módulo de elasticidad de 18.5 a 21.5 GPa. Se fabricaron losas para techos sustituyendo las varillas de acero por las fibras de palma, manteniendo constante el espesor de la losa. Se reporta que la fibra

posee una adecuada resistencia a soluciones químicas con pH de 1 a 13, así también que es un material de bajo costo con propiedades de aislamiento térmico.

1.2.2 Durabilidad del concreto reforzado con fibras.

Además de soportar las cargas que originan flexión, el *concreto reforzado* con fibras naturales debe también ser durable para que la inversión sea justificable. La durabilidad se relaciona con la resistencia del concreto al deterioro originado por causas externas (variaciones de humedad y temperatura del medio natural) y causas internas (reacciones químicas entre los constituyentes, relación agua/cemento, cambios volumétricos por hidratación de la pasta). Se presenta a continuación el resumen de algunos trabajos realizados sobre la durabilidad de la fibra natural y del mismo concreto.

Singh [32], investigó en la India la durabilidad de algunas fibras naturales, exponiéndolas a medios alcalinos y a ciclos de humedecimiento y secado. Además, estudió el efecto de la exposición a la intemperie en la resistencia a tensión, en fibras de coco extraídas de láminas de concreto con 10 años de edad. Se estudiaron fibras de plátano, coco, cáñamo, yute y sisal, el porcentaje de absorción de agua que se reporta fue de 301, 40, 145.5, 135.7 y 119.3% respectivamente. Posteriormente, se obtuvo la resistencia a tensión en las fibras después de exponerlas a 60 ciclos de humedecimiento y secado, en una solución saturada de hidróxido de calcio y en una solución de hidróxido de sodio. Los resultados encontrados señalan que todas las fibras disminuyen cerca del 90% su resistencia inicial, además, su flexibilidad se afecta considerablemente ya que a excepción del coco, sisal y plátano las otras fibras se fragmentan en pequeñas piezas. Así también, se reporta que las fibras de coco extraída de las láminas de concreto mantuvieron su resistencia después de 10 años a la intemperie.

Canovas, Kawiche y Selva [33], han estudiado posibles maneras de prevenir el deterioro de las fibras de sisal dentro del medio alcalino del concreto; estos estudios realizados en España son parte de una tesis doctoral que pretende solucionar en parte esta problemática. De acuerdo con estos investigadores, la resistencia de las fibras es afectada desde su proceso de extracción, aunado a las reacciones químicas que afectan la estructura interna de la fibra. Estas reacciones químicas son ocasionadas por cambios en la temperatura, presencia de humedad y alta alcalinidad. Se probaron diferentes agentes

impregnantes, los cuales fueron la colofonia+aguarrás, aceite de clavo+xilano+aguarrás+alcohol y tanino+xilano+alcohol. Después de ser impregnadas se ensayaron las fibras a tensión, siendo las fibras con aceite de clavo+xilano+aguarrás+alcohol 13:3:30:1 las que resultaron con mayor resistencia 530 MPa. Además, se obtuvo el porcentaje de absorción de agua para las mismas fibras resultando en un 34%. De los especímenes ensayados a flexión los reforzados con fibras impregnadas con colofonia+aguarrás 1:6 dieron la más alta resistencia a flexión, después de estar expuestos a ciclos de humedecimiento y secado, así como al medio natural durante 130 días.

Guimarães [34], ha trabajado desde 1980 en Brasil investigando sobre el concreto reforzado con fibras naturales, el investigador sostiene que la durabilidad es el aspecto más importante y en esta dirección se enfocan sus estudios. Impregnó a las fibras de sisal con polímeros como el polivinil-alcohol el cual se usa comúnmente en las fibras de vidrio y el poliacrilonitril, los solventes para estos polímeros fueron agua y dimetilformaldehído respectivamente. Se expusieron las fibras a un medio alcalino durante 28, 56, 84, 112 y 140 días, los resultados encontrados en las pruebas a tensión de las fibras, señalan que estos agentes impregnantes no previenen el deterioro de las mismas ya que la resistencia disminuye considerablemente. Sin embargo, las fibras impregnadas con el polivinil-alcohol y agua resultaron con una resistencia de 262 MPa la que es 78 % mayor a los 147 MPa de las fibras sin ningún tratamiento, durante 140 días en exposición al medio alcalino.

Cabe hacer mención especial, a uno de los trabajos más importantes referente a la durabilidad de las fibras naturales. El Dr. Hans Eric Gram [35,36], trabajó durante años estudiando las fibras de sisal en el instituto de investigación del concreto y cemento, en Estocolmo, Suecia. Este investigador sostiene que 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 debido a que la celulosa constituida por cadenas lineales de glucosa se disuelve cuando reacciona con el ion hidroxilo (OH^-), produciendo radicales metanol ($-\text{CH}_2\text{OH}$) el cual se desprende de la cadena molecular descomponiéndose así la estructura molecular de la celulosa. De esta manera el desfibramiento es continuo durante la exposición al medio alcalino y, ocurre a

temperaturas por debajo de los 75°C. El otro mecanismo de descomposición de la celulosa es la hidrólisis alcalina, ésta 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.

El Dr. Gram realizó ensayos a tensión en fibras sometidas a una solución concentrada de hidróxido de calcio y agua, en ambos casos la resistencia disminuyó considerablemente. En el primer caso sugiere el ataque del medio alcalino y en el segundo la acción microbiológica. De sus estudios en laboratorio detectó que cuando el compuesto era mantenido en condiciones ambientales constantes, ya sea de humedad o temperatura, era capaz de mantener su resistencia inicial. Sin embargo, cuando el compuesto era sometido a variaciones de humedad, la resistencia era seriamente afectada. Estos resultados los comprobó cuando algunos especímenes fueron expuestos durante cuatro años a los climas de Etiopía, Tailandia, Tanzania y Suecia. La resistencia a flexión se afectó considerablemente en un año en los especímenes expuestos a los climas variables de los tres primeros lugares. Mientras que el deterioro no fue tan severo para los especímenes de Suecia. Así también, encontró que en concretos carbonatados con pH menor a 9 la fibra conservaba su flexibilidad y resistencia, pero en las zonas no carbonatadas la fibra era frágil. Para experimentar en su laboratorio las variaciones de humedad y temperatura, construyó un cubículo climatizado donde exponía a los especímenes a diferentes números de ciclos. Un ciclo consistía en rociar con agua los especímenes, durante 30 min a una temperatura de 10°C. Después se secaban los especímenes calentando el cubículo hasta 105°C durante 5.5 h.

El investigador enlista las diferentes técnicas utilizadas para proteger a las fibras, bien sea usando sustancias que reaccionen químicamente con ellas, como silicato de sodio, sulfito de sodio, sulfato de magnesio, compuestos de hierro y cobre, sal de bario, antioxidantes, sales de sulfitos, sulfato de sodio, nitritos, ácido hidrosulfúrico, compuestos de cromo y arsénico, pentaclorofenol, etc. Así también, agentes repelentes al agua, como resinas epóxicas y plásticas, azufre, productos bituminosos, aceite de linaza con aguarrás, barnices, estearato de calcio, ceras, silicones, alquitrán, plásticos, dicloro polivinil, estearato de cromo, asfalto, estearato de sodio y ácido esteárico. Los resultados

encontrados de la aplicación de las sustancias químicas y de los agentes impermeabilizantes, son que pueden afectar la adherencia entre la fibra y la matriz de cemento, que pueden disminuir la rapidez del proceso de deterioro, pero no se ha conseguido detenerlo completamente. Por otra parte, el investigador ha encontrado que la combinación de ácido esteárico con nitrato de bario protegió adecuadamente a los especímenes de concreto con fibras, cuando éstos fueron sometidos a 120 ciclos en el cubículo climatizado y a cuatro años a la intemperie en los lugares ya mencionados.

Otra forma de dar durabilidad al compuesto, de acuerdo con Gram, es el sellado de la matriz de cemento. Esto se logra con relaciones A/C bajas, alto contenido de finos, adicionando polímeros, silicones o estearatos. Impregnando exteriormente al concreto con polímeros, azufre, alquitrán, asfalto. Así también, la reducción de la alcalinidad en el agua del poro de la matriz de cemento puede ser otra alternativa, mediante el uso de cementos con alto contenido de alúmina, puzolanas como la ceniza volante, ceniza de cáscara de arroz y la pumita, además de la sustitución de importantes porcentajes de cemento por el altamente reactivo humo de sílice.

Finalmente, el Dr. Gram encontró que la resistencia a flexión de especímenes se ha mantenido después de cuatro años de exposición a la intemperie en Tanzania, cuando se utilizó fibras protegidas con ácido esteárico y nitrato de bario, además, remplazando un 40 a 50% del cemento portland por humo de sílice.

1.2.3 Aplicaciones en la construcción.

Las potenciales aplicaciones de estos concretos dependen de la capacidad de proveer un material con calidad, resistente y durable. Así como también, de la imaginación de los ingenieros y constructores para sacar provecho de las propiedades estáticas y dinámicas.

Gallegos [37], reportó que en Perú es muy utilizada la fibra proveniente de la caña del junco de agua, con estas fibras y el cemento se fabrican materiales de construcción conocidos como "quincha". Estos materiales han sido usados en la construcción de domos y cúpulas para iglesias, muros prefabricados en lugar del adobe. Industrialmente se fabrican paneles prensados de cemento y madera con buenas propiedades térmicas y acústicas, además de ser ligeros y fáciles de cortar y fijar.

Hushem [38], reportó que el 90% de la población de Bangla Desh vive en áreas rurales y utilizan bambú, yute, caña de azúcar y palma para construir sus casas. Sin embargo, éstas tienen un tiempo de vida de 2 a 3 años debido al deterioro ocasionado por insectos, microorganismos y el fuego. El bambú se utiliza como postes en la cimentación, también para muros, puertas, ventanas, techos y tuberías. El yute, la caña de azúcar y la palma sirven como material de relleno en la estructura de bambú que forma los muros y techos. El investigador sugiere aplicar un recubrimiento a las fibras naturales con sulfato de cobre, dicromato de sodio, ácido acético y agua, para incrementar la durabilidad de 4 a 5 veces con respecto a las no tratadas.

Suzuki y Yamamoto [39], proponen un material con fibras naturales para construcciones resistentes al fuego usado en Japón. De acuerdo con sus investigaciones, las fibras naturales llegan a ser incombustibles cuando son recubiertas por ceniza volante y cemento. Así también, cuando se recubren con una pasta de cemento el cual fue mezclado con cerámicos solubles en agua.

Filho, Barbosa y Ghavami [10], usaron fibras de sisal y coco para reforzar bloques de adobe. Estas fibras se protegían con agentes repelentes al agua para disminuir su porcentaje de absorción, se fabricaron adobes con 4% de fibra y se disminuyó considerablemente la fragilidad de los bloques. Estos adobes se utilizaron en la construcción de viviendas rurales del noreste de Brasil.

Acevedo, Álvarez, Navia y Muñoz [40], de la Universidad de Santiago de Chile estudiaron la aplicación de varias fibras naturales entre ellas las del maguey, reforzando matrices de cemento en la fabricación de tejas para techos. En su análisis financiero se comparó el costo en dólares americanos por m² entre tejas de mortero con fibras naturales y tejas convencionales de barro y de asbesto, obteniéndose ahorros de un 24% y 41% con respecto a las tejas de barro y a las de asbesto respectivamente.

Kadir [41], reportó en su investigación que al norte de Iraq, se utilizan desde hace tiempo las fibras vegetales como material de construcción. La madera, la caña y las hojas de varias plantas son utilizadas en la construcción de techos y muros. Las fibras refuerzan los bloques de adobe usados en estas viviendas, que deben proteger a sus habitantes de la lluvia, nieve y temperaturas que van desde -10°C en invierno, hasta los 45°C en verano.

Tabla 3.- Resumen de trabajos de investigación referentes a las propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto con fibras naturales.

TIPO DE FIBRA USADA COMO REFUERZO	ELEMENTO DE PRUEBA	TRATAMIENTO EN LA FIBRA Y % DE ABSORCIÓN DE AGUA	VOLUMEN Y LONGITUD DE FIBRA USADA	RELACIÓN A/C	TIPO DE ENSAYE	INCREMENTO DE RESISTENCIA RESPECTO A ESPECÍMENES SIN FIBRAS	REFERENCIA	COMENTARIOS
CEMENTO-SISAL	Especímenes para flexión, tenacidad e impacto	Sin tratamiento	Vf = 5 %, Lf = 25 mm y 1 m	0.50	Flexión e impacto	Para las fibras de 1 m, 300 % flexión y 700 % tenacidad e impacto.	Swift y Smith [15]	Las fibras largas resultaron mejores que las fibras cortas comparadas con una matriz sin fibra
	Especímenes para flexión	Tratamiento de aceite de clavo + xilano + aguarás + alcohol 34 % de absorción		0.45	Flexión		Canovas, Kawiche y Selva [33]	Los especímenes mantuvieron su resistencia después de ciclos de humedecimiento y secado y exposición al ambiente durante 130 días
	Especímenes para flexión	Tratamiento de ácido esteárico y nitrato de bario			Flexión		Gran [35,36]	Reemplazando un 40 a 50 % de cemento por humo de sílica la resistencia se ha mantenido 4 años e la niemperle en Tanzania
	Especímenes para flexión	Sin tratamiento, 70 % de absorción	Vf = 7 %, Lf = 300 mm		Flexión		Castro y Naaman [18]	La resistencia de los especímenes disminuye con ciclos de humedecimiento y secado sin embargo, el medio alcalino no parece afectarla
CEMENTO COCO	Placas planas y acanaladas	Sin tratamiento	1 a 6 % por peso	0.35	Flexión	La resistencia fue máxima con un 4 %	Hussin y Zakaria [20]	La resistencia de las placas disminuyó un 30 % al estar expuesta al ambiente.
	Placas acanaladas	Sin tratamiento, 40 % de absorción			Flexión		Singh [32]	Las fibras de coco mantuvieron su resistencia después de 10 años en una placa de concreto a la intemperie
	Especímenes para impacto tensión y flexión	Sin tratamiento	Vf = 3.2 %, Lf = 38.2 y 9.7 mm		Impacto, tensión y flexión.	165 % para tensión y 400 % impacto.	Savastiano Jr [21]	Las fibras de 38.2 mm son mejores a flexión, mientras que para impacto no parece influir la longitud de la fibra.
CEMENTO-CELULOSA	Especímenes para flexión	Tratamiento con sulfato de sodio, hidróxido de sodio.			Flexión		Campbell y Covits [24]	Las fibras extraídas con sulfatos de sodio mejoran la resistencia a flexión del concreto

1.2.4 Situación actual y perspectivas de desarrollo.

Los resultados encontrados hasta ahora sugieren que los concretos reforzados con fibras naturales pueden ser una alternativa en la construcción de infraestructura y vivienda de bajo costo. Su utilidad se ha comprobado en varios países y su aplicación ha sido continua [42,43,44,45]. Actualmente, el interés proviene de los países pobres y en vías de desarrollo ya que son éstos los que poseen los recursos naturales, y son también, los países con mayores problemas para satisfacer la demanda de vivienda que requiere su población. Además, como lo menciona Cook [46], la crisis energética y la necesidad de producir materiales de construcción baratos motiva a países como México para tratar de aprovechar este recurso natural.

Sin embargo, es necesario avanzar mucho más en lo referente a la durabilidad del concreto con fibras. El éxito de este nuevo tipo de material de construcción depende más de su resistencia al ambiente donde se encuentre expuesto, que de sus propiedades mecánicas [35,47]. Es importante que el concreto reforzado con fibras sea capaz de soportar las cargas y desempeñar la función para la que fue diseñado, sin deterioro importante durante el transcurso de los años.

Las fibras naturales como refuerzo en el concreto, tienen un amplio campo de aplicación en la ingeniería y la arquitectura. La comparación directa entre los concretos con fibras naturales y los reforzados con fibras de alta tecnología como las de acero, vidrio y plásticas es engañosa. Ya que ciertamente los segundos tienen excelentes propiedades mecánicas y de durabilidad, por lo que son producidos industrialmente y comercializados a escala mundial [48,49,50,51]. Sin embargo, su beneficio se ve limitado a los países que tienen los suficientes medios económicos para disponer de ellos. Mientras tanto, los países pobres y en desarrollo no pueden utilizar esta tecnología para solucionar la demanda de vivienda de su población, ya que carecen de los recursos económicos necesarios. Es así como se tiene un campo de oportunidades para la explotación y utilización de los recursos naturales con que dispone cada país.

El futuro de estos posibles materiales de construcción ha sido convenientemente expresado por los siguientes investigadores:

Gram [35], sostiene que los prospectos de las fibras naturales en el concreto, pueden visualizarse si se compararan las fibras naturales con otras fibras sensibles a los álcalis, la fibra de vidrio. Durante los anteriores 30 años, se han desarrollado fibras de vidrio con mayor resistencia a los álcalis, así como productos fabricados con concreto y este tipo de fibra. Su aplicación es extensa en el mundo industrializado. Por lo que con una adecuada investigación y desarrollo, se pueden tener aplicaciones interesantes del concreto reforzado con fibras naturales.

Swamy [4,52], comenta que el concreto y el cemento reforzado con fibras naturales tienen una relevancia especial en los países en desarrollo debido a su bajo costo, rápida disponibilidad y ahorro de energía. Estos materiales pueden contribuir significativamente al rápido desarrollo de la infraestructura del país. La necesidad de desarrollar materiales de construcción localmente disponibles, mejorar la calidad de los productos y comprender mejor su comportamiento en ambientes reales, no puede ser ignorada.

Así también, el Instituto Americano del Concreto (ACI), organismo de reconocido prestigio internacional menciona en una de las publicaciones del comité 544 [2]:

“El concreto reforzado con fibras naturales es adecuado para la construcción de bajo costo, lo cual es deseable en países en desarrollo. Es importante que los investigadores, los ingenieros de diseño y la industria de la construcción apoyen decididamente el uso y desarrollo de materiales de la localidad. La durabilidad y la sensibilidad a la humedad de las fibras naturales, son los aspectos críticos de estos compuestos y requieren ser investigados. Esta investigación es necesaria para entender completamente por que la humedad y los ambientes agresivos cambian los mecanismos de falla, y afectan las características de resistencia y tenacidad del compuesto. Potenciales refinamientos en la matriz de cemento, como la reducción de la alcalinidad y de la permeabilidad necesitan ser investigados mas profundamente”.

1.3 Explotación de las fibras naturales en México.

Al igual que la gran mayoría de los países en vías de desarrollo, México es un país que tiene abundante producción de fibras naturales. Así también, posee los mismos

problemas de insuficiencia de infraestructura y de vivienda que son requeridos por la población. Sin embargo, los trabajos científicos relacionados a la explotación racional de esta riqueza han sido escasos.

Belmares [53], ha utilizado fibras vegetales para reforzar matrices de poliéster. Sus estudios los ha realizado sistemáticamente utilizando fibra de la yucca carnerosana, la cual es muy común en el estado de Coahuila lugar donde se realizó la investigación. Se han reemplazado al menos parcialmente las fibras de vidrio por fibras naturales en matrices poliméricas. Belmares supone que sus resultados pueden extenderse a otras fibras duras, como el henequén y el sisal.

Castro y Naaman [18], el estudio realizado por estos investigadores ya fue mencionado en la sección 1.2.1.2, reforzando morteros base cemento portland con fibras de maguey.

Rechy de von Roth [12], realizó un amplio estudio en la zona noreste del país, con respecto a cinco especies de yucca: carnerosana, filifera, decipiens, treculeana y torreyi. Investigó para cada especie su área de distribución, hábitat y el aprovechamiento que tiene la planta actualmente. Llevó a cabo análisis anatómicos morfológicos de las plantas y estudios del suelo, así también, la dasonomía y análisis químico de las hojas. La Dra. von Roth sugiere que el aprovechamiento de la yucca se puede optimizar al usar hojas caducas, evitando de esta manera la muerte prematura de la planta. Fabricó tableros con matriz de resina de poliéster y fibras de yucca como refuerzo, obteniendo la máxima resistencia a la ruptura con fibras de 20 cm de longitud alineadas en la dirección del esfuerzo. Cuando las fibras se distribuyeron aleatoriamente la resistencia disminuyó considerablemente para longitudes de 1 y 2 cm. Otras aplicaciones que recomienda la Dra. von Roth son el uso de la fibra de yucca como refuerzo en el concreto y la obtención de celulosa de alta pureza para fabricar papel moneda.

Se han realizado otros estudios del tipo anatómico donde se investiga la manera de mejorar la calidad y el rendimiento de la fibra, los lugares donde se reproducen comúnmente, técnicas de recolección y extracción, etc. Sin embargo, la relación multidisciplinaria ha sido insuficiente para que los resultados obtenidos puedan aplicarse en la solución concreta de los problemas.

En México, existe una gran variedad de vegetación que va desde las selvas, los bosques y las zonas desérticas. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) el país puede dividirse como se indica en la figura 5.

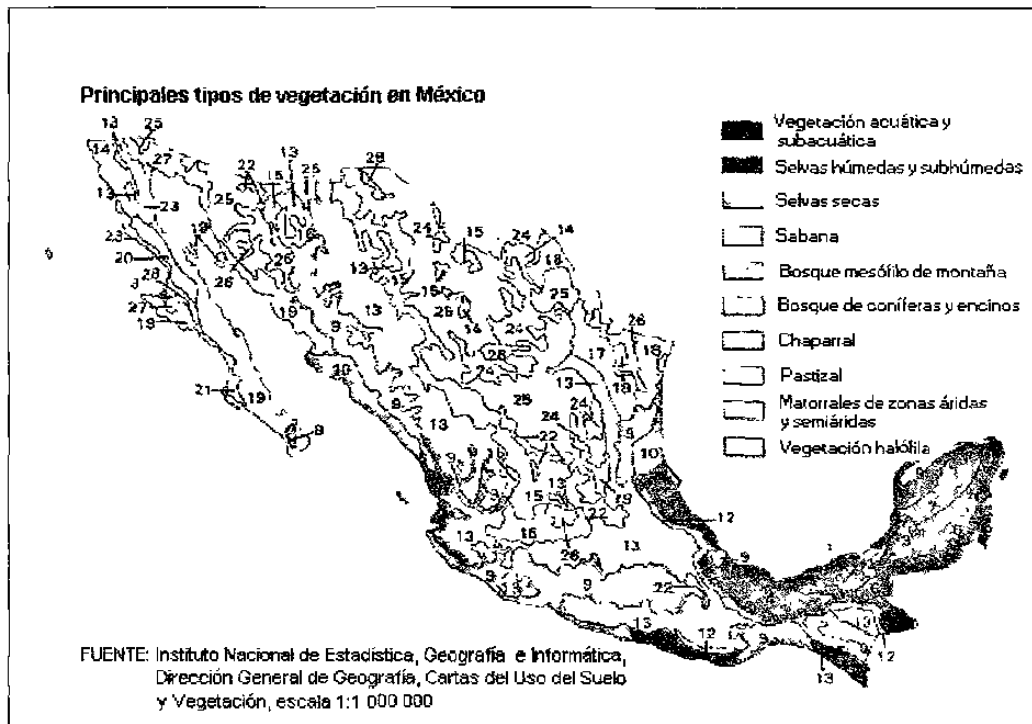


Fig. 5 Tipos de vegetación en México (INEGI, 1998). Los números indicados representan zonas con distinta cantidad de población, para un mismo tipo de vegetación.

Como puede observarse en la figura 5, son los matorrales de las zonas áridas y semiáridas el tipo de vegetación con mayor extensión en el país. A la zona del noreste que comprende los estados de Coahuila, Zacatecas, Nuevo León, San Luis Potosí y Tamaulipas se le conoce como la región ixtlera. Es en esta región donde normalmente se desarrolla la planta de lechuguilla (agave lechuguilla) ver figura 6, de la cual dependen miles de familias que habitan estas zonas las cuales ocupan una superficie del orden de las 20,000,000 ha, el equivalente al 10% del territorio nacional.

Según Zapien y de la Cruz [54,55], la lechuguilla es una planta fibrosa sumamente rústica y resistente, que prospera perfectamente en los terrenos secos, áridos y montañosos donde ninguna otra planta útil daría resultado. Su aspecto es de un pequeño maguey cuyas hojas por lo general alcanzan una longitud de 0.20 a 0.50 m, éstas nacen del tronco o cuello de la raíz. Las hojas jóvenes son de color blanquecino o verde claro,

se agrupan formando en el centro de la mata un cono apretado de hojas suaves que se denomina cogollo. Una vez que la lechuguilla ha florecido, principia la reproducción por hijos, que se manifiesta por la aparición de pequeños renuevos que salen de la raíz, después de lo cual muere la planta madre. La extracción de la fibra de lechuguilla llamada ixtle se ha venido realizando a través de los años desde 1741, haciéndolo a mano, siendo el método tradicional se considera siempre como un trabajo dilatado. Una vez extraída la fibra se deja secar al sol, para después venderse a



Fig. 6 Planta de lechuguilla (*Agave lecheguilla*)

las compañías ixtleras las cuales, dependiendo de su calidad la exportan o la venden para fabricar cordelería, costales, cepillos y otros artículos.

De acuerdo con Maiti [56], la planta prospera generalmente en suelos calizos, los cuales se pueden encontrar tanto en sierras como en terrenos planos. La altitud donde se localiza la planta varía entre 200 y 2000 m sobre el nivel del mar. La lechuguilla se adapta a suelos con profundidad desde 0.10 a 1 m, y de 20 a 85% de piedra. Los requerimientos de precipitación pluvial para que la lechuguilla se adapte varían entre los 200 y 500 mm anuales, los cuales generalmente ocurren en forma muy irregular o son de poca duración y torrenciales. En lo que respecta a la temperatura, varía de 0 a 12°C en invierno y de 43 a 46°C en primavera o verano. Así también, Maiti sugiere en sus comentarios que debido a la gran potencialidad de este recurso natural y las condiciones ecológicas de las áreas donde se localiza la lechuguilla, es imperante efectuar estudios para definir cuales ecosistemas ofrecen mayor rendimiento de fibra y de mayor calidad. Y concluye señalando, que la planta de lechuguilla tiene un gran futuro en las zonas áridas, por lo que el trabajo interdisciplinario permitirá una mejor utilización de este recurso.

De esta manera, la presente investigación se concentra en la fibra natural de lechuguilla, para ser utilizada como potencial refuerzo en el concreto. Las ventajas ya discutidas de los compuestos cemento-fibra natural en los países como México, y la amplia disponibilidad de la planta que tiene el país [57] fundamenta el presente estudio. Pero sobre todo, es necesario ofrecer alternativas viables de desarrollo para las miles de familias que habitan las zonas más pobres de México.

1.4 Definición del problema.

Miles de familias que habitan en las zonas áridas y semiáridas del país viven en una situación económica precaria. Esto es el resultado principalmente de la escasa inversión agrícola a través de los años, lo que ha motivado que los campesinos abandonen el campo y emigren a las grandes ciudades buscando nuevas oportunidades, en la mayoría de los casos sin encontrarlas. Los que se quedan sufren por las graves sequías y la falta de apoyos que minimizan la producción de sus cosechas.

La presente investigación pretende dar alternativas de solución al problema de la falta de vivienda e infraestructura necesaria tal como tuberías para conducción de agua, drenaje sanitario y pluvial, tanques de almacenamiento de agua potable y pavimentación, que permitan el desarrollo económico de la región.

1.5 Necesidad de solución.

El 6 de abril de 1998 *La Jornada* una publicación periódica de la UNAM [58], realizó un reportaje acerca de los habitantes de las zonas áridas. Se considera como zonas áridas aquellas donde no es posible obtener cosechas cosechables de cereales, a menos que se disponga de riego y en las que a causa de la escasa precipitación pluvial las cosechas sean de bajo rendimiento. En este reportaje se menciona que de 6,224,000 habitantes de las zonas áridas y semiáridas del país, 4,000,000 están fuera de los programas oficiales. El reportaje fue realizado en el ejido La Pinta, municipio de Vanegas, San Luis Potosí. El lugar carece de agua potable, y la actividad laboral principal es el tallado de la lechuguilla que apenas permite la mínima alimentación diaria. La perspectiva de la

población del ejido La Pinta es abandonar su tierra y *emigrar* a Saltillo o Monterrey, o bien a la frontera con los Estados Unidos de América.

En otro reportaje realizado en Bustamante, Tamaulipas por el periódico *El Norte* de Monterrey el 27 de noviembre de 1999 [59], se explica la problemática que tienen los campesinos para comercializar la lechuguilla. Las cooperativas de los ejidos han sido desplazadas por las empresas ixtleras en el mercado de la exportación de la fibra. Las utilidades que tenía la cooperativa de campesinos La Forestal F.C.L. en Saltillo, Coahuila prácticamente han desaparecido, las perspectivas resultan desfavorables sin programas de apoyo oficiales.

Por otra parte, el diagnóstico que da la Comisión Nacional de las Zonas Áridas (CONAZA) organismo del gobierno federal [60], es que debido a las características propias de las zonas áridas y semiáridas son frecuentes las sequías que afectan a los sistemas de producción, rompiendo los ciclos agrícolas y pecuarios con la consiguiente reducción de ingresos para los productores. Las sequías pueden prolongarse durante varios años y provocar desertificación y pobreza.

La CONAZA ha dividido la problemática de las zonas áridas en los siguientes fenómenos con sus características principales:

- Ecosistema frágil.- Prolongados periodos de sequía, insuficiencia de mantos acuíferos y sobre explotación de recursos naturales.
- Economía de subsistencia.- Agricultura de temporal, insuficiente infraestructura productiva, predominio de sistemas tradicionales de producción con baja tecnología, dependencia económica de la recolección de recursos silvestres y grave descapitalización de la economía campesina.
- Marginación social.- Pequeñas comunidades dispersas y aisladas con baja densidad de población, fuerte proceso de migración campo-ciudad, insuficiencia en la infraestructura y servicios de salud, graves niveles de desnutrición, analfabetismo y precarias condiciones de la vivienda y su entorno.

El problema social de estas zonas es complejo, ya que la extrema pobreza en que viven los campesinos involucra diversos factores. El agua para consumo humano escasea en muchas comunidades y en algunas de ellas es prácticamente inexistente durante largos periodos del año. En materia de salud el panorama es crítico, la carencia

de servicios elementales, de programas preventivos y de atención a la salud provoca una alta propensión a enfermedades gastrointestinales y padecimientos infecciosos, agravados por la desnutrición. En las comunidades más marginadas la canasta alimenticia es muy limitada debido a que no se incorporan productos locales, obligando a la población a gastar una proporción importante de su ingreso para adquirir otros productos complementarios de la dieta familiar. Ello genera desnutrición y mortandad infantil. Las limitaciones de la actividad productiva motiva la migración de la población joven principalmente, buscando oportunidades de empleo en centros urbanos. La población que permanece subsiste en una situación de pobreza sobre explotando algunos recursos naturales para sobrevivir. Ello incide en un deterioro profundo del frágil ecosistema árido, retroalimentando el círculo vicioso de la pobreza.

En la actualidad la CONAZA orienta sus acciones a atender a los habitantes de las comunidades marginadas que se localizan en las zonas áridas y semiáridas de los estados de Aguascalientes, Coahuila, Chihuahua, Durango, Hidalgo, México, Nuevo León, Oaxaca, San Luis Potosí, Tamaulipas y Zacatecas en donde viven cerca de 4.8 millones de habitantes rurales, ver figura 7.

En la tabla 4 se puede observar que de acuerdo a la CONAZA existen alrededor de 3.75 millones de campesinos que no gozan de los beneficios del apoyo oficial.

Tabla 4.- Comparativa nacional de zonas con y sin apoyo oficial.				
Concepto	Estados	Municipios	Localidades	Población rural
Total zonas áridas y semiáridas	23	788	68999	8515175
Universo de acción de Conaza	11	512	38916	4767095
Zonas fuera de la acción de Conaza	12	276	30083	3748080

Según la CONAZA su misión es el combate a la pobreza extrema, promoviendo el desarrollo socioeconómico de las familias que habitan en comunidades de alta y muy alta marginación de las zonas áridas y semiáridas del país. Así como participar en la protección de los recursos naturales y la lucha contra la desertificación, mediante la

ejecución de obras, acciones y proyectos. Por lo cual implementó el proyecto de desarrollo de las comunidades rurales marginadas de las áreas ixtleras.



Fig. 7 Zonas áridas y semiáridas del país según la CONAZA.

De acuerdo con la CONAZA, este proyecto tiene como fin dar respuesta a las necesidades de los habitantes en pobreza extrema de las zonas ixtleras que radican en localidades de alta y muy alta marginación. Los que dependen fundamentalmente de la recolección y el tallado de la planta de lechuguilla y palma, para la extracción de la fibra de ixtle. Esto se obtiene a través de alternativas de producción y empleo, que les permita elevar su ingreso y nivel de vida, así como atender el mejoramiento del bienestar social. Su ámbito de acción está conformado por las comunidades rurales que viven en condiciones de pobreza y cuya actividad principal es el tallado de fibra, ubicadas en los estados de Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí, Tamaulipas y Zacatecas.

En esta misma dirección, la presente investigación pretende dar alternativas para el desarrollo de la infraestructura y vivienda de estas zonas, que según la CONAZA representan un amplio porcentaje de la superficie total del país. La posible aplicación del material compuesto de concreto y fibras de lechuguilla, podrá permitir construir con una

menor inversión, tuberías para líneas de conducción de agua, canales de irrigación, tanques de almacenamiento, tanques sépticos, tuberías para drenaje sanitario y pluvial, pavimentos, paneles prefabricados para pisos y techos, láminas acanaladas y mampostería. Apoyando de esta manera, el desarrollo de estas regiones en lo referente al abastecimiento de agua potable, a la evacuación de desechos para disminuir los problemas potenciales de salud relacionados a ellos, así como también, a la mejoría de la vivienda. Además, de fomentar la autoconstrucción y la generación de fuentes de ingresos para los campesinos que fabriquen y comercialicen sus propios materiales de construcción.

Los resultados obtenidos de la investigación podrán ser sometidos a consideración de la CONAZA para su aplicación y seguimiento en las zonas necesitadas. Beneficiándose de esta manera todas las comunidades que están en el universo de acción del organismo gubernamental, sin embargo, se deberá en lo posible tratar de integrar al resto de las comunidades rurales.

1.6 Objetivos de la investigación.

- Producir un material compuesto (concreto), a partir de cemento portland y arena reforzado con fibras naturales de lechuguilla, que posea propiedades mecánicas adecuadas para ser aplicado en la construcción.
- El compuesto deberá ser resistente a las variaciones de humedad y temperatura, así como también a la exposición a ambientes agresivos. De tal manera, que se asegure una vida útil prolongada que justifique su inversión.
- Ofrecer una alternativa pertinente y factible para el desarrollo de la infraestructura y la vivienda en las comunidades de las zonas áridas y semiáridas del país, por medio de la aplicación de este material compuesto.

1.7 Hipótesis de trabajo.

El concreto base cemento portland reforzado con fibras naturales de lechuguilla, tiene las adecuadas propiedades a flexión y tensión para ser usado en la construcción.

Además, si las fibras se protegen con agentes impregnantes repelentes al agua y se disminuye el transporte de agua en los poros de la matriz de cemento, el concreto con fibras naturales tendrá la capacidad de mantener su resistencia y durabilidad después de estar sometido a ambientes agresivos y a cambios de humedad y de temperatura.

Capítulo 2

PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO 2

2. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN

Buscando ser congruente con los objetivos de la investigación, el programa experimental fue orientado fundamentalmente a investigar las propiedades físicas, mecánicas, químicas y de durabilidad de la fibra de lechuguilla. Así como el comportamiento mecánico y de durabilidad del concreto base cemento portland reforzado con este tipo de fibras naturales. Para tal fin, el trabajo experimental se dividió en 6 etapas: Caracterización de la fibra, durabilidad de la fibra, ensayos mecánicos en el concreto con fibras, durabilidad del concreto con fibras, interacción entre la fibra y la matriz de cemento y fabricación de elementos constructivos. Se estableció un objetivo fundamental para cada una de las etapas. En este capítulo se detalla el procedimiento utilizado durante el desarrollo de la investigación, posteriormente en el capítulo 3, se discutirán sus resultados correspondientes.

2.1 Caracterización de las fibras de lechuguilla.

Objetivo fundamental. Determinación de las propiedades químicas, físicas y mecánicas de las fibras de lechuguilla.

Las fibras fueron compradas en una compañía ixtlera de la ciudad 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 no tenían ningún tratamiento químico previo. Se lavaron con agua potable para tratar de eliminar los carbohidratos libres. Además, Para evitar la formación de hongos fueron expuestas al sol hasta su secado. Todas las pruebas referentes a esta sección fueron realizadas en el laboratorio a una temperatura de 23°C.

2.1.1 Composición química.

La durabilidad de la fibra es afectada por su composición y por el medio que la rodea [35], de tal manera que resulta importante la cuantificación de sus componentes básicos. Los porcentajes de celulosa, de hemicelulosa y de lignina que conforman a la fibra natural de lechuguilla, se determinaron mediante disolución en soluciones químicas de hidróxido de sodio, ácido acético y ácido sulfúrico respectivamente

- a. Determinación de holocelulosa.- La holocelulosa está constituida por celulosa y hemicelulosa, y se obtuvo sometiendo a la fibra seca a una solución de ácido acético y peróxido de hidrógeno al 30%, a razón de 2:1. Se colocaron 2 muestras secas de 3.958 y 3.828 g en la solución y se calentaron con refrigerante a reflujo hasta que tomaron un color blanco, filtrándose y lavándose con agua destilada. Posteriormente, se secaron a 100°C hasta que su peso fue constante de 3.139 y 2.836 g respectivamente.
- b. Determinación de la celulosa.- Dos muestras de fibra seca de 3.771 y 3.882 g se sometieron a una solución de hidróxido de sodio al 17.5%, a una temperatura de 20°C. Se mantuvieron en reposo durante media hora y después se calentaron ligeramente con refrigerante a reflujo hasta que cambiaron de color. Se filtraron y se lavaron con agua destilada, secándose en un horno a 100°C durante 2.5 h como mínimo hasta que su peso fue constante de 2.265 y 2.275 g respectivamente. La hemicelulosa se obtuvo de la diferencia entre la holocelulosa y la celulosa.
- c. Determinación de lignina.- Para obtener la lignina, 2 muestras de fibra seca de 4.360 y 4.175 g fueron sometidas a una solución de ácido sulfúrico al 72%. Se agitaron durante 2 h y después se agregó 60 ml de agua destilada. Se calentaron con refrigerante a reflujo por 2 h hasta que se observó un precipitado fino. Se filtraron las muestras y el precipitado se lavó con agua destilada, hasta obtener un pH neutro. Se secó a una temperatura de 100°C hasta su peso constante de 0.901 y 0.900 g respectivamente.

Las pruebas fueron realizadas por duplicado, y el porcentaje se obtuvo según la ecuación 1.

$$\%Material = \text{Peso} \left(\frac{Final}{Inicial} \right) 100 \quad (1)$$

2.1.2 Estructura microscópica.

El comportamiento físico y mecánico de las fibras depende en gran medida de la interacción entre sus componentes básicos y de la morfología de su microestructura. Por tal motivo, se observó en el microscopio electrónico de barrido (ver figura 8) la sección transversal de fibras de lechuguilla montadas verticalmente en 20 g de resina acrílica. Esta resina es a base de un monómero de metil-metacrilato al 10%, un promotor al 1% y un catalizador al 1% todos con respecto a su peso. La muestra montada en la resina se recubrió con carbono y papel aluminio para hacerla conductora.



Fig. 8 Microscopio electrónico de barrido del Doctorado de Ingeniería en Materiales, FIME, UANL.

2.1.3 Contenido de humedad.

Las fibras pueden intercambiar humedad con el ambiente relativamente muy fácil, ya sea perder o ganar humedad según las condiciones de exposición. La humedad puede existir en la fibra en dos diferentes estados, según Young [61]:

- Como agua libre o vapor de agua dentro de las cavidades de la fibra.
- Como agua constitutiva o de enlace.

Se obtuvo el contenido de humedad de 6 muestras de fibras expuestas al ambiente del laboratorio, el cual representa la humedad de las fibras al momento de su mezclado con el concreto. La humedad puede cambiar al ser diferente el tipo de exposición. La diferencia entre el peso de fibra con humedad ambiente y el peso de la fibra seca, es el

peso del agua libre en la fibra. De esta forma, el contenido de humedad en la fibra se obtiene por la relación de pesos indicada en la ecuación 2. En la tabla 9 del capítulo 3 se indican los resultados de esta prueba.

$$\text{Peso} \left(\frac{\text{Agualibre}}{\text{Fibra seca}} \right) 100 \quad (2)$$

2.1.4 Propiedades físicas y mecánicas.

Para tratar de predecir el comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras, es necesario conocer si la fibra es adecuada física y mecánicamente para ser consideradas como posible refuerzo. Las propiedades físicas obtenidas fueron el diámetro y la longitud de la fibra. Se midió el diámetro máximo y mínimo de 100 especímenes con un vernier digital de 0.01 mm de precisión, en estos especímenes se midió también su longitud respectiva. Otra propiedad física fue la absorción de agua, para evaluar esta propiedad las fibras se cortaron a una longitud aproximada de 30 mm y se formaron 5 muestras de aproximadamente 1 g cada una. Las cinco muestras fueron secadas en un horno a 100°C durante 24 h, posteriormente se pesaron en una balanza de 0.001 g de precisión obteniendo el peso seco (PS). Se saturaron en agua destilada, cada muestra con un respectivo tiempo de saturación. Los tiempos fueron de 5, 15, 30, 60 min y 24 h. Al término de cada periodo se trató de obtener la condición saturada superficialmente seca, frotando las fibras ligeramente con papel absorbente durante aproximadamente 2 min hasta que su apariencia fuera opaca sin presencia de gotas entre ellas, y al pasar nuevamente el papel no presentara humedad. Después se pesaron las muestras obteniendo el peso saturado superficialmente seco (PSSS). De esta manera, el porcentaje de absorción se obtuvo usando la ecuación 3.

$$\% \text{Absorción} = \frac{PSSS - PS}{PS} 100 \quad (3)$$

Los resultados de la prueba se indican en la tabla 10 del capítulo 3. La porosidad y densidad absoluta son otras propiedades de interés. Por tal razón, para conocer las propiedades microscópicas de la fibra tales como el tamaño del poro capilar, su densidad y porosidad, se realizaron pruebas de porosidad en las fibras utilizando un porosímetro

de intrusión de mercurio, ver figura 9. Se tomaron aleatoriamente 2 muestras de fibras naturales de 1 g aproximadamente. 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, se obtuvieron de esta prueba el promedio del radio para el poro con tamaño macro y micro, la densidad absoluta y la porosidad total, los resultados se indican en la tabla 11 del capítulo 3.

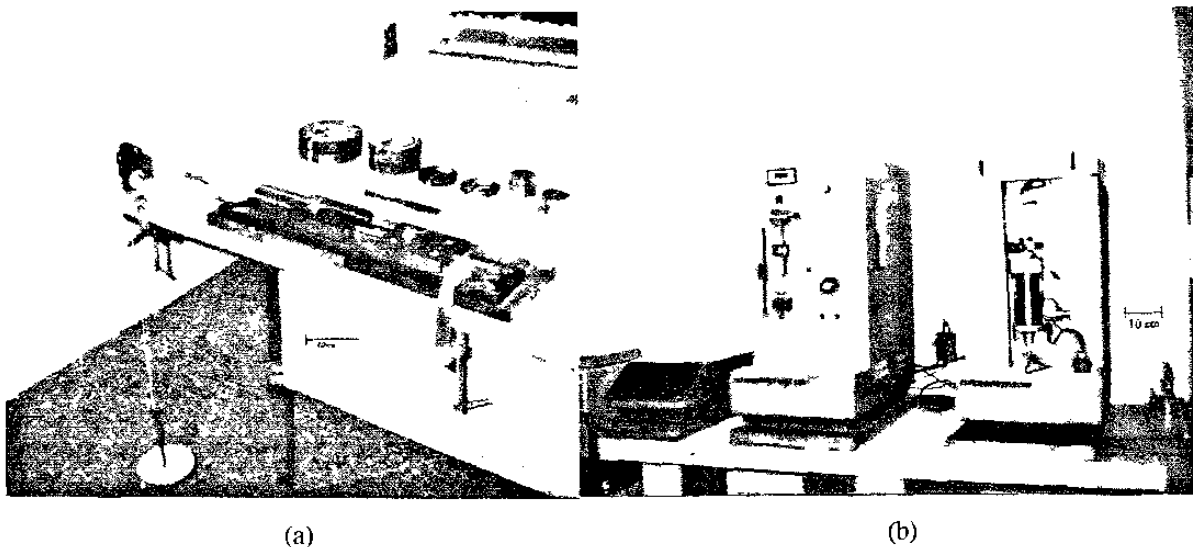


Fig. 9 (a) Dispositivo para ensayo a tensión de la fibra. (b) Porosímetro de intrusión de mercurio. Laboratorio de tecnología del concreto. Instituto de Ingeniería Civil, FIC, UANL.

Otra manera de obtener la densidad absoluta fue relacionando el peso seco entre el volumen seco de la fibra. El procedimiento usado fue el siguiente: se cortaron fibras a una longitud aproximada de 30 mm y se formaron 3 muestras de aproximadamente 5 g cada una. Las muestras fueron secadas en un horno a 100°C durante 24 h, posteriormente, se pesaron en una balanza de 0.001 g de precisión obteniendo el peso seco. Para obtener el volumen seco de las muestras, se utilizó un picnómetro el cual se pesó seco (W_1), se le agregó agua hasta la marca de aforo y se obtuvo su peso (W_2), la diferencia entre ellos es el peso del volumen de agua sin fibras. Posteriormente, se colocó en un picnómetro vacío la fibra previamente saturada superficialmente seca de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 2.1.4 y se pesó (W_3), se le fue agregando paulatinamente agua hasta llegar a la marca de aforo tratando de evitar en lo posible dejar aire atrapado, se hizo vacío y se tomó el último peso (W_4). La diferencia entre W_4 y W_3 es el peso del volumen de agua con fibras. El agregar primero la fibra y

posteriormente el agua evitó problemas como la flotación. El peso del volumen de agua que fue desalojado por la fibra se calculó con la ecuación 4.

$$(W_2 - W_1) - (W_4 - W_3) \quad (4)$$

El volumen de las fibras saturadas superficialmente secas se obtuvo dividiendo el resultado de la ecuación 4 entre la densidad del agua. Finalmente, el volumen seco de las muestras se obtuvo restando al volumen de las fibras saturadas superficialmente secas, el volumen de agua de absorción de acuerdo con el porcentaje calculado con la ecuación 3. En la tabla 12 del capítulo 3 se detallan estos cálculos.

Por otra parte, las propiedades mecánicas investigadas fueron el esfuerzo último a la tensión y el porcentaje de elongación a la ruptura. En la figura 9 se puede observar el dispositivo usado para el ensaye, que consiste de un extremo fijo y uno móvil. Se ensayaron a tensión axial 160 especímenes de fibra seleccionados aleatoriamente. El esfuerzo último a la tensión fue evaluado como la relación entre la carga de falla, y el promedio de áreas en tres secciones entre los puntos de sujeción de la fibra. Las secciones fueron medidas con un vernier digital de 0.01 mm de precisión. La fibra se ancló a los extremos fijo y móvil, se tensó ligeramente de tal manera que el primer incremento de carga produjo un esfuerzo efectivo. La longitud libre entre los puntos de sujeción fue en la mayoría de los casos de 90 mm. Se aplicaron incrementos de carga de 100 g mediante pesas calibradas y en cada incremento se registró la elongación mediante un micrómetro de carátula con una precisión de 0.01 mm. Se continuó aplicando la carga hasta la falla para registrar la carga y elongación máxima a la ruptura. El micrómetro se calibró con una lectura inicial y registró el deslizamiento del extremo móvil. Al momento de la ruptura de la fibra se tomó la lectura final en el micrómetro. Por diferencia entre la lectura final y la inicial se obtuvo la elongación última. Dividiendo la elongación última entre la longitud libre de la fibra resultó el porcentaje de elongación a la ruptura, como se indica en la ecuación 5.

$$\frac{\text{Lectura}(\text{final} - \text{inicial})}{\text{Longitud libre}} \cdot 100 \quad (5)$$

2.2 Durabilidad de la fibra.

Objetivo fundamental. Obtención del agente protector más efectivo, que reduzca significativamente la absorción de agua en la fibra y le permita conservar en el medio alcalino de la matriz de cemento sus propiedades mecánicas y de refuerzo en el largo plazo.

2.2.1 Agentes protectores.

Para reducir la alta cantidad de agua que puede absorber la fibra, y adicionalmente darle una protección contra el medio alcalino de la matriz de cemento, se buscaron sustancias principalmente orgánicas que fueran repelentes al agua, que no perjudicaran al concreto y que no fueran tóxicas durante su manejo, además de ser económicas y de fácil disposición. A continuación se describen las sustancias seleccionadas [62]:

- a. Aceite de linaza (AL). Este aceite se extrae en caliente de la semilla del lino, de color ambarino se oxida y polimeriza con facilidad, produciendo una película elástica con propiedades impermeabilizantes. Muy utilizado en la construcción para proteger las cimbras de madera.
- b. Parafina (P). Esta cera es sólida a temperatura ambiente, con punto de fusión de 67°C aproximadamente. Compuesta por una mezcla de hidrocarburos que se obtienen normalmente como subproducto de la fabricación de aceites lubricantes derivados del petróleo. Se utiliza principalmente para preparar pomadas, velas, así como también, para impermeabilizar papel y telas.
- c. Brea (R). Resina natural conocida en Europa como colofonia, la cual se obtiene de árboles coníferos como el pino. A temperatura ambiente es sólida de color oscuro y frágil. A temperaturas entre los 90 y 100°C se convierte en una sustancia viscosa, puede ser mezclada con solventes como el aguarrás (A) y no es soluble en el agua.
- d. Sellador para madera (SM). Es un barniz comercial a partir de resina nitrocelulosa, es diluida con solventes y se usa para impermeabilizar la madera y preparar la superficie para aplicar el acabado.

- e. Creosota (C). Sustancia aceitosa que se extrae del alquitrán, contiene fenol y creosol. Se emplea como germicida, insecticida y preservativo de la madera especialmente en los durmientes del ferrocarril.

2.2.2. Tensión superficial y capilaridad.

Aprovechando la facilidad de absorción de agua que tiene la fibra, se buscó la temperatura idónea de los diferentes agentes protectores para que la impregnación por capilaridad fuera eficiente. Una forma inicial de evaluar la capilaridad es la tensión superficial, la cual es la fuerza o trabajo necesario para separar las moléculas situadas en la superficie del líquido [63]. Este trabajo o tensión superficial es inversamente proporcional al ascenso capilar y es menor cuando el líquido aumenta su temperatura.

De esta manera, se investigó la temperatura idónea de los agentes protectores para que la tensión superficial fuera mínima y, por consiguiente, la capilaridad máxima. La prueba para obtener la tensión superficial de las sustancias se realizó utilizando un dispositivo mecánico. El cual posee un anillo metálico de 10 mm de diámetro aproximadamente, este anillo es colocado sobre la superficie de la sustancia y lo sostiene un sistema de palanca el cual se controla manualmente. El dispositivo cuenta con una graduación donde se registra la fuerza necesaria para separar el anillo de la superficie del líquido usando el sistema de palanca. Las unidades de la tensión superficial registradas son Donouy, propias del dispositivo utilizado. Sin embargo, esto no afectó ya que los resultados son comparativos entre las diferentes sustancias.

2.2.3 Absorción de agua en fibras tratadas.

De acuerdo con los resultados encontrados en la sección anterior correspondientes a la tensión superficial y la capilaridad, se eliminó en primera instancia el sellador para madera y la creosota, la razón se discute en el capítulo 3. Con los agentes restantes se impregnaron las fibras para tratar de proporcionarles impermeabilidad y durabilidad en el medio alcalino. Sin embargo, fue necesario utilizar 2 procedimientos de impregnación debido a la diferencia en la temperatura idónea encontrada. El primer procedimiento correspondió a las sustancias con AL y AL+R disueltos con aguarrás (A). El tratamiento fue realizado por inmersión de la fibra seca en la sustancia a 80°C durante 5 min.

Posteriormente, la fibra se sumerge en la misma sustancia pero a 24°C durante 5 min. Este ciclo se repitió 3 veces buscando que con la dilatación y contracción de la fibra debido al cambio de temperatura, la sustancia pudiera penetrar lo más posible y expulsara el aire atrapado. La fibra se dejó enfriar al ambiente durante 24 h antes de ser usada como refuerzo. El segundo procedimiento correspondió a las sustancias con P y P+R. Estas sustancias se calentaron hasta los 100°C sumergiendo la fibra seca en la sustancia durante 5 min. Posteriormente, la fibra se dejó enfriar al ambiente durante 24 h antes de ser mezclada con el concreto.

Una vez tratadas las fibras se determinó su porcentaje de absorción de agua y se comparó contra la absorción de la fibra sin tratamiento. Las fibras tratadas y secas se cortaron a una longitud aproximada de 30 mm formando 4 muestras. Se pesaron 5 g por muestra en una balanza de 0.001 g de precisión obteniendo el peso seco de la fibra tratada (PST). Se saturaron en agua destilada durante 24 h, y al término de este periodo se trató de obtener la condición saturada superficialmente seca. Después de este procedimiento se pesaron obteniendo el peso saturado superficialmente seco de la fibra tratada (PSSST). De esta manera, el porcentaje de absorción se obtuvo usando la ecuación 6.

$$\% \text{Absorción} = \frac{PSSST - PST}{PS} 100 \quad (6)$$

La diferencia entre PSSST-PST es el peso del agua de absorción, el cual dividido entre el peso seco de la fibra sin tratamiento (PS), resulta en el porcentaje de absorción de las fibras tratadas relativo al peso seco.

2.2.4 Resistencia al medio alcalino.

Para conocer la efectividad de los agentes protectores cuando la fibra tratada se encuentra en un medio alcalino. Se simuló el ambiente propio del concreto por medio de una solución concentrada de hidróxido de calcio, con un pH de 12.5. Se prepararon 4 lotes de fibras largas tratadas y el control fue de fibras sin tratamiento, cada lote tenía 120 fibras seleccionadas aleatoriamente. Las fibras se expusieron a la solución de hidróxido de calcio a una temperatura de 23°C. De acuerdo con el procedimiento

mencionado del ensaye a tensión, 12 fibras de cada lote se ensayaron cada mes, hasta los 6 meses y después cada 3 meses hasta completar 1 año de exposición. Como parámetro de referencia inicial se ensayaron 12 fibras tratadas de cada lote sin exposición en el medio alcalino. Se rechazó la carga máxima y la carga mínima de falla obteniendo un promedio de las 10 cargas restantes. Todas las fibras se secaron al ambiente durante 24 h antes del ensaye y el esfuerzo último a tensión se calculó como se mencionó en la sección 2.1.4.

2.2.5 Cambios en la humedad y temperatura del medio.

La variación en humedad y temperatura del ambiente afecta considerablemente al concreto reforzado con fibras [64]. Esta condición se trató de simular mediante la exposición de las fibras a ciclos de humedecimiento y secado, en una solución concentrada de hidróxido de calcio con $\text{pH} = 12.5$. De esta manera, se prepararon 4 lotes de 24 fibras largas tratadas y el control. Los 5 lotes se saturaron en la solución de hidróxido de calcio a 70°C durante 3 h y posterior se dejaron enfriar al ambiente durante 3 h, esto se consideró un ciclo completo. Al igual que en la sección 2.2.4 se ensayaron a tensión 12 fibras secas de cada lote al cumplir 15 y 25 ciclos, se rechazó la carga máxima y la carga mínima obteniendo un promedio de las 10 cargas restantes.

2.2.6 Efecto de sustancias químicas alcalinas y ácidas.

Las fibras de celulosa normalmente se tratan con sustancias alcalinas para eliminar la lignina, principal componente de la fibra susceptible al deterioro en la matriz de cemento [2,35,65]. Para examinar la reacción de sustancias químicas con los componentes básicos de la fibra de lechuguilla se prepararon 4 muestras de 5 g cada una, las cuales fueron expuestas durante 24 h a las siguientes sustancias: hidróxido de sodio (NaOH) al 5% en peso del agua, sulfato de sodio (Na_2SO_4) al 5% en peso del agua y silicato de sodio (Na_2SiO_3) concentrado al 30–35% y diluido en agua a razón de 1:1, además, de agua destilada como control. Las sustancias químicas que contenían a las muestras se mantuvieron dentro de un horno a una temperatura de 70°C . Al término de este tratamiento, las muestras fueron observadas y fotografiadas en el estereoscopio mostrado en la figura 10.

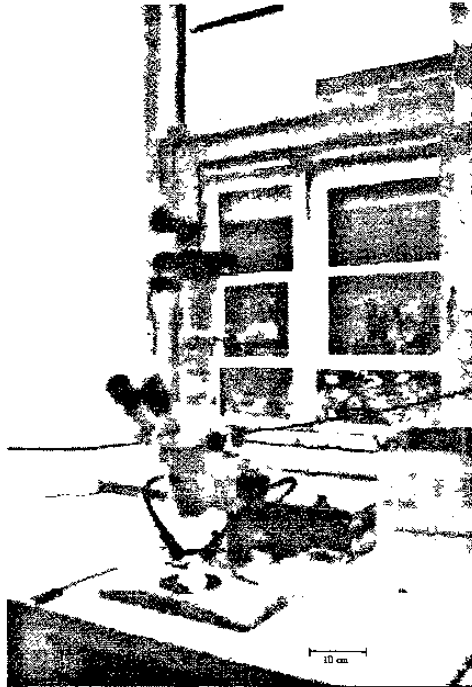


Fig. 10 Estereoscopio equipado con cámara fotográfica del laboratorio de análisis de maderas, en la Universidad de Ciencias Aplicadas en Neubrandenburg, Alemania.

2.3 Ensayes mecánicos en especímenes de concreto con fibras.

Objetivo fundamental. Selección del mejor agente protector según los resultados de ensayos a flexión y tensión en especímenes. Definido lo anterior, determinación de la longitud y el volumen en la mezcla de la fibra tratada, que resulte con el mejor comportamiento a flexión y tensión.

Aunque estrictamente se fabricaron morteros, es decir, mezclas sin agregados gruesos, en este estudio se usará el término de concreto para referirse al material estudiado. El concreto reforzado con fibras se fabricó con dos relaciones agua/cemento (A/C) de 0.65 y 0.35, las cuales tienen diferentes aplicaciones. La primera es una relación A/C alta muy común en los trabajos de albañilería, puede ser utilizada para fabricar elementos constructivos de bajo costo y para la autoconstrucción. La segunda produce un concreto de mayor densidad e impermeabilidad lo cual resulta conveniente para aplicaciones estructurales más importantes y de mayor costo [66].

2.3.1 Proporcionamientos de las mezclas.

Los especímenes de concreto con fibras se fabricaron con agregados de caliza propios de Nuevo León, México. La granulometría del agregado fue preparada de acuerdo con la norma ASTM C 33-97 [67], y se indica en la tabla 5. Así también, se utilizó cemento portland tipo CPC 30R común en la región y agua potable.

No. de malla	4	8	16	30	50	100	pasa 100
% retenido parcial	2.5	7.5	22.5	25	22.5	14	6

En la tabla 6 se pueden observar las series de proporcionamientos usadas en las secciones 2.3.2 y 2.3.3.

Materiales	Sin fibras	0.5 % de fibras	1 % de fibras	1.5 % de fibras	2 % de fibras
A/C = 0.65					
	serie 1	serie 2	serie 3	serie 4	serie 5
Agua	247.4	247.4	247.4	247.4	247.4
Cemento	380.8	380.8	380.8	380.8	380.8
Fibras		6.9	13.8	20.7	27.6
Arena	1556.6	1540.0	1526.8	1513.7	1500.5
A/C = 0.35					
	serie 6	serie 7	serie 8	serie 9	serie 10
Agua	240.3	240.3	240.3	240.3	240.3
Aditivo	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1
Cemento	706.9	706.9	706.9	706.9	706.9
Fibras		6.9	13.8	20.7	27.6
Arena	1323.0	1309.8	1296.7	1283.5	1270.4

Los porcentajes de fibra son con respecto al volumen total de la mezcla. El aditivo usado fue un superfluidificante a partir de naftaleno y se agregó a razón de 10 ml por cada kg de cemento. El volumen de la arena disminuye conforme la cantidad de fibra aumenta, esto para mantener 1 m³ de mezcla.

2.3.2 Efecto de los agentes protectores.

Se fabricaron especímenes de concreto reforzado con fibras tratadas para evaluar el efecto del tratamiento en la resistencia mecánica de los mismos. A manera de control, se fabricaron especímenes con fibra pero sin tratamiento (ST) y especímenes sin fibra (SF).

2.3.2.1 Mezclado, colado y curado.

La mezcla fue realizada en una revolvedora de trompo con una capacidad de 20 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 1 minuto, se dejó reposar 1 minuto y nuevamente se mezcló durante 1 minuto. Solamente para la relación A/C de 0.35 se agregó aditivo superfluidificante durante el minuto de reposo, para mantener la misma consistencia en todas las mezclas. Las fibras se adicionaron aleatoriamente durante el segundo tiempo de mezclado tratando de evitar que se entrelazaran, 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, el vaciado fue realizado en dos capas iguales correspondientes a la mitad de la altura del molde. Se compactó con una varilla de acero punta de bala diámetro de 6.35 mm (1/4") dando 30 golpes por capa distribuidos en toda el área, aproximadamente 1 golpe cada pulgada cuadrada. Así como 12 golpes al molde metálico por capa con un martillo de goma. En lo que respecta a los cilindros, éstos se vaciaron en tres capas compactando con 25 golpes con la misma varilla y 4 golpes por capa con el martillo de goma.

Todos los especímenes se mantuvieron en sus moldes durante 24 h protegiéndolos de la pérdida de humedad y posteriormente fueron curados en forma estándar, manteniéndolos dentro de un cuarto con 95% de humedad relativa y 23°C hasta el momento de su ensaye. El procedimiento de mezclado, colado y curado fue de acuerdo con ASTM C 192-98 [68].

2.3.2.2 Fabricación de especímenes.

Para definir que agente protector en la fibra contribuye a obtener la más alta resistencia a tensión por compresión diametral ASTM C 496-96 [69], se evaluó esta

resistencia en cilindros de concreto con fibras tratadas y el control mencionado anteriormente. Los especímenes se fabricaron por duplicado con dimensiones de 100 mm de diámetro x 200 mm de altura y con las series 3 y 8 de la tabla 6. Se utilizó una longitud de fibra de 20 a 30 mm y un volumen de fibra de 1%. Las series 3 y 8 consistieron de 12 cilindros por cada serie y edad del espécimen, correspondientes a los cuatro agentes protectores y el control. Ambas series se ensayaron a tensión a los 28, 90 y 180 días de edad.

Así también, Se determinó la influencia de los agentes protectores con respecto a la resistencia a flexión ASTM C 78-94 [70] en los especímenes de concreto con fibras. La resistencia a flexión fue determinada para barras de concreto con fibras tratadas y el control mencionado anteriormente. Los especímenes se fabricaron por triplicado con dimensiones de 75x75x280 mm. Al igual que en la resistencia a tensión, las series fueron la 3 y 8 de la tabla 6. Se utilizó una longitud de fibra de 20 a 30 mm y un volumen de fibra de 1%. Las series 3 y 8 consistieron de 18 barras por cada serie correspondiente a los cuatro agentes protectores y al control. Las series se ensayaron a flexión a los 14 días.

Por otra parte, para evaluar la efectividad del tratamiento cuando los especímenes se exponen a condiciones de variación en la humedad. Se determinó la resistencia a flexión [70] de barras de concreto con fibras correspondientes a los 4 tratamientos y el control. Los especímenes se fabricaron por triplicado y con las mismas dimensiones ya mencionadas. Nuevamente se utilizaron las series 3 y 8 y la misma longitud de fibra que la usada para los especímenes anteriores. Todas las barras se mantuvieron en el cuarto de curado durante 10 meses a 95% de humedad relativa y 23°C. Después de este tiempo fueron retiradas del cuarto de curado y sometidas a 10 ciclos de humedecimiento y secado. Cada ciclo consistió de 12 h en un horno con ambiente húmedo a 70°C, y 12 h en un horno con ambiente seco a 70°C. Las series se ensayaron a flexión a los 10 meses de edad.

La razón de escoger las series 3 y 8 y la longitud de 20 a 30 mm en esta etapa fue la de realizar pruebas iniciales para eliminar algunas variables. Además, la longitud y volumen de fibra usadas ha sido recomendadas por otros investigadores [71,72]. En la

figura 11 se puede observar especímenes de concreto con fibras durante el ensaye a flexión y tensión.

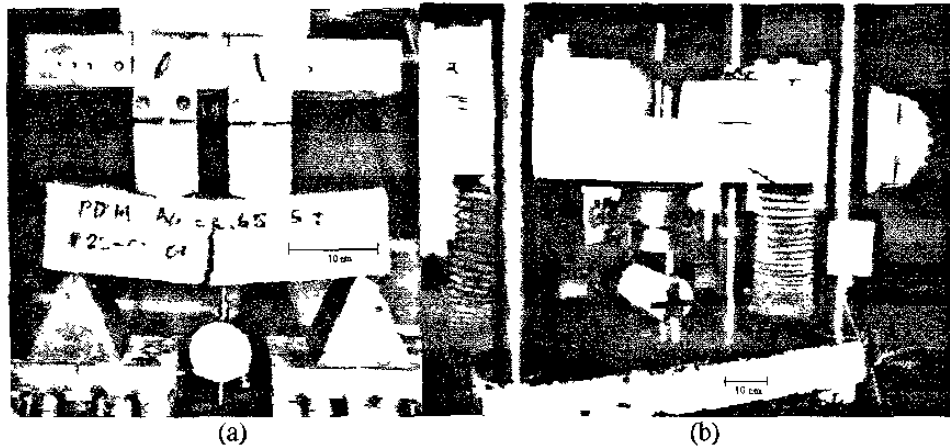


Fig. 11 (a) Ensaye a flexión ASTM C 78-94 [70]. (b) Ensaye a tensión por compresión diametral ASTM C 496-96 [69]. Máquina universal del Instituto de Ingeniería Civil, FIC, UANL.

2.3.3 Efecto del volumen y la longitud de la fibra.

De acuerdo con los resultados de las secciones 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3, 3.2.4 y 3.3.1 se seleccionó solamente un agente protector para la fibra, la parafina, en el capítulo 3 se discute al respecto. El criterio fue seleccionar el agente que mejor impermeabilizara a la fibra disminuyendo su absorción de agua. Además, el que mejor la protegiera del medio alcalino y de los cambios de humedad y temperatura. Así también, que al reforzar al concreto con la fibra tratada, éste tuviera el mejor comportamiento a flexión y tensión.

De esta manera, siguiendo con el objetivo fundamental de la presente sección, 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 y tensión en el compuesto. Se investigó la resistencia a la tensión por compresión diametral [69] y la resistencia a la flexión [70] en especímenes similares a los de la sección 2.3.2. Utilizando como refuerzo fibras cortas y largas aleatoriamente distribuidas, para lo cual se usaron fibras tratadas con parafina cortadas a las siguientes longitudes: 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 y 300 mm. Así también, el volumen de fibra se investigó probando los siguientes porcentajes del volumen total de la mezcla: 0.5, 1, 1.5 y 2%. El programa de fabricación de especímenes para los ensayos de esta sección se indican en la figura 12.

2.3.3.1 Mezclado, colado y curado.

La mezcla fue realizada en una revolvedora de contracorriente de alta velocidad con una capacidad de 40 L. El procedimiento de mezclado, colado y curado fue el mismo al mencionado en la sección 2.3.2.1, a excepción de las fibras de 300 mm las cuales se adicionaron fuera de la revolvedora, y se mezclaron aleatoriamente en forma manual.

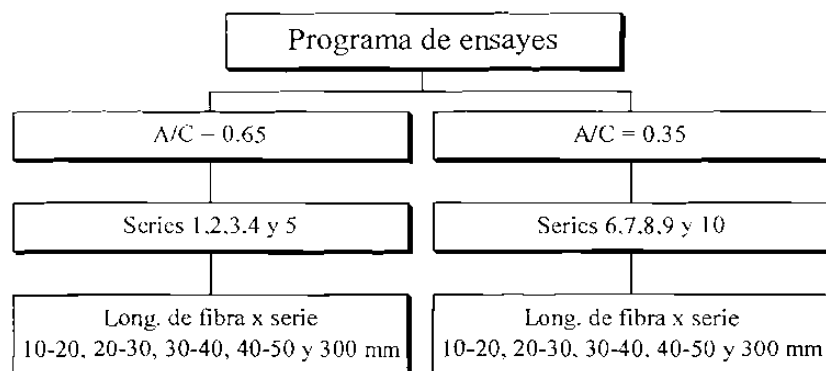


Fig. 12 Programa de ensayos variando el volumen y la longitud de la fibra.

2.3.3.2 Fabricación de especímenes.

Para evaluar el efecto del volumen y la longitud de la fibra en la resistencia a tensión, se fabricaron por duplicado cilindros de concreto con dimensiones de 100 mm de diámetro x 200 mm de altura, reforzados mediante fibras tratadas con parafina según el programa de ensayos indicado en la figura 12. Cada serie o volumen de fibra representó elaborar 10 especímenes correspondientes a las 5 longitudes de fibra tratada. Todos los especímenes se ensayaron a los 14 días, para obtener la resistencia a tensión por compresión diametral de acuerdo a la norma ASTM C 496-96 [69].

Para obtener la resistencia a flexión se fabricaron por triplicado barras de concreto con dimensiones de 75x75x280 mm y reforzadas con fibras tratadas con parafina, de acuerdo con el programa de ensayos de la figura 12. Cada serie representó 15 barras correspondientes a las 5 longitudes de fibra tratada. Todos los especímenes se ensayaron a los 14 días, para obtener la resistencia a flexión o módulo de ruptura aplicando la carga a los tercios del claro como se indica en la norma ASTM C 78-94 [70].

2.3.4 Efecto de tratamientos químicos y mecánicos en la fibra.

Las actividades de esta sección fueron realizadas durante una estancia de investigación en Alemania, por tal razón los materiales y procedimientos para la fabricación de los especímenes fueron diferentes a los usados en México. Las soluciones químicas de la sección 2.2.6, se usaron para tratar a las fibras que reforzaron a los especímenes de concreto fabricados para esta sección. Lo anterior se realizó para comparar el comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras tratadas químicamente y fibras tratadas con el agente protector seleccionado. Adicionalmente, se intentó dar rugosidad a la fibra mediante fricción en forma manual tratando con esto de incrementar la adherencia con la matriz de cemento. Primero se aplicó el tratamiento mecánico a las fibras mediante fricción. Posteriormente, se realizó el tratamiento que consistió en mantener las fibras sumergidas en las sustancias químicas durante 24 h a una temperatura de 23°C,. Al finalizar el periodo del tratamiento las fibras se lavaron con agua destilada y se secaron superficialmente antes de mezclarse con el concreto.

2.3.4.1 Proporcionamiento de la mezcla.

Los especímenes de concreto con fibras se fabricaron con agregados de río propios del norte de Alemania. La granulometría de los agregados fue preparada de acuerdo con la norma DIN 1164 [73] y se indica en la tabla 7. Se utilizó cemento portland tipo I 32,5R común en la región y agua potable.

Tabla 7.- Granulometría para las mezclas en Alemania				
Tamaño de arena (mm)	< 0.25	0.25-0.5	0.5-1.0	1.0-2.0
%	22	25	20	33

El proporcionamiento utilizado fue el recomendado por la norma DIN 1164 [73], para fabricar concreto con una relación A/C = 0.5, las cantidades se expresan en kg/m³.

- Agua = 253 L
- Cemento = 506 kg
- Arena = 1518.56 kg
- Fibra seca sin tratamiento = 13.8 kg

2.3.4.2 Mezclado, colado y curado.

Existen algunas diferencias en los materiales, procedimientos de fabricación y de ensaye, debido a las distintas normas que tiene los países. Sin embargo, los resultados son comparativos y pueden dar una tendencia que se puede relacionar con los resultados de los especímenes elaborados en México.

Para estos especímenes la mezcla fue hecha en una batidora con una capacidad de 4.73 l. Primero se mezclaron el cemento, la fibra en condición saturada superficialmente seca y el agua durante 1 min a una velocidad de 140 rpm. Posteriormente, se adicionaron los agregados y se mezcló durante 1 minuto con la misma velocidad, se incremento la velocidad a 285 rpm mezclándose durante 1 minuto. Se dejó reposar durante 1.5 minutos y finalmente se mezcló durante 1 minuto a una velocidad de 285 rpm. La mezcla se vació en moldes metálicos de tres barras por molde, el vaciado fue realizado en dos capas iguales correspondientes a 310 g de mezcla por capa. Se compactó con un equipo de impacto, en donde el molde se sujetó y mediante un excéntrico recibió 60 impactos por capa. Todos los especímenes se mantuvieron en sus moldes durante 24 h protegiéndolos de la pérdida de humedad. Posteriormente fueron curados manteniéndolos sumergidos en agua dentro de una cámara de curado con la temperatura controlada a 20°C, se retiraron de la cámara 2 h antes de su ensaye para que se secaran al ambiente, el procedimiento mencionado fue de acuerdo con la norma DIN 1164 [73].

2.3.4.3 Fabricación de especímenes.

Para evaluar el efecto en la resistencia mecánica de los especímenes, debido a los tratamientos con las sustancias químicas y la fricción en las fibras, se fabricaron por triplicado 5 series correspondientes a los tratamientos químicos y al control. Cada serie representó 3 barras de 40x40x160 mm, la longitud de la fibra fue de 20 mm y la fracción de volumen del 1%. Estos parámetros se mantuvieron constantes en todas las mezclas, ya que se trató de evaluar la eficiencia de los tratamientos químicos en la fibra. El proporcionamiento de las 5 series se indicaron en la sección 2.3.4.1. Todos los especímenes se ensayaron a los 7 días. Los ensayos para obtener la resistencia a flexión del compuesto, se realizaron aplicando la carga al centro del claro. Adicionalmente, se

ensayaron a compresión las piezas resultantes del ensaye a flexión, de acuerdo a la norma alemana DIN 1164 [73], ver figura 13.

De acuerdo con los resultados obtenidos se seleccionó solamente un tratamiento químico y se mantuvo el tratamiento de fricción en la fibra, el criterio de selección fue el concreto que tuviera mayor resistencia a flexión y compresión. De esta manera, se procedió a variar el volumen de la fibra y su longitud para comparar con los resultados obtenidos en México. Se investigó el efecto en el comportamiento a flexión y compresión de los especímenes cuando se utilizan fibras cortas y largas, para lo cual se cortaron fibras tratadas en las siguientes longitudes: 10, 20, 30 y 150 mm. Así también, el volumen de la fibra en la mezcla se investigó probando los siguientes porcentajes del volumen total de la mezcla: 0.5, 1 y 1.5 %. El proporcionamiento y la relación A/C utilizados se mencionaron en la sección 2.3.4.1. El procedimiento de mezclado fue el mismo al mencionado anteriormente, a excepción de las fibras de 150 mm las cuales se adicionaron fuera de la batidora, mezclándolas manualmente. Cada volumen de fibra representó una serie de 12 especímenes correspondientes a las 4 longitudes de fibra tratada. Al igual que en los tratamientos químicos los especímenes se ensayaron a los 7 días.



Fig. 13 (a) Ensaye a flexión. (b) Ensaye a compresión. De acuerdo con la norma DIN 1164 [73]. Máquina de pruebas del laboratorio de materiales en Neubrandenburg, Alemania.

2.3.5 Influencia de la humedad del espécimen en el ensaye.

Con la finalidad de conocer si la resistencia a tensión de los especímenes es influida por las condiciones de humedad que tienen al momento de ser ensayados. Se fabricaron por triplicado cilindros de concreto con dimensiones de 100 mm de diámetro x 200 mm de altura. La relación A/C fue de 0.5, la longitud de la fibra fue de 20 a 30 mm, y el volumen de la fibra fue el 1%. Se elaboraron 3 series cada una de 3 especímenes saturados y 3 especímenes secos. Las series correspondieron a especímenes sin fibra, con fibra sin tratamiento y con fibra tratada con parafina. La mezcla se vació en moldes cilíndricos metálicos, el procedimiento de mezclado y colado fue el mismo al descrito en la sección 2.3.2.1. Todos los especímenes se mantuvieron en sus moldes durante 24 h protegiéndolos de la pérdida de humedad. Posteriormente, para aumentar su resistencia en un periodo corto de tiempo, fueron curados en forma acelerada. Se mantuvieron sumergidos en agua, dentro de una cámara de curado con la temperatura controlada de 90°C durante 3.5 h. Los especímenes saturados se ensayaron 2 h después del curado para dejarlos enfriar y los secos se mantuvieron a temperatura ambiente durante 24 h antes de ser ensayados. Se determinó la resistencia a tensión por compresión diametral la cual se realizó de acuerdo a la norma ASTM C 496-96 [69].

2.4 Pruebas aceleradas de durabilidad del concreto con fibras.

Objetivo fundamental. Reducir mediante el uso de matrices densas el efecto adverso en la resistencia a flexión de especímenes de concreto con fibras, ocasionado por variaciones de humedad y temperatura, exposición a cloruros, a sulfatos y ambientes húmedos.

Las condiciones ideales para llevar a cabo evaluaciones de la durabilidad de un material, son la exposición de los especímenes al ambiente natural durante varios años. En un lugar donde exista una diversidad de climas, o bien, en diferentes lugares con climas y condiciones atmosféricas específicas. Sin embargo, el presente proyecto de investigación careció del tiempo necesario para desarrollar tales actividades. Por tal razón, se idearon pruebas de deterioro acelerado que pretenden simular el ambiente natural en forma crítica. Por otra parte, para proporcionarle a la fibra una protección

adicional a la dada por el agente protector, se estudiaron alternativas para producir una matriz de cemento más densa e impermeable. Se siguió utilizando las dos relaciones de $A/C = 0.65$, 0.35 y, además, se agregaron a la matriz ingredientes no convencionales, estos fueron el estearato de sodio y la ceniza volante.

- a. Estearato de sodio. Es la sal del ácido esteárico de sodio, $C_{18}H_{35}NaO_2$. Su apariencia es de un polvo blanco, jabonoso al tacto, difícil de disolver en agua. Sin embargo, puede disolverse lentamente en agua o alcohol a bajas temperaturas. La solución es altamente alcalina debido a la hidrólisis. Se utiliza como emulsión y también como agente resistente al agua [74]. Se agregó en el mezclado al 2% en peso del cemento.
- b. Ceniza volante. Es una puzolana proveniente del carbón de bajo contenido de azufre, el cual es consumido en la central termoeléctrica “José López Portillo” localizada en Piedras Negras, Coahuila. La ceniza volante está compuesta por 63.93% de dióxido de silicio (SiO_2), 24.32% de óxido de aluminio (Al_2O_3), 4.29% de óxido de hierro (Fe_2O_3), 2.34% de óxido de calcio (CaO), 0.78% de óxido de magnesio (MgO) y 0.20% de óxido de sodio (Na_2O) [75]. Para la relación $A/C = 0.65$ se agregó el 60% en peso de cemento, y para la relación $A/C = 0.35$ el 15% en peso de cemento.

2.4.1 Proporcionamiento para mezclas densas e impermeables.

Los especímenes de concreto con fibras para durabilidad se fabricaron con agregados de caliza propios de Nuevo León, México. La granulometría de los agregados fue la indicada en la tabla 5. Se utilizó cemento portland tipo CPC 30R común en la región y agua potable. Las series de proporcionamientos usados para la sección 2.4.1 se especifican en la tabla 8. De acuerdo con la sección 2.3.3, se utilizó solamente el volumen y longitud de fibra correspondientes a los especímenes con la más alta resistencia a flexión y tensión. El aditivo usado fue un superfluidificante y se agregó a razón de 10 ml por cada kg de cemento, a excepción del proporcionamiento para la relación $A/C = 0.35$ y ceniza volante, donde se agregó a razón de 12 ml por cada kg de cemento para mantener la misma consistencia en todas las mezclas.

Tabla 8.- Proporcionamientos del CRF para durabilidad en kg / m^3				
Materiales	Fibras sin protección	Fibras con protección	Fibras con protección y estearato	Fibras con protección y ceniza
A/C = 0.65				
	serie 1	serie 2	serie 3	serie 4
Agua	247.4	247.4	247.4	247.4
Cemento	380.8	380.8	380.8	380.8
Fibras	6.9	6.9	6.9	6.9
Arena	1540.0	1540.0	1495.3	1287.5
Estearato de sodio			7.6	
Ceniza volante				228.5
A/C = 0.35				
	serie 5	serie 6	serie 7	serie 8
Agua	240.3	240.3	240.3	238.9
Aditivo	7.1	7.1	7.1	8.5
Cemento	706.9	706.9	706.9	706.9
Fibras	6.9	6.9	6.9	6.9
Arena	1309.8	1309.8	1227.2	1192.7
Estearato de sodio			14.1	
Ceniza volante				106.0

2.4.2 Mezclado, colado y curado.

La mezcla fue realizada en una revolvedora con una capacidad de 40 L. Para el caso de las mezclas sin estearato de sodio y sin ceniza volante, el procedimiento de mezclado, colado y curado fue similar al descrito en la sección 2.3.2.1.

Cuando se utilizó estearato de sodio, éste se mezcló seco al 2% en peso del cemento. En el caso de la ceniza volante, ésta se homogenizó junto con los agregados, para la relación $A/C = 0.65$ se agregó el 60% en peso del cemento, y para la relación $A/C = 0.35$ el 15% en peso del cemento. La ceniza volante usada fue integral 85% tipo A, 10% tipo B y 5% tipo C, siendo la ceniza tipo A la mas gruesa.

Todos los especímenes se mantuvieron en sus moldes durante 24 h protegiéndolos de la pérdida de humedad y posteriormente fueron curados en forma estándar durante 7 días.

2.4.3 Fabricación de especímenes.

Con el fin de evaluar el efecto en la resistencia a la flexión del concreto con fibras causado por las pruebas de deterioro acelerado. Se fabricaron por triplicado especímenes con fibras tratadas con parafina y sin tratamiento como control. Además, se investigó el efecto de la ceniza volante y el estearato de sodio en la matriz de cemento la cual también se reforzó con fibras tratadas con parafina. Las dimensiones de los especímenes fueron 75x75x280 mm. Se utilizó un volumen de 0.5% y 300 mm de longitud de fibra, correspondientes a los especímenes con la más alta resistencia a flexión y tensión de acuerdo con la sección 3.3.2. Se elaboraron las 8 series de proporcionamientos de la tabla 8 de la sección 2.4.1 para cada prueba acelerada y como control sin ningún tipo de exposición. Al finalizar las pruebas, los especímenes fueron ensayados a flexión de acuerdo con la norma ASTM C 78-94 [70]. Los 24 especímenes del control correspondientes a las 8 series fueron mantenidos a temperatura de laboratorio después del curado y ensayados a los 28 días

2.4.4 Pruebas de durabilidad en los especímenes.

Los especímenes de concreto con fibras de todas las series indicadas en la tabla 8. se sometieron a pruebas de deterioro acelerado, las cuales pretenden simular el medio natural y provocar el deterioro en los especímenes. De esta manera, se procedió a realizar las siguientes pruebas:

- a. En la prueba (1) 24 especímenes correspondientes a las 8 series, se sometieron a 15 ciclos de humedecimiento y secado a una misma temperatura. Cada ciclo consistió en la exposición al ambiente húmedo en un horno a 70°C durante 24 h, y al ambiente seco en un horno a 70°C durante 24 h.
- b. La prueba (2) consistió en exponer a 24 especímenes correspondientes a las 8 series, a 15 ciclos de variación en la temperatura. Cada ciclo consistió en la exposición al ambiente seco en un horno a 70°C durante 24 h, y posteriormente la inmersión en agua a una temperatura de 21°C durante 24 h.
- c. La prueba (3), 24 especímenes de las 8 series fueron sometidos a un ambiente con 95% de humedad relativa y a una temperatura de 23°C durante 150 días.

Para evaluar el efecto de los ataques químicos en concretos con fibras se llevaron a cabo las siguientes pruebas:

- d. La prueba (4) consistió en exponer a 24 especímenes correspondientes a las 8 series, a una solución con 3% del ión cloruro disuelto en agua para simular un medio marino a partir de cloruro de sodio (NaCl), a una temperatura de 23°C durante 150 días.
- e. La prueba (5) se expuso a 24 especímenes de las 8 series a una solución con sulfatos (SO₄) a una concentración de 10,000 ppm disuelto en agua, a partir de sulfato de sodio (Na₂SO₄). Esta condición es considerada severa para el concreto según el ACI 318-95 [76], a una temperatura de 23°C durante 150 días.

2.5 Interacción entre la fibra y la matriz de cemento.

Objetivo fundamental. Investigación de la interacción que tienen las fibras con la matriz de cemento en lo que respecta a la adherencia y a su durabilidad.

2.5.1 Microestructura de la fibra expuesta al medio alcalino.

Para tratar de conocer el efecto del medio alcalino en la microestructura de la fibra, se observó en el microscopio electrónico de barrido secciones transversales de fibra expuesta al medio alcalino durante 12 meses. Las fibras de lechuguilla fueron montadas verticalmente en 20 g de resina acrílica, la cual se especifica en la sección 2.1.2. La muestra montada en la resina se recubrió con carbono y papel aluminio para hacerla conductora.

2.5.2 Morfología de la interfase fibra – matriz de cemento.

Para examinar la adherencia y el tipo de falla de la fibra en su interfase con la matriz de cemento, se observó la morfología del plano de falla en especímenes de concreto con fibras, por medio del estereoscopio con un aumento de 100X. Lo anterior fue realizado durante la estancia de investigación ya mencionada.

2.6 Elementos constructivos.

Objetivo fundamental. Fabricación de materiales para construcción a partir de concreto reforzado con fibras de lechuguilla.

2.6.1 Materiales potenciales para la construcción.

Se estudió que tipos de materiales utilizados en la construcción pueden ser fabricados con el concreto con fibras, se utilizó la serie 4 de la tabla 8 con un volumen de fibra de 0.5% y una longitud de 300 mm. A continuación se mencionan algunos materiales de construcción que se consideran con mayor potencial para su aplicación:

- a. Bóvedas como aligerante para losas.- Este material tipo arco puede sustituir a las bovedillas convencionales en el sistema de vigueta y bovedilla. Este sistema es muy común en la construcción de losas para entrepiso y azotea, en edificios comerciales y habitacionales.
- b. Láminas acanaladas.- Este material puede sustituir a las láminas de acero o de asbesto, con la adecuada técnica son fácilmente fabricadas y pueden usarse para la autoconstrucción de vivienda [28,77].
- c. Placas como cimbra perdida para puentes y edificios [78].- Esta aplicación es para proyectos de infraestructura en la ingeniería civil. Su uso puede reducir los costos del proyecto en lo referente a la cimbra pérdida, la cual normalmente se realiza con placas de concreto reforzado o pretensado lo que resulta costoso e innecesario.

Además de los materiales descritos, pueden ser fabricados otros tipos de materiales de construcción, como tubos [79], tanques de almacenamiento, bardas, pisos industriales [80]. Su aplicación dependerá de la necesidad de usar materiales más económicos y solucionar los problemas de construcción que se presentan continuamente.

Capítulo 3

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1 Caracterización de las fibras de lechuguilla.

3.1.1 Composición química.

De acuerdo con Zapién [54], los contenidos químicos de la planta de lechuguilla son: agua (67.79%), proteína (1.89%), grasa (0.61%), carbohidratos (16.43%), cenizas (4.16%), fibra (9.12 %) y azúcar (0.30%). A nivel molecular, al igual que otras materias orgánicas como la madera, la fibra se compone por celulosa, hemicelulosa y lignina [61]. La celulosa es el principal componente de la fibra. Es un carbohidrato complejo compuesto típicamente por una cadena lineal de miles de unidades individuales de glucosa [74]. En la figura 14 se puede observar la estructura en forma esquemática de la celulosa.

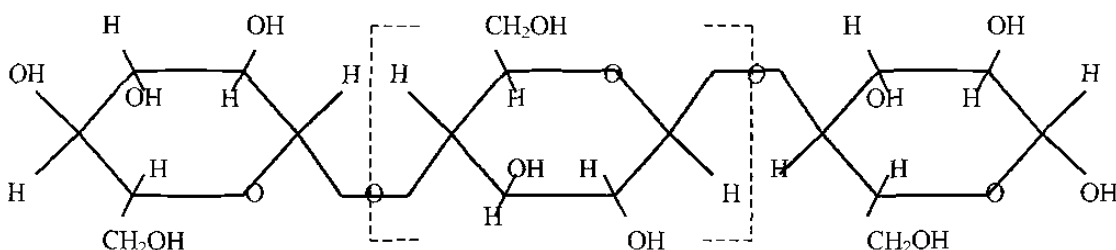


Fig. 14 Representación esquemática de la estructura de la celulosa.

Los enlaces internos como los enlaces entre las unidades de glucosa son covalentes. Este tipo de enlace proporciona rigidez y una alta resistencia a tensión en la molécula de celulosa. Sin embargo, las cadenas de celulosa se enlazan lateralmente con otras cadenas por medio de enlaces de hidrógeno y de Vander Waals [61]. La hemicelulosa es una

molécula polimérica natural. A diferencia de la celulosa que está formada por glucosa, la hemicelulosa está constituida por polisacáridos principalmente xilosa. La cantidad de xilosa varía de acuerdo con el tipo de planta, además, tiene un carácter ácido lo que puede tener un efecto negativo en la reacción de hidratación del cemento [35], ya que podría neutralizar la alcalinidad de la mezcla al reaccionar con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La lignina tiene una estructura compleja en tres dimensiones [61], está formada por unidades de fenilpropano ligadas de diferentes maneras. La lignina y la hemicelulosa las cuales son amorfas, mantienen juntas las unidades de glucosa las cuales tienen regiones cristalinas.

La manera en la cual interactúan estos tres principales componentes resulta importante, ya que como lo mencionó Gram [35], la descomposición en un medio alcalino de la celulosa, que es la principal unidad estructural de la fibra, se puede presentar por la disolución de la cadena principal molecular originando un desfibramiento. En las fibras de lechuguilla se encontró que los porcentajes de estos componentes básicos fueron los siguientes: celulosa 59.34%, hemicelulosa 17.37% y lignina 21.11%, el restante pueden ser un bajo porcentaje de saponinas. Estos porcentajes resultan similares a los reportados para fibras de la familia del agave, por ejemplo, Gram [35] reportó que las fibras de sisal estaban compuestas por 62% de celulosa, 15% de hemicelulosa y 20% de lignina. El alto porcentaje de celulosa presente en ambas plantas sugiere que sus propiedades físicas y mecánicas pueden ser similares, sin embargo, también es posible que el medio alcalino que deteriora a las fibras de sisal, sea un importante factor de deterioro en las fibras de lechuguilla.

3.1.2 Estructura microscópica.

Según Gram [35], las fibras de sisal (agave sisalana) tienen una sección transversal conformada por aproximadamente 100 microceldas con una longitud de 20 a 50 μm . Las microceldas están unidas entre sí por la hemicelulosa y la lignina. La microcelda consiste de varias paredes construidas por fibrillas, las cuales están formadas por microfibrillas de 20 nm de espesor compuestas por las cadenas moleculares de celulosa que tienen un espesor de 0.7 nm y longitudes de 1 μm .

De acuerdo con las micrografías mostradas en la figura 15, donde se puede observar la microestructura de la sección transversal y lateral de una fibra de lechuguilla. Es

posible reconocer la existencia de microceldas tal como lo describe Gram para el sisal [35]. El tamaño de estas microceldas en la fibra de lechuguilla es aproximadamente de 20 μm y según se observa en la micrografía (b), su longitud es aproximadamente de 50 μm . Lo anterior sugiere que para ambas fibras la microestructura es similar y por consiguiente las propiedades físicas y mecánicas que dependen de su arreglo microscópico pueden ser también equivalentes.

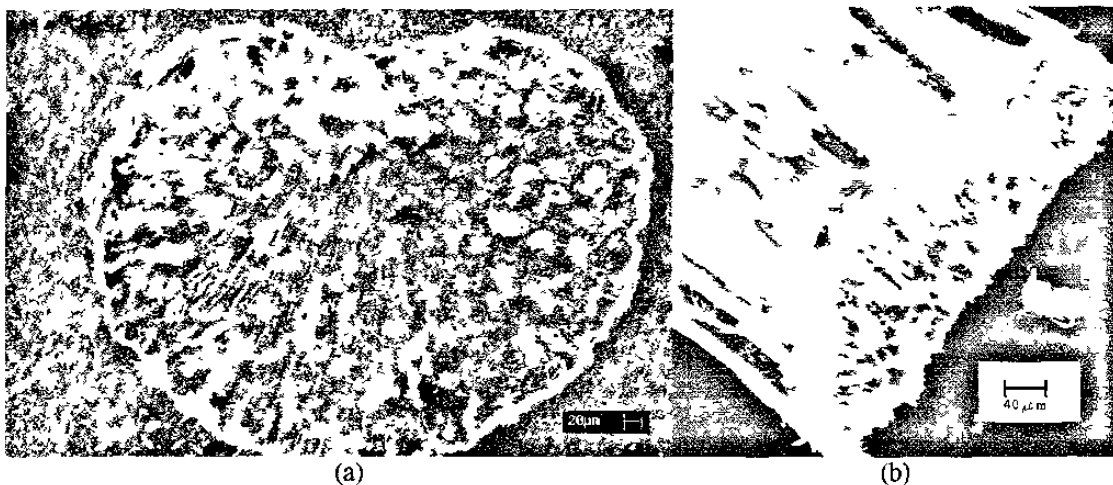


Fig. 15 (a) Micrografía de la sección transversal. (b) micrografía de la sección lateral de una fibra de lechuguilla. En (a) pueden observarse las microceldas que componen a la fibra, mientras que en (b) se puede apreciar la longitud de estas microceldas aproximadamente 50 μm .

De esta forma, las fibras de lechuguilla tienen una composición química y una microestructura muy similar a las fibras de sisal estudiadas por Gram [35], esto parece razonable ya que ambas plantas forman parte de una misma familia (agave). Las propiedades mecánicas de las fibras dependen de su composición química y su microestructura, por lo que es posible pensar que ambos tipos de fibras presenten un comportamiento mecánico similar. Desafortunadamente, no se dispone de información acerca de la microestructura de fibras de maguey o henequén que son otro tipo de plantas de esta familia.

3.1.3 Contenido de humedad.

El contenido de humedad presente como agua libre en fibras sin tratamiento [61] expuestas al ambiente del laboratorio se indica en la tabla 9.

Tabla 9.- Porcentaje del contenido de humedad en la fibra							
No. Muestra	Peso W1 g	Peso W2 g	Peso W3 g	Peso de fibra con humedad ambiente g	Peso de fibra seca g	Agua libre en la fibra g	Contenido de humedad en la fibra %
1	101.127	106.210	105.739	5.083	4.612	0.471	10.21
2	100.302	105.280	104.808	4.978	4.506	0.472	10.47
3	102.146	107.126	106.650	4.980	4.504	0.476	10.57
4	82.098	87.312	86.835	5.214	4.737	0.477	10.07
5	82.770	87.302	86.898	4.532	4.128	0.404	9.79
6	82.966	87.346	86.953	4.380	3.987	0.393	9.86
Promedio =							10.04

Nomenclatura.-

W1 = Peso del recipiente

W2 = Peso del recipiente mas fibra con humedad ambiente

W3 = Peso del recipiente mas fibra seca

Se obtuvo un promedio de 10.04% para seis muestras, esto representa la humedad que tuvieron las fibras antes de que fueran mezcladas con el concreto. Sin embargo, en condiciones diferentes al del laboratorio donde la fibra se exponga a las variaciones del clima, la humedad que absorba deberá ser considerada para el diseño de la mezcla, ya que el agua de reacción en la mezcla tiene una relación estequiométrica con los silicatos y aluminatos de calcio que componen las fases químicas del cemento. De otra forma, al no considerarse el exceso de agua se aumentaría la relación A/C disminuyendo la resistencia y durabilidad de los elementos fabricados.

3.1.4 Propiedades físicas y mecánicas.

3.1.4.1 Diámetro y longitud.

A diferencia de las fibras industriales (acero, vidrio y plásticas) que poseen dimensiones muy uniformes, las fibras naturales tienen una amplia diversidad en su diámetro y longitud. Esto influye directamente en sus propiedades mecánicas ya que la resistencia de la fibra está inversamente relacionada con su diámetro, por lo anterior, se pretendió tomar muestras de fibras que fueran representativas de las usadas durante cada etapa de la investigación. Como puede verse en la figura 16, de los 100 especímenes medidos, 83 de ellos tienen un diámetro máximo entre 0.18 a 0.33 mm y un diámetro mínimo entre 0.10 a 0.21 mm. El promedio de todos los especímenes es de 0.26 mm y

de 0.16 mm para los valores máximos y mínimos respectivamente, la longitud promedio

es de 451 mm. Tanto en lo que respecta al diámetro como a la longitud, la fibra de lechuguilla resulta ser de menor tamaño que otras fibras de la familia del agave. Castro y Naaman [18] publicaron los siguientes valores promedio para fibras de maguey, diámetro máximo 0.46 mm y diámetro mínimo 0.20 mm. Note que las fibras de lechuguilla son comparables en diámetro con las fibras de polipropileno y algunas de acero [61]. Un diámetro pequeño permite que la mezcla tenga trabajabilidad [7]. Así también, la falta de uniformidad en los diámetros puede provocar posibles zonas débiles en el compuesto debido a las fibras que resisten menos esfuerzos. Para tratar de reducir al mínimo la influencia de esta diversidad de diámetros, resultó conveniente eliminar ambos extremos de la fibra donde se presenta la mayor variación en el diámetro. Trabajando de esta manera con la zona central de la fibra, esto mejoró considerablemente la uniformidad en los diámetros.

es de 451 mm. Tanto en lo que respecta al diámetro como a la longitud, la fibra de lechuguilla resulta ser de menor tamaño que otras fibras de la familia del agave. Castro y Naaman [18] publicaron los siguientes valores promedio para fibras de maguey, diámetro máximo 0.46 mm y diámetro mínimo 0.20 mm. Note que las fibras de lechuguilla son comparables en diámetro con las fibras de polipropileno y algunas de acero [61]. Un diámetro pequeño permite que la mezcla tenga trabajabilidad [7]. Así también, la falta de uniformidad en los diámetros puede provocar posibles zonas débiles en el compuesto debido a las fibras que resisten menos esfuerzos. Para tratar de reducir al mínimo la influencia de esta diversidad de diámetros, resultó conveniente eliminar ambos extremos de la fibra donde se presenta la mayor variación en el diámetro. Trabajando de esta manera con la zona central de la fibra, esto mejoró considerablemente la uniformidad en los diámetros.

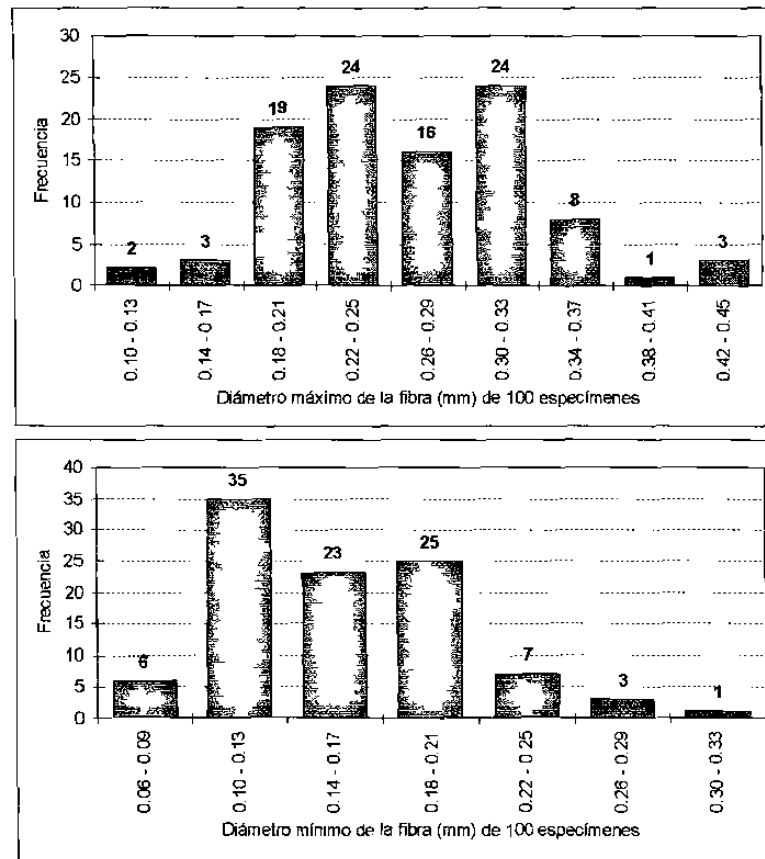


Fig. 16 Variación de diámetros máximo y mínimo en fibras. Los diámetros máximos presentan una distribución normal, mientras que los diámetros mínimos están sesgados a los valores menores.

de acero [61]. Un diámetro pequeño permite que la mezcla tenga trabajabilidad [7]. Así también, la falta de uniformidad en los diámetros puede provocar posibles zonas débiles en el compuesto debido a las fibras que resisten menos esfuerzos. Para tratar de reducir al mínimo la influencia de esta diversidad de diámetros, resultó conveniente eliminar ambos extremos de la fibra donde se presenta la mayor variación en el diámetro. Trabajando de esta manera con la zona central de la fibra, esto mejoró considerablemente la uniformidad en los diámetros.

3.1.4.2 Porcentaje de absorción de agua.

Las fibras naturales tienen una alta capacidad de absorber agua [2]. De acuerdo con las pruebas realizadas, las fibras de lechuguilla pueden absorber alrededor del 98% de

agua con respecto a su peso seco en 24 h. Como se indica en la tabla 10 solamente se necesita de 1 h para que la fibra esté casi saturada presentando un 95% de absorción.

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

Lo anterior puede deberse a la acción capilar que se genera por la porosidad de la fibra, necesitando relativamente poco tiempo para su completa saturación. Existen algunas diferencias en el porcentaje de absorción de agua de las fibras de la familia del agave, mientras que la lechuguilla absorbe el 98% con respecto a su peso seco, el maguey absorbe sólo el 69% [18] y el sisal entre el 60 a 70% [2,7]. Esto indica que la fibra de lechuguilla puede tener mayor porosidad que los otros tipos de fibras.

La alta absorción de agua de la fibra produce un problema práctico durante el mezclado, ya que puede absorber el agua de reacción y modificar de esta forma la relación A/C interfiriendo con las reacciones de hidratación del cemento. Al disminuir la relación A/C puede generar mezclas poco manejables y problemas durante la compactación. Por otra parte, el exceso de agua absorbida genera un sustancial incremento de volumen en la fibra, la cual se encuentra embebida en la pasta de cemento durante su estado plástico. Al endurecer el concreto y secarse la fibra, ésta se contrae con la consiguiente pérdida de adherencia entre la fibra y la matriz. Originando que la resistencia a flexión y tensión del concreto se vean afectadas. En la sección 3.2 se presentan diferentes tratamientos en la fibra que fueron probados para reducir su alta absorción de agua, la cual es responsable de los cambios volumétricos ya mencionados.

3.1.4.3 Porosidad y densidad absoluta.

La alta absorción que se encontró en la fibra puede ser producida principalmente por su porosidad. Como se mencionó en la sección 2.1.4 del capítulo 2, fue usado un

porosímetro de intrusión de mercurio. Este equipo puede determinar la cantidad de mercurio que penetra en los poros de un material sometido a diferentes presiones. El diámetro mínimo de poro penetrado por el mercurio depende de la presión aplicada [81]. En la tabla 11 se indica un resumen de las pruebas realizadas y sus resultados correspondientes. La porosidad encontrada en las fibras fue de 21 a 25% del volumen de la muestra seca.

Tabla 11.- Resumen de prueba de porosidad en las fibras.

Muestra No.	Diámetro de la fibra (mm)	Volúmen acumulado (mm ³ /g)	Area específica (m ² /g)	Promedio del radio del poro macro (10 ⁻¹⁰)	Promedio del radio del poro micro (10 ⁻¹⁶)	Densidad Absoluta (g/cm ³)	Densidad bruta corregida (g/cm ³)	Porosidad total de la muestra (%)
1	0.15 a 0.25	167.5214	10.70	530880	190	1.28	1.63	21.44
2	0.25 a 0.35	197.9167	13.25	266070	190	1.30	1.75	25.72

La porosidad de la fibra permite la saturación al tomar el agua de la matriz durante la fabricación del concreto produciendo los incrementos volumétricos mencionados. Al saturarse la fibra aumenta su volumen y puede sufrir también un incremento en el tamaño del macro poro principalmente, se cree que esto puede aumentar a su vez la capacidad de absorción de agua hasta llegar a un equilibrio donde la saturación es completa. Con la prueba de porosidad se encontró que la densidad varía de 1.28 a 1.30 g/cm³ ver tabla 11. Mientras que, relacionando el peso seco y volumen seco de la fibra el resultado fue de 1.38 g/cm³, ver tabla 12.

Tabla 12.- 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 ³	Volúmen de Fibras SSS cm ³	Peso de Fibras SSS g	Volúmen de Fibras secas cm ³	Peso de Fibras secas g	Densidad Absoluta de la fibra g/cm ³	
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	
Promedio =						1.38	

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

Esto es aproximadamente el 7% de variación entre ambos resultados, lo que parece razonable considerando que el procedimiento de la sección 2.4.1 depende de la apreciación visual de quien realiza la prueba para definir el momento en el cual la fibra esté saturada superficialmente seca. La densidad es una propiedad física necesaria para calcular el agua total de mezclado y el volumen de fibra que deberá agregarse al concreto.

3.1.4.4 Esfuerzo último a tensión.

Se observó que en la mayoría de los ensayos la fibra falló cerca del anclaje, pero dentro de la longitud de sujeción. El comportamiento en la prueba de tensión axial presentó una tendencia a ser lineal hasta la falla. Sin embargo, perdió elasticidad bajo la carga sostenida ya que la elongación se mantenía aun después de retirar la carga. Algunas gráficas de carga vs elongación que se obtuvieron con los datos del ensaye se indican en la figura 17. De

igual manera, en la figura 17 se muestra la curva de un comportamiento típico esfuerzo vs deformación unitaria. En ambas gráficas se puede observar el comportamiento lineal hasta el punto de falla, sin mostrar aparentemente un definido punto de fluencia o de cambio de pendiente en la curva. Puede decirse que su comportamiento fue viscoelástico, ya que al aplicar carga a la fibra presenta una deformación inicial, la cual se

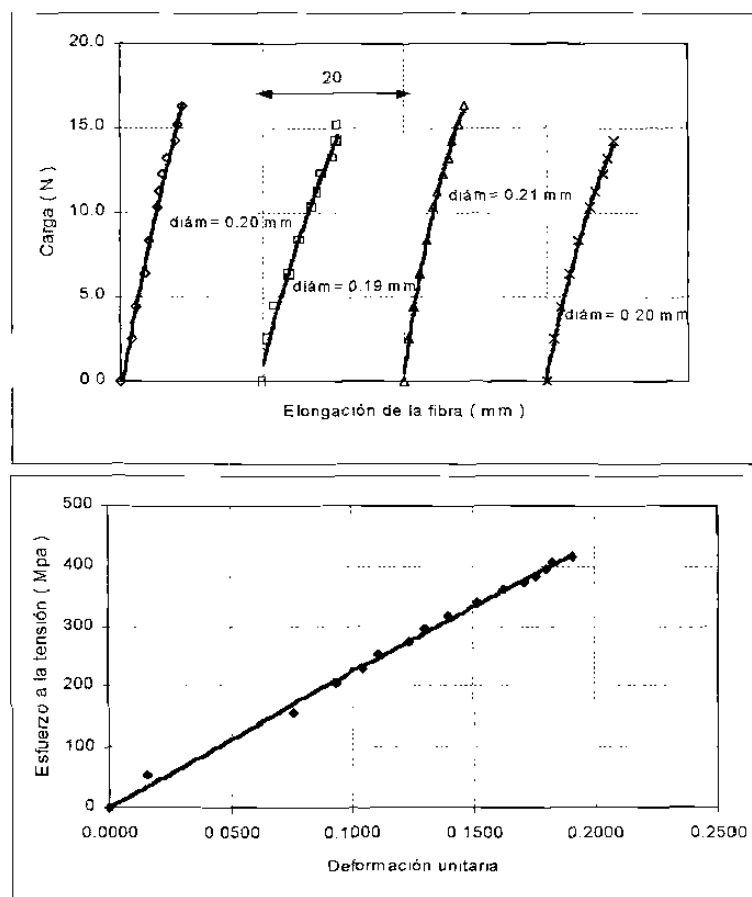


Fig. 17 Curvas típicas de carga vs elongación de acuerdo al diámetro y esfuerzo vs deformación unitaria, en donde se puede apreciar que las fibras son flexibles con un bajo módulo de elasticidad.

incrementa con el tiempo para la misma carga y si ésta es retirada su longitud inicial después del ensaye no se recupera. El comportamiento a tensión observado en la curva esfuerzo vs deformación de la figura 17 resulta muy similar al reportado por Aziz, Paramasivam y Lee [7], para fibras de bambú y caña de azúcar sometidas a tensión. Según las observaciones realizadas durante el ensaye, la elongación de la fibra se produce instantáneamente al aplicar la carga y continúa al estar sujeta a la carga sostenida. De igual manera, la elongación fue proporcional al incremento de la carga, este comportamiento se mantuvo hasta la falla en la mayoría de los ensayes. De acuerdo con lo anterior, los resultados sugieren que la fibra es un material flexible, con bajo módulo de elasticidad, lo que resulta una ventaja ya que puede existir una compatibilidad de deformación cuando esté funcionando como refuerzo en el concreto. De esta manera se cambiará el comportamiento frágil del concreto a un comportamiento dúctil y con tenacidad, mejorando la respuesta del concreto a las cargas cíclicas y de impacto. El módulo de elasticidad del concreto depende de su resistencia a compresión. Para relaciones A/C de 0.65 las cuales son de uso común en la construcción, la resistencia a compresión es aproximadamente 21 MPa y su módulo de elasticidad puede ser aproximadamente de 22 GPa [13]. Mientras que según el ACI [2], fibras como las de coco, sisal, caña de azúcar y yute presentan un módulo de elasticidad de 13 a 32 GPa.

Por otra parte, cuando se relaciona la carga última a tensión con los diámetros de la fibra se encontró que el incremento del diámetro no produce necesariamente un incremento sustancial de la carga última, si no al contrario, se registró en algunos casos que fibras con diámetros máximos resistieron menos carga. Este comportamiento puede observarse en la figura 18 en donde el 82% de los ensayes mostraron que al aumentar el diámetro la carga resistida puede tener un ligero incremento o permanecer constante y en algunos casos disminuir. Lo anterior puede explicar la tendencia de la curva mostrada en la figura 19,

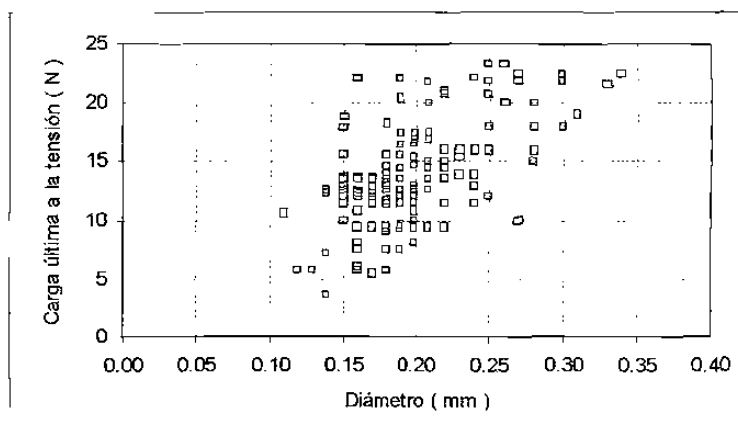


Fig. 18 Variación de la carga última con respecto al diámetro.

en donde las fibras con mayor diámetro y, por consiguiente, mayor sección transversal resistieron menos carga

teniendo así un menor esfuerzo. La tendencia descendente de la curva en la figura 19 al aumentar el diámetro, fue encontrada también por Aziz [7] para fibras de bambú, y por Castro y Naaman [18] para fibras de lechuguilla y maguey. Estas curvas se

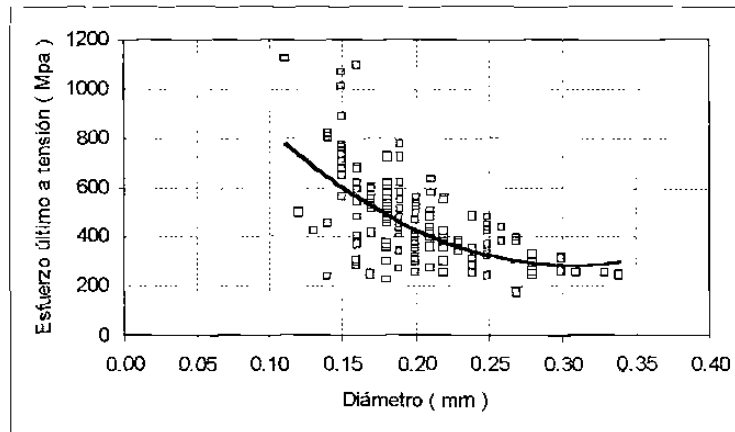


Fig. 19 Variación del esfuerzo último con respecto al diámetro.

muestran en la figura 20. Aunque las referencias citadas no mencionan explicación al respecto, se piensa que esta tendencia puede explicarse de acuerdo con los resultados obtenidos hasta ésta sección, considerando que la fibra se compone de microceldas y que tiene una importante porosidad, el aumento en su diámetro exterior no implica un incremento considerable en la materia de su sección transversal, por lo que el material que resiste los esfuerzos no es proporcional al diámetro de la fibra. Esta sección transversal es considerada en la mayoría de los trabajos de investigación como una sección sólida, esto puede generar una aproximación incorrecta para el cálculo de los esfuerzos últimos. Sin embargo, se justifica esta simplificación ya que no se conoce con certeza en que sección fallará la fibra.

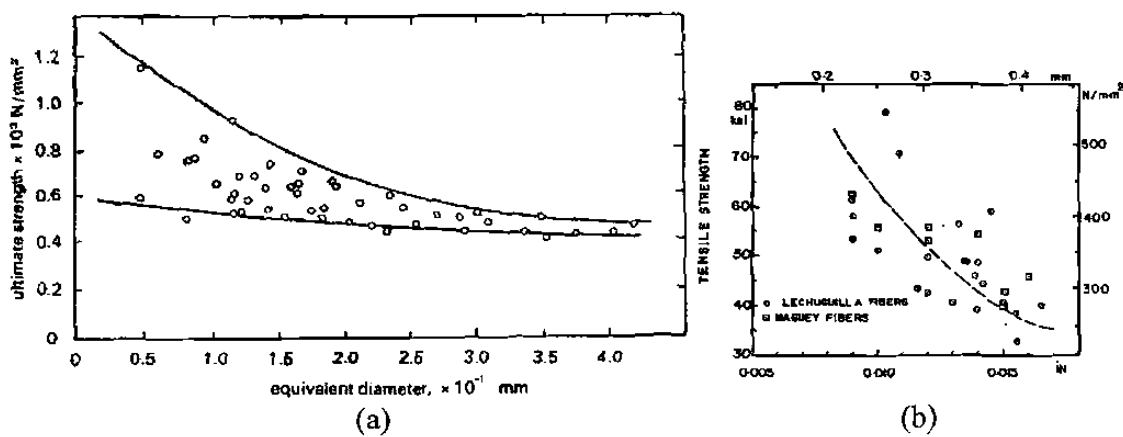


Fig. 20 Relación entre la resistencia a tensión y el diámetro. (a) Fibras de bambú [7]. (b) fibras de lechuguilla y maguey [18].

De acuerdo con la figura 21, el esfuerzo último a tensión para las fibras de lechuguilla varió entre los 200 a 700 MPa en el 90% de los ensayos. El promedio de la totalidad de los ensayos fue de 451 MPa lo que resultó ser mayor en un 20% a lo reportado por el Comité 544 del ACI [2], para fibras de maguey y sólo un 7% a lo reportado para el sisal. Esto puede deberse a varias razones como el método de ensaye, la representatividad de las muestras, la calidad de la fibra seleccionada, etc. Sin embargo, la fibra de lechuguilla parece tener mayor similitud con la fibra del sisal como se ha discutido en esta sección. Por otra parte, en la referencia [2] no se especifica el número de especímenes ensayados, esto es importante para poder realizar una comparación equitativa entre las fibras.

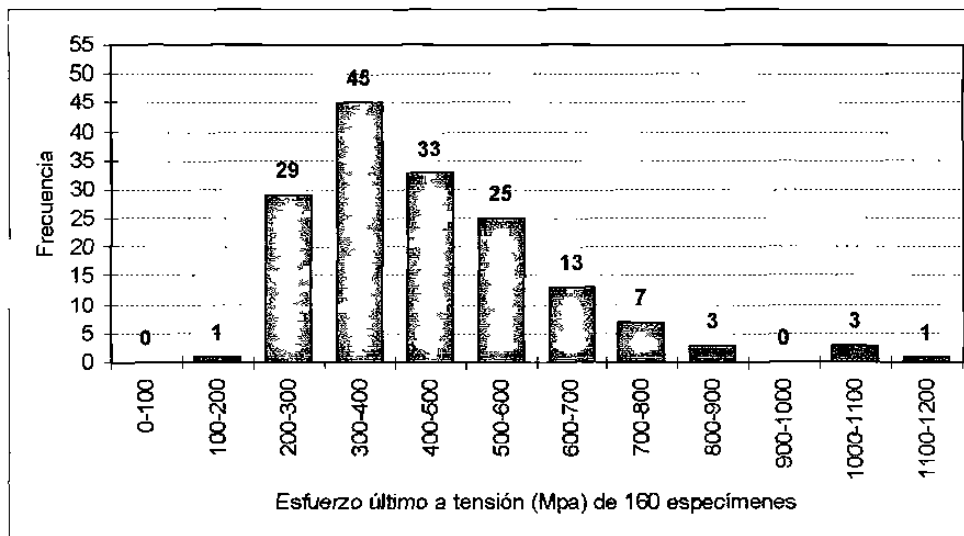


Fig. 21 Histograma del esfuerzo último a tensión. Se puede apreciar que la distribución de los resultados tiene una tendencia normal, sin considerar los 4 esfuerzos mayores a 900 MPa.

3.1.4.5 Porcentaje de elongación a la ruptura.

Este porcentaje define la capacidad que tiene el material para sufrir deformaciones sin fallar, es decir, su ductilidad. La fibra resultó tener aproximadamente el 10% de elongación a la ruptura, muy similar a lo reportado por el Comité 544 del ACI para las fibras de coco y sisal [2]. Esta elongación permite tener importantes deflexiones en el concreto, mientras no se produzca fallas por adherencia, la fibra tiene la capacidad transferir los esfuerzos a la matriz de concreto agrietado proporcionándole capacidad de soportar más carga sin colapsarse, incrementando de esta manera su tenacidad.

3.1.4.6 Resumen de propiedades físicas.

A continuación, se resumen las propiedades físicas y mecánicas determinadas en la fibra de lechuguilla:

Tabla 13.- Propiedades físico mecánicas de la fibra de lechuguilla

Diámetro	0.16 - 0.26 mm
Longitud promedio	451 mm
Absorción de agua en 24 h	98%
Densidad absoluta	1.38 g/cm ³
Resistencia última	275 - 627 Mpa
Elongación a la ruptura	6 - 14 mm
Porosidad	21 a 25 %

3.2 Durabilidad de la fibra.

3.2.1 Tensión superficial y capilaridad.

Con la finalidad de reducir la alta absorción de la fibra y la fragilización de la misma ocasionada por el medio alcalino del cemento, las fibras se impregnaron con los siguientes agentes protectores: aceite de linaza (AL), parafina (P), creosota (C), sellador para madera (SM) y una combinación de parafina+resina (P+R) a razón de 4:1 y aceite de linaza+resina+aguarrás (AL+R+A) a razón de 4:1:4. Como se mencionó en el capítulo 2, la tensión superficial de las sustancias es un parámetro para medir la capacidad que tienen éstas de penetrar en la fibra por capilaridad, cuando varía la temperatura de dichas sustancias. De esta manera, se registró a diferentes temperaturas la tensión superficial de los agentes protectores, como se puede apreciar en la figura 22.

Al comparar los resultados obtenidos, las sustancias C y SM fueron las que presentaron mayor tensión superficial, con valores mínimos de 75 unidades a temperaturas mayores a 60°C. En comparación, AL, P, P+R y AL+R+A tuvieron valores mínimos de 55 unidades aproximadamente. Sin embargo, para las sustancias con AL la temperatura óptima fue de 80°C, mientras que para las sustancias con P resultó ser de 100°C. Esta diferencia se debe principalmente al punto de fusión de la parafina, ya que sólo para fundirla se necesita 67°C [62].

De esta forma, se descartaron la creosota y el sellador como posibles agentes protectores, ya que se necesitaría temperaturas mayores a 100°C para que tuvieran una tensión superficial similar a las otras sustancias.

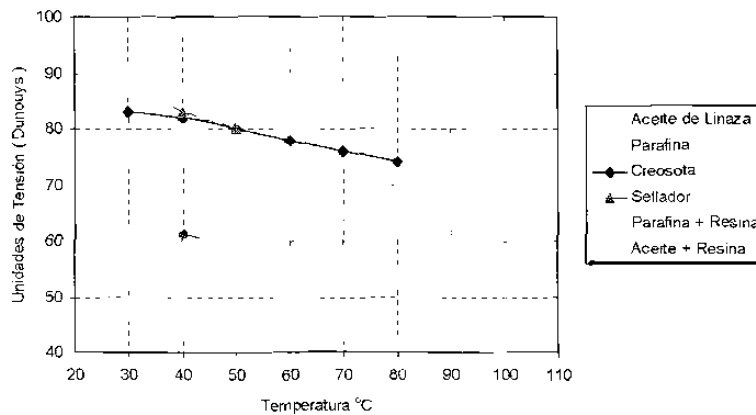


Fig. 22 Variación de la tensión superficial con respecto a la temperatura de los agentes protectores. Al tener mayor tensión superficial se reduce la capacidad de penetración por capilaridad, de tal forma que la creosota y el sellador para madera son inadecuados para impregnar a las fibras.

Posteriormente, como puede observarse en la figura 23, se registró el ascenso de las sustancias en un tubo capilar con diámetro igual a 0.20 mm. Las temperaturas probadas en las sustancias fueron las mismas que en la tensión superficial y la temperatura óptima resultó de 80°C para sustancias con AL y 100°C para sustancias con P.

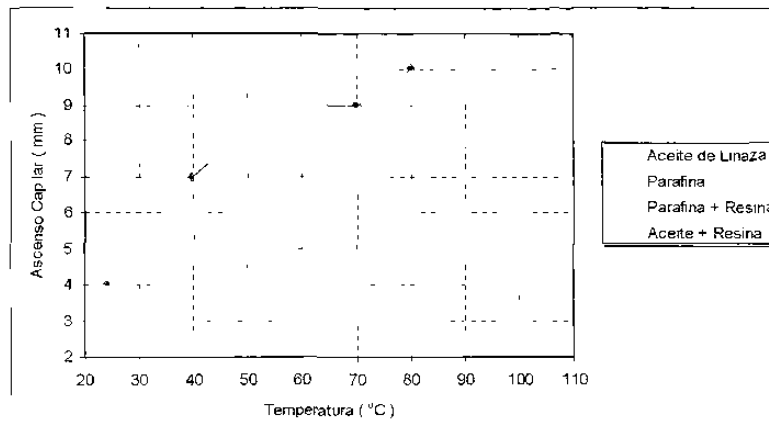


Fig. 23 Variación de la capilaridad con respecto a la temperatura de los agentes protectores. En donde las sustancias con aceite de linaza resultaron con mayor capacidad de penetración.

La porosidad de la fibra permitió una impregnación por capilaridad, que se optimizó aumentando la temperatura de los agentes protectores. Es conveniente que la temperatura en la sustancia no se eleve demasiado ya que pudiera encarecer y dificultar

el proceso. Por tal razón, sustancias como la creosota y el sellador de madera que necesitan temperaturas mayores a los 100°C se descartaron como posibles agentes protectores.

3.2.2 Absorción de agua en fibras tratadas.

Según Canovas, Kawiche y Selva [33], el efecto de la humedad en la fibra origina un incremento en su diámetro que provoca un desorden intermolecular, aumentando su permeabilidad. Esto apoya lo mencionado en la sección 3.1.4.3 respecto a los resultados de porosidad en la fibra y la absorción de agua. Coutts [82,83] menciona que la humedad tiene una fuerte influencia principalmente en la hemicelulosa y la lignina que forman la matriz de la celulosa, afirmando que con el incremento del contenido de humedad la resistencia de la fibra disminuye un 50%. Esto resulta importante cuando la fibra refuerza al concreto en ambientes con alto contenido de humedad, ya que puede reducirse la resistencia mecánica del compuesto al afectarse seriamente la resistencia de las fibras.

Los resultados de la absorción de agua en fibras tratadas se pueden observar en la figura 24, éstos indican que la parafina es el agente protector que redujo en mayor cantidad la absorción de agua, 37% con respecto a la fibra sin tratamiento.

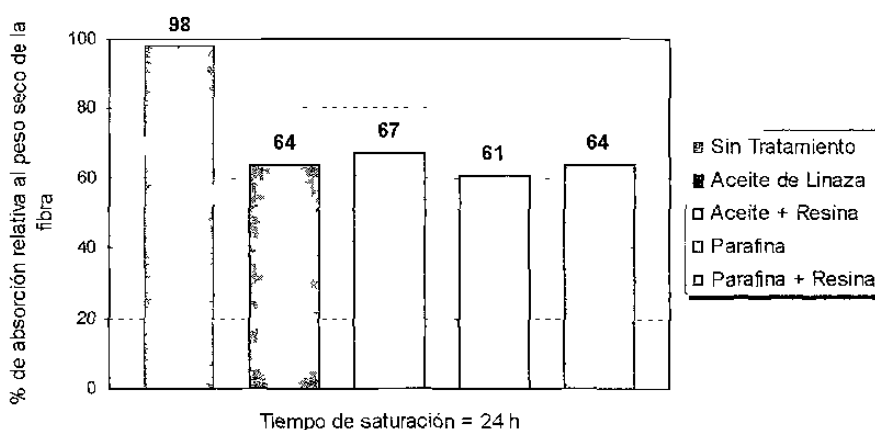


Fig. 24 Porcentaje de absorción en fibras tratadas. La aplicación de los agentes protectores proporciona hasta cierto nivel impermeabilidad a la fibra. sin embargo, la absorción de agua en la fibra es aún alta.

Los resultados de la figura 24 pueden deberse a que la parafina al enfriarse se solidificó y selló parcialmente la porosidad de la fibra. Además, la capa de parafina que se forma sobre la fibra parece actuar como repelente al agua, evitando la saturación completa.

Canovas, Kawiche y Selva [33], redujeron hasta en un 53% el porcentaje de absorción de agua para fibras de sisal, usando como impregnante la colofonia+aguarrás a razón de 1:6. Sin embargo, para las fibras de lechuguilla la resina natural de colofonia no tuvo el mismo efecto, es posible que se deba a la falta de penetración completa del agente protector en los poros de la fibra, sellando únicamente los poros de mayor tamaño o macroporos. La reducción en la absorción de agua es importante para la durabilidad de la fibra, no obstante, con los porcentajes obtenidos no es posible asegurar todavía una estabilidad volumétrica de la misma dentro de la matriz de cemento. Es necesario aumentar todavía más la impermeabilidad en la fibra, probando algunas otras sustancias como los polímeros.

3.2.3 Resistencia al medio alcalino.

Lewis y Mirihaglia [28], sostienen que cualquier material de refuerzo puede ser afectado por la solución altamente alcalina de la pasta de cemento, resultado de las reacciones durante la hidratación del cemento, que liberan una gran cantidad de hidróxido de calcio Ca(OH)_2 . Sin embargo, son las fibras naturales particularmente más vulnerables a la alcalinidad, como lo ha demostrado Gram en sus estudios [35,36]. Los resultados de los ensayos a tensión en fibras tratadas y sometidas a un medio alcalino se indican en la figura 25. De acuerdo con Gram [35], la descomposición química de la lignina y la hemicelulosa por el Ca(OH)_2 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, rompiendo la unión de las microceldas individuales las cuales absorben el hidróxido de calcio producto de las reacciones de hidratación del cemento. Lo anterior explica los resultados de la figura 25, donde el esfuerzo último a tensión tiende a disminuir al ser mayor el tiempo de exposición en la solución alcalina. Sin embargo, las fibras tratadas con parafina mantuvieron un 53% del esfuerzo a tensión con respecto al inicial, mientras que los otros tratamientos mantuvieron solamente el

31%, casi lo mismo que la fibra sin tratar. Del mismo modo que en la prueba de absorción de agua, la parafina pudo proteger mejor a la fibra al proporcionarle más impermeabilidad que los otros agentes.

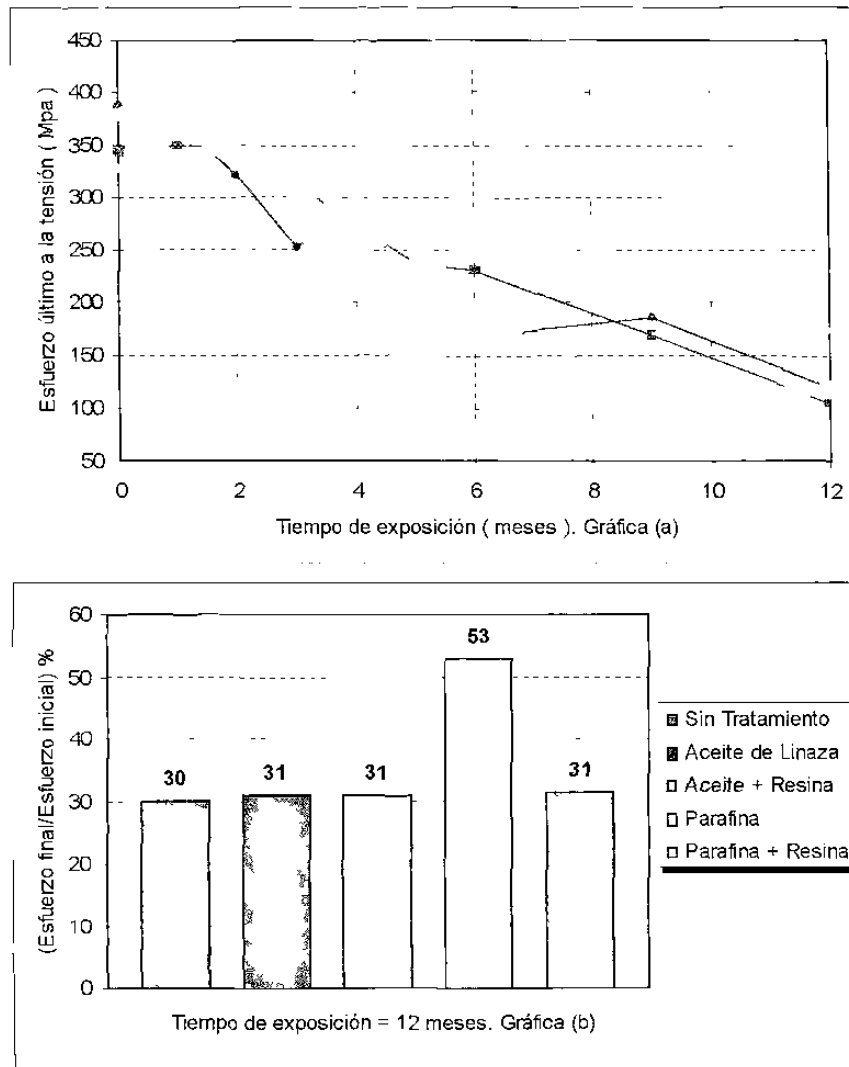


Fig. 25 Variación del esfuerzo último a tensión, respecto al tiempo de exposición en la solución alcalina. En la gráfica (b) se señala el porcentaje de resistencia que mantienen las fibras después de 1 año de exposición, siendo la parafina el agente que mejor protegió a la fibra.

Además, en lo que respecta a la elongación a la ruptura, es decir, su ductilidad. En general a excepción de las fibras con parafina, todas las otras fibras tratadas y el control se volvieron frágiles y quebradizas después del sexto mes de exposición, posiblemente la causa fue la disolución de los agentes protectores en el medio alcalino de la matriz de cemento. Las fibras tratadas con parafina mantuvieron el 47% de su ductilidad con

respecto a su valor inicial, mientras que las otras fibras mantuvieron sólo del 17% al 27%, como se puede observar en la figura 26.

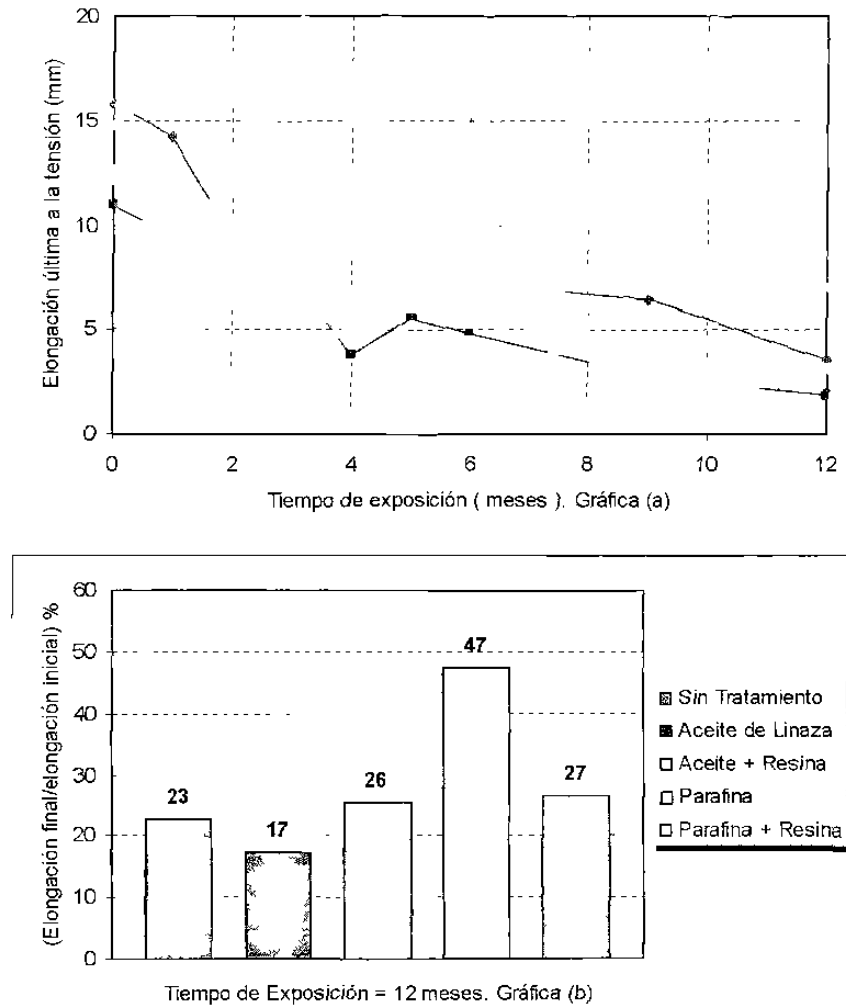


Fig. 26 Variación de la elongación a la ruptura, respecto al tiempo de exposición en la solución alcalina. En la gráfica (b) se señala el porcentaje de ductilidad que mantienen las fibras después de 1 año de exposición, siendo la parafina el agente que evitó la fragilización completa de la fibra.

Es evidente, según los resultados anteriores que la durabilidad de la fibra no está asegurada, sin embargo, puede decirse que es un indicio positivo mantener aproximadamente el 50% de la resistencia a tensión y ductilidad en un ambiente continuamente húmedo y alcalino, lo que resulta sumamente crítico. Lo anterior representa un avance con respecto a los resultados reportados por otros investigadores [10,34,84], donde la fibra natural se deteriora completamente en el medio alcalino con menos de un año de exposición, perdiendo su ductilidad y capacidad de refuerzo.

3.2.4 Cambios en la humedad y temperatura del medio.

Guimarás [34], sostiene que en ambientes tropicales el deterioro de la fibra es rápido debido a la humedad y alta temperatura. En este tipo de climas, los elementos constructivos se ven sometidos en forma regular a ciclos de humedecimiento y secado. Esta variación de la humedad es una de las principales causas del deterioro de la fibra en el medio alcalino del cemento [85]. Como se puede observar en la figura 27, la fibra perdió aproximadamente el 70% de su esfuerzo inicial, mientras que la ductilidad disminuyó cerca del 90%, cuando fue sometida a ciclos de humedecimiento y secado.

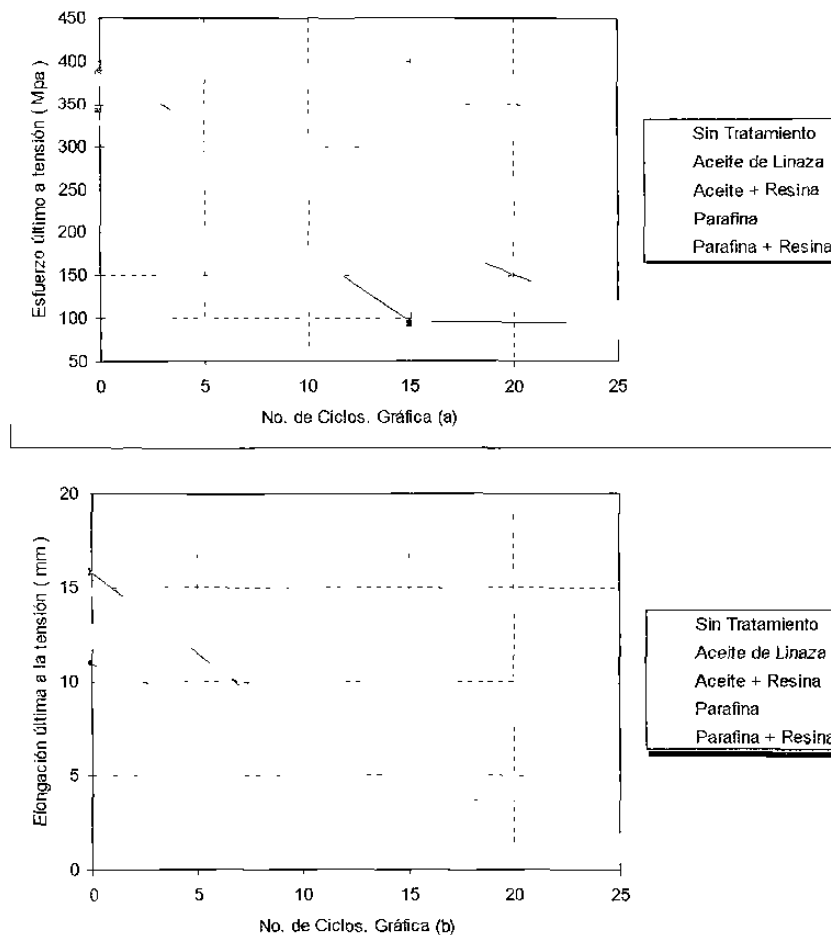


Fig. 27 Variación del esfuerzo y la elongación a la ruptura, respecto a ciclos de humedecimiento y secado. Prácticamente todos los agentes protectores fueron diluidos con las variaciones de la humedad, no pudiendo evitar la fragilización de las fibras.

Estos resultados vienen a confirmar, que los cambios de humedad tienen una importante influencia en la durabilidad de la fibra. El efecto de la expansión y

contracción provocado por los ciclos de humedecimiento y secado, además, del ataque alcalino causan la fragilización de la fibra perdiendo de esta manera su capacidad de refuerzo. En esta prueba ningún tratamiento fue capaz de proteger en forma adecuada a la fibra. Es posible que al expandirse y contraerse la fibra en forma cíclica, permitiera la penetración de la solución alcalina, diluyendo a los agentes protectores.

3.2.5 Efecto de sustancias químicas alcalinas y ácidas.

Algunos investigadores recomiendan tratar las fibras con sustancias químicas principalmente hidróxido o sulfato de sodio [24,86], con el fin de eliminar la lignina y utilizar únicamente la celulosa como refuerzo. El tratamiento químico en fibras sobre todo las provenientes de la madera, es realizado actualmente en los países desarrollados con resultados favorables respecto a su durabilidad [2]. Sin embargo, en los países en desarrollo este procedimiento puede encarecer el producto final. En la figura 28 se puede observar la fotografía de fibras expuestas al agua destilada, sin aparente señal de algún deterioro o cambio físico.

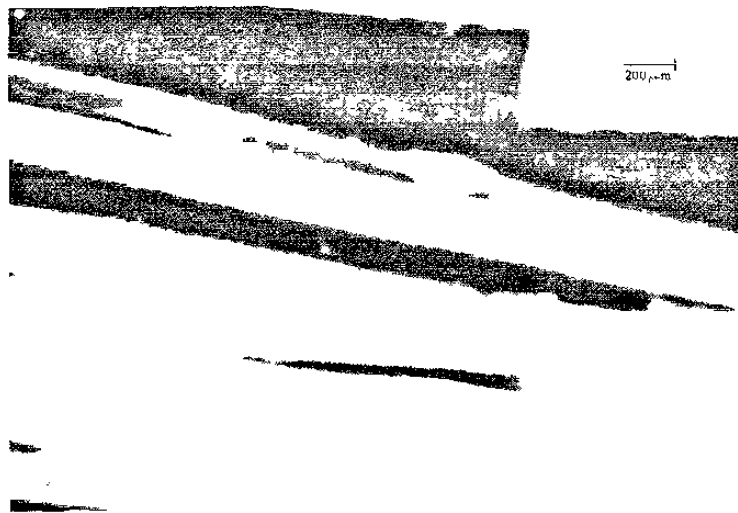


Fig. 28 Fibras control expuestas a agua destilada. Las fibras fueron expuestas al agua destilada durante 24 h a 70°C. no se observa deterioro o cambio físico en la superficie de las fibras.

Sin embargo, al observar las fibras que estuvieron expuestas al NaOH, éstas presentaban señales del ataque alcalino, ya que su color cambió de blanco transparente a un amarillo, señal de la disolución de la lignina [35]. Además, se puede observar en la superficie de la fibra un desfibramiento producto de la reacción con la sustancia alcalina. El efecto producido por el NaOH es muy similar al derivado por el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sustancia

presente en las reacciones de hidratación del cemento [13], ambas sustancias poseen un pH alcalino, lo anterior puede observarse en la figura 29.

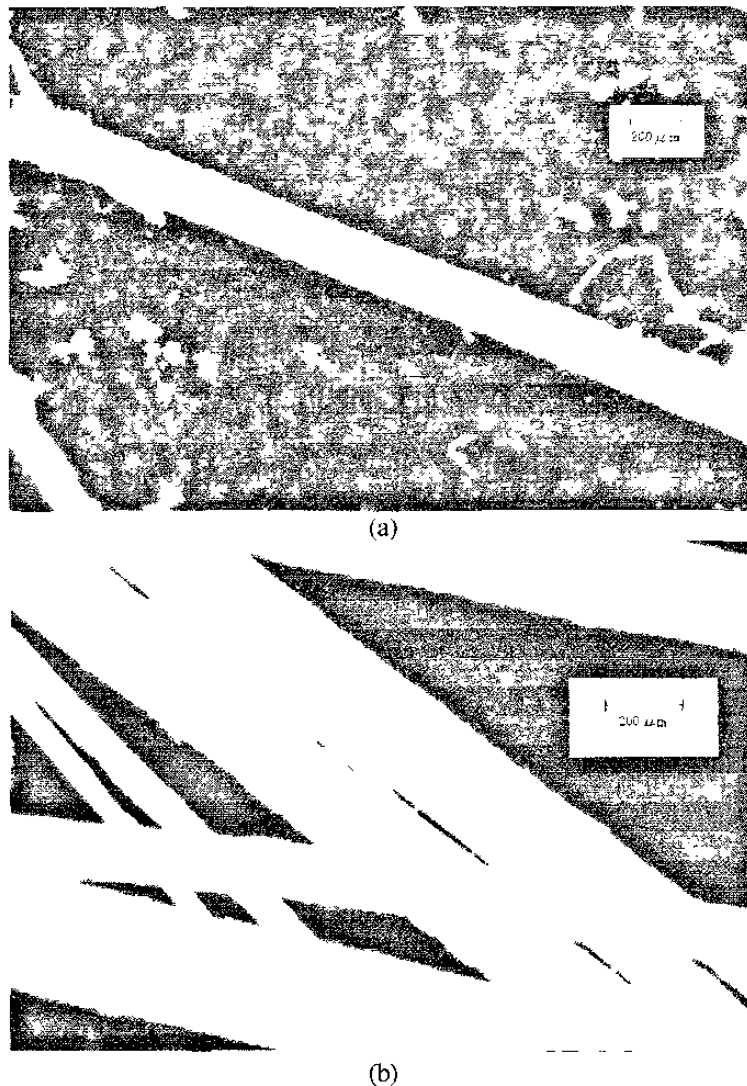


Fig. 29 (a) Fibras expuestas a $\text{Ca}(\text{OH})_2$. (b) Fibras expuestas a NaOH . Las fibras estuvieron expuestas a las soluciones alcalinas durante 24 h a 70°C . En ambos casos se puede observar en la superficie el desfibramiento y el cambio a un color amarillo, señal del ataque alcalino.

Por otra parte, en la figura 30 se observa las fibras que fueron expuestas a soluciones de Na_2SiO_3 y Na_2SO_4 , las cuales tienen un carácter ácido. En lo que respecta al silicato, la fibra cambió ligeramente de color, pero no se observan señales de alguna reacción química en la superficie. Las fibras expuestas al sulfato mantuvieron su color inicial similar a las expuestas en agua destilada, tampoco se observa desfibramiento en la superficie. Esto puede sugerir que tanto la solución de Na_2SiO_3 como la de Na_2SO_4 no producen una reacción química importante que afecte considerablemente a la fibra.

Los cambios físicos en las fibras son importantes ya que indican la reacción que se está llevando a cabo. El color amarillo de las fibras que estuvieron expuestas al NaOH tiene un efecto muy similar al producido por el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ estos cambios pueden indicar la reacción entre ion hidroxilo OH^- y la lignina. Sin embargo, según Gram [35] es posible que los iones de calcio en la solución concentrada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ contribuyen a tener diferentes efectos en el deterioro de la fibra, en comparación con los producidos por otros álcalis como los iones de sodio y potasio. Es posible que el cambio de color en la fibra sea el comienzo del ataque alcalino, sin embargo, este cambio de color no se observa en el caso del silicato y el sulfato, posiblemente por su carácter ácido.

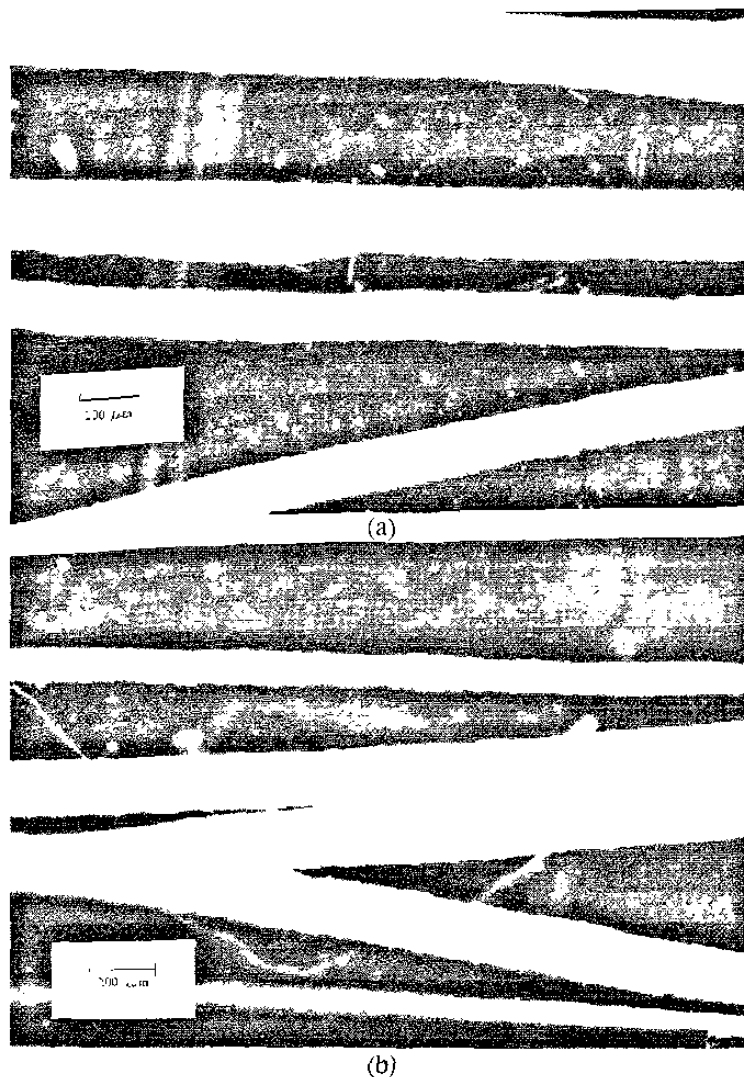


Fig. 30 (a) Fibras expuestas a Na_2SiO_3 . (b) Fibras expuestas a Na_2SO_4 . El carácter ácido de ambas sustancias evita el deterioro en la fibra, en donde se observa la ausencia del desfibramiento provocado por la hidrólisis alcalina.

3.3 Ensayes mecánicos en especímenes de concreto con fibras.

De acuerdo con Mehta y Monteiro [13], el concreto que contiene cemento hidráulico, agua, agregados finos o agregados finos y gruesos y fibras discretas discontinuas es llamado concreto reforzado con fibras. Establecida de esta manera la definición se puede comentar acerca de algunos conceptos sobre el uso este tipo de material compuesto. Como se mencionó en el primer capítulo, las fibras mejoran considerablemente algunas propiedades del concreto simple. Sin embargo, debe reconocerse que las fibras no sustituyen a las varillas de acero en una estructura de concreto.

Shah [87] sostiene que las fibras no son tan eficientes en la transmisión de los esfuerzos a tensión, como lo son las varillas de acero. Pero, el espaciamiento entre las fibras es más cercano que el de las varillas, de tal forma que las fibras proveen un mejor control contra el agrietamiento. De este modo, las fibras y el refuerzo convencional tienen diferentes funciones por desarrollar en la moderna tecnología del concreto, existiendo aplicaciones en las que tanto las fibras como las varillas pueden ser utilizadas.

La principal aportación que tiene la fibra en el concreto, es proporcionarle la capacidad de absorber gran cantidad de energía antes de fallar. Esta propiedad es conocida como tenacidad y se puede determinar según ASTM C 1018-97 [88]. Un parámetro para medir la tenacidad del concreto es su resistencia a la flexión o módulo de ruptura [35]. La tensión en el concreto también puede ser mejorada pero no sustancialmente, mientras que en propiedades como la compresión prácticamente la influencia es muy baja y en algunos casos hasta adversa, ya que las fibras tienen baja resistencia a la compresión en comparación con los otros agregados del concreto.

3.3.1 Efecto de los agentes protectores.

Los agentes protectores utilizados para impregnar a la fibra pueden ocasionar disminución en la adherencia de la fibra con la matriz. Sin embargo, su efecto de protección resulta primordial para evitar el deterioro por la alcalinidad. Para determinar cuál de estos aspectos predomina finalmente en el comportamiento mecánico de los

especímenes de concreto reforzados con fibras tratadas, se llevó a cabo ensayos de tensión y flexión como se indicó en la sección 2.3.2 del capítulo 2. En la figura 31 se puede observar los especímenes fabricados para esta sección.

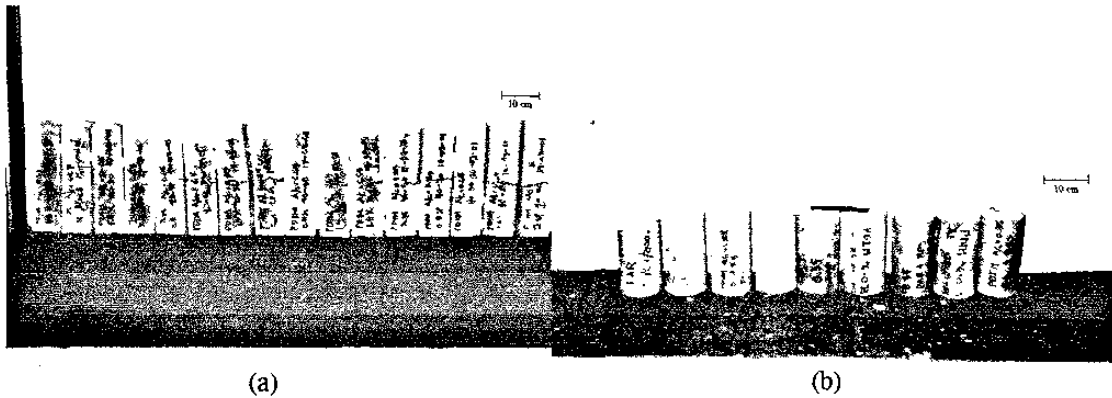


Fig. 31 (a) Especímenes para ensaye a flexión ASTM C 78-94 [70]. (b) Especímenes para ensaye a tensión por compresión diametral ASTM C 496-96 [69]. Relación A/C = 0.35 y 0.65. Reforzados con fibras tratadas con los agentes protectores.

3.3.1.1 Comportamiento a tensión.

Una forma indirecta de obtener la resistencia a tensión del espécimen es mediante el ensaye de tensión por compresión diametral. Actualmente, se está trabajando para entender el comportamiento después del agrietamiento de una matriz con fibras [3], en el caso de una matriz sin fibras el esfuerzo a tensión es uniforme en prácticamente todo el diámetro del cilindro. Cuando la matriz tiene fibras aleatoriamente distribuidas, éstas transfieren los esfuerzos a la matriz por adherencia en el momento del agrietamiento, ocasionando que no se presente la uniformidad mencionada para el concreto simple.

En la figura 32 se indican los resultados obtenidos en la prueba a tensión, como se mencionó anteriormente, la adherencia tiene una importante función en la transmisión de los esfuerzos a la matriz. Se puede observar que los especímenes de la serie 3 (ver tabla 6) con fibra ST y con P fueron los de mayor resistencia en comparación con los otros tratamientos. Sin embargo, resultaron con la resistencia a tensión inferior que los especímenes SF. Este comportamiento de los especímenes de la serie 3 que tienen una relación A/C = 0.65, puede ser debido al agua de sangrado que se produce normalmente en mezclas con relaciones A/C altas, formando acumulación de agua bajo el agregado, y en este caso bajo la fibra. Lo anterior tiende a debilitar la adherencia y reduce la resistencia. Además, para el caso de los tratamientos con AL, AL+R y P+R los

resultados indican que se reduce considerablemente la adherencia debido a su tratamiento. El comportamiento de los especímenes de la serie 8 (ver tabla 6) con relación $A/C = 0.35$ en donde el sangrado disminuye, la tendencia de las curvas es similar a la serie 3, los especímenes ST y P tienen resistencias muy similares a los especímenes SF. De acuerdo con estos resultados, la fibra no mejora la resistencia a tensión del espécimen, sin embargo, evita una falla frágil. Es posible que la discontinuidad en la matriz ocasionada por el sangrado debilita al espécimen, además, de la disminución en la adherencia entre la fibra y la matriz debido a los agentes protectores, sean las causas del comportamiento mostrado en la figura 32.

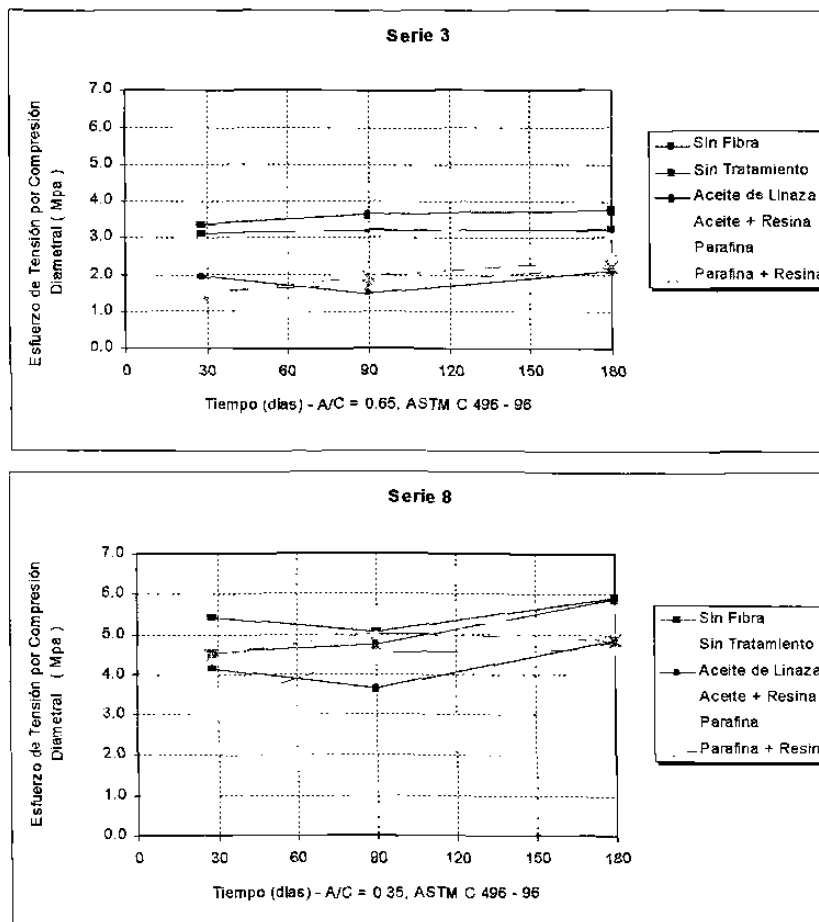


Fig. 32 Efecto en la resistencia a la tensión debido al tratamiento en las fibras. $L_f=20-30$ mm. $V_f=1\%$. Los valores tabulados de las gráficas se muestran en el anexo B pagina 148.

En la figura 33 se muestra el tipo de falla en un cilindro sin fibra y otro con fibra. Durante el ensaye se pudo observar que la fibra impide una falla frágil manteniendo las partes del espécimen en su posición, y en la mayoría de los casos la fibra fue capaz de

mantener momentáneamente la carga después del agrietamiento inicial, lo cual es un indicio de la capacidad de absorber energía que tiene el compuesto antes de fallar.

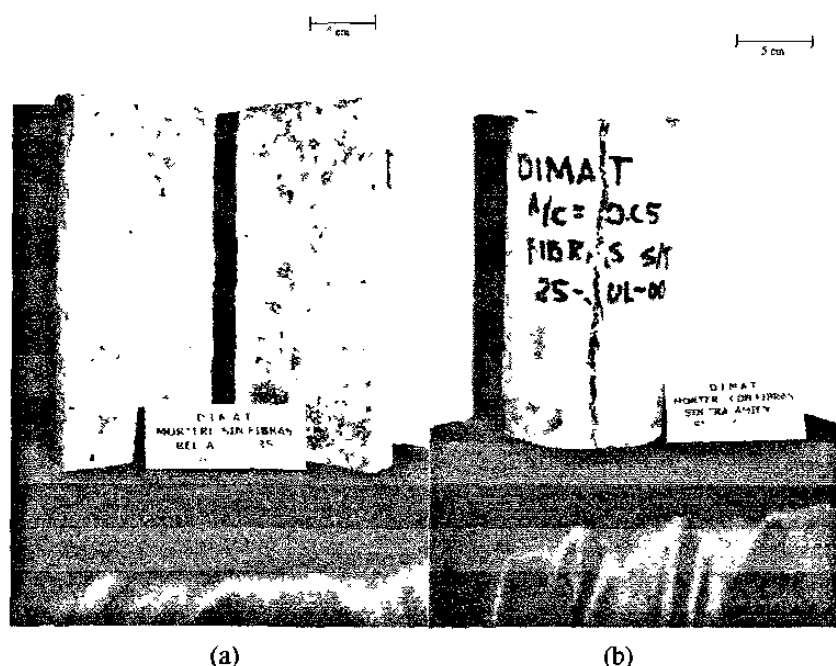


Fig. 33 (a) Falla frágil de un espécimen sin fibras. (b) Falla dúctil de un espécimen con fibras. a tensión. Los especímenes con fibra mantuvieron la capacidad de soportar cargas después del agrietamiento.

3.3.1.2 Comportamiento a flexión.

Según Shah [87], en muchas aplicaciones el concreto reforzado con fibras está sometido a la acción de la flexión. Una de las principales razones para agregar fibras al concreto es aumentar la capacidad de la matriz para absorber energía. En el caso de la flexión, el área bajo la curva carga vs deflexión es usada para estimar la capacidad de absorber energía o la tenacidad del compuesto. En esta investigación no fue posible obtener la tenacidad de los especímenes. Sin embargo, se obtuvo la resistencia a flexión o módulo de ruptura, que de acuerdo con Gram [35], representa un parámetro relacionado con la tenacidad. En la figura 34 y 35 se indican los resultados de los ensayos realizados.

La figura 34 registra los resultados de los ensayos a flexión en las barras con relación $A/C = 0.65$. Se puede observar que el tratamiento en las fibras con P permite al concreto tener el doble de resistencia a flexión en comparación con los otros tratamientos, sin embargo, su resistencia es menor que los especímenes SF y ST. Esto resultó ser similar

a lo encontrado para la resistencia a tensión, posiblemente como ya se comentó, el sangrado que se presenta en concretos con alta relación A/C, influyó para que la resistencia a flexión de los especímenes con fibra fuera menor que la de los especímenes sin refuerzo.

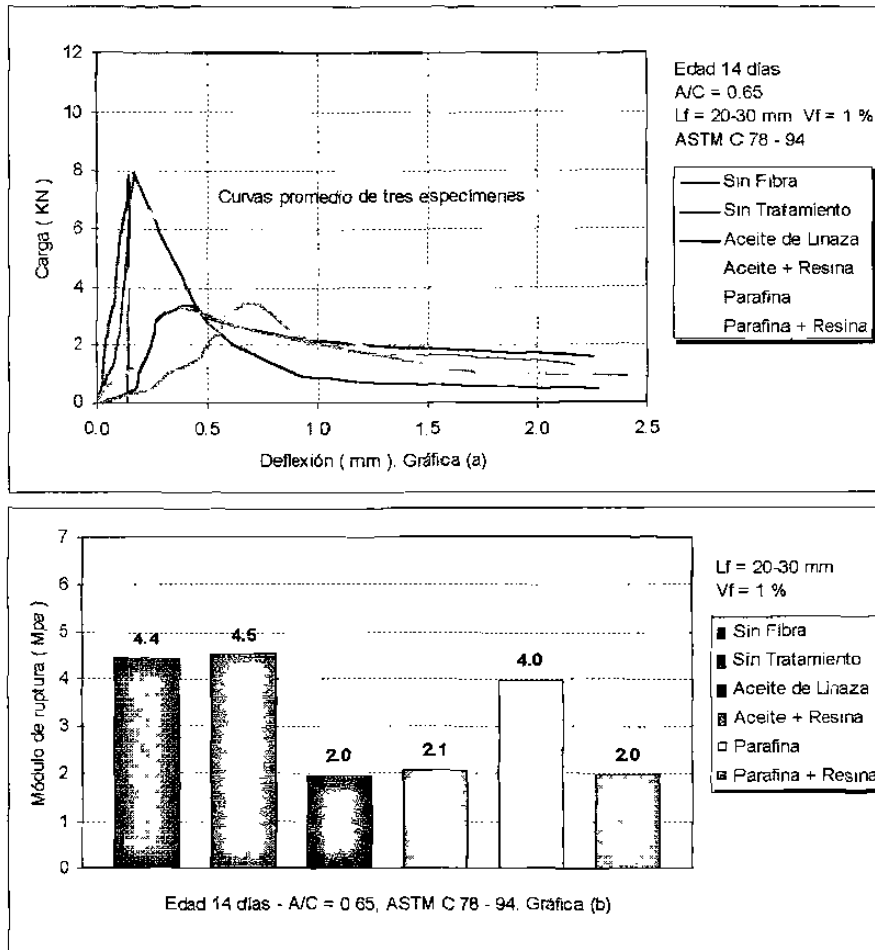


Fig. 34 Efecto en el comportamiento a flexión y módulo de ruptura debido a los tratamientos en la fibra. para especímenes de la serie 3. En la gráfica (a) se puede observar que la mayor área bajo la curva corresponde al tratamiento con parafina. lo que es un indicio de la tenacidad del compuesto. Los valores se encuentran tabulados en el anexo B página 149.

En los especímenes con relación $A/C = 0.35$ donde el sangrado se reduce sustancialmente, especímenes con fibras tratadas con P registran la mayor resistencia a flexión incluso sobre los especímenes SF y ST, ver la figura 35. Cada curva carga vs deflexión de las figuras 34 y 35 son producto del promedio de tres especímenes y el área bajo esta curva representa la capacidad de absorber energía o la tenacidad del concreto. En ambas series la mayor área bajo la curva carga vs deflexión corresponde al concreto

reforzado con fibra tratada con parafina, esto sugiere que la mayor tenacidad de los especímenes ensayados se obtiene cuando se refuerzan con las fibras tratadas con parafina. Posiblemente la parafina interactúa mejor con la fibra debido a que sus estructuras moleculares son similares ya que ambas se componen de largas cadenas, en el caso de la parafina son cadenas de hidrocarburos y en la fibra las cadenas moleculares son de glucosa.

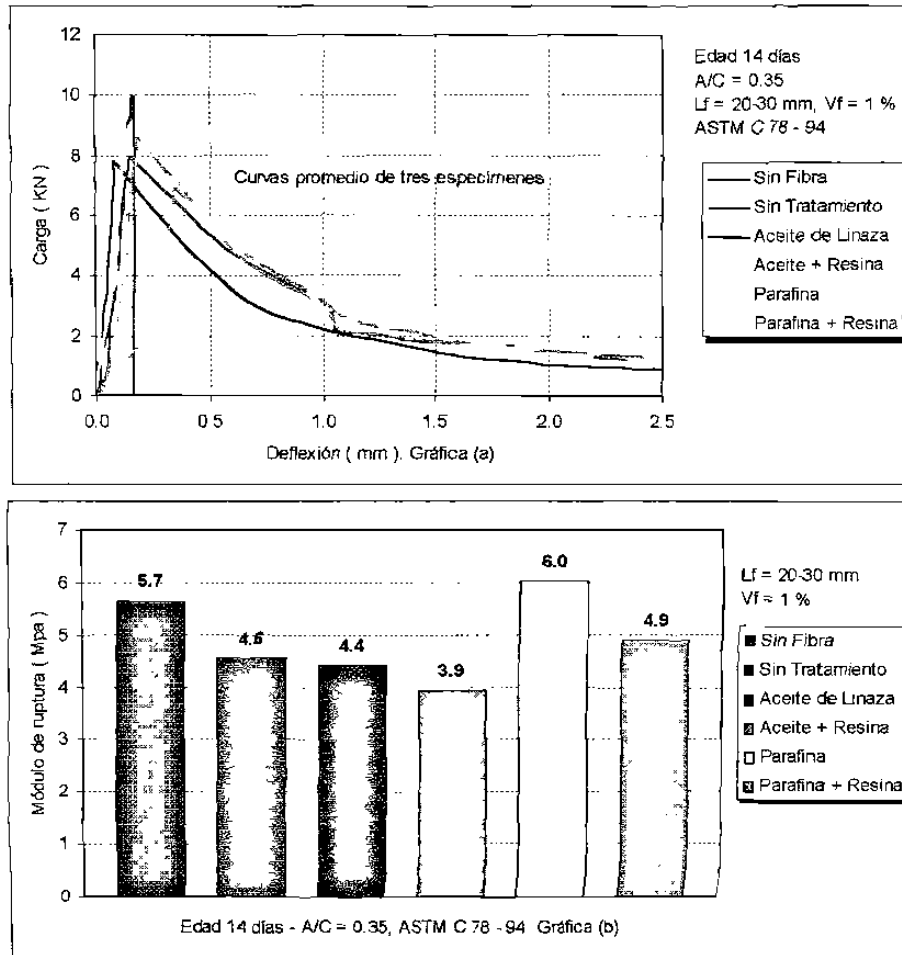


Fig. 35 Efecto en el comportamiento a flexión y módulo de ruptura debido a los tratamientos en la fibra, para especímenes de la serie 8.

Mehta [13], comenta que anteriormente se suponía que las resistencias a la tensión, igual que a la flexión del concreto, podían incrementarse sustancialmente introduciendo fibras cercanamente espaciadas que obstruirían la propagación de las microgrietas, retrasando así el inicio de las grietas por tensión del material. Sin embargo, sigue comentando, estudios experimentales mostraron que con los volúmenes y tamaños de fibras que podían ser adecuadamente incorporados en concretos convencionales, los

productos reforzados con fibra no presentaron una mejora sustancial en la resistencia en comparación con las mezclas correspondientes sin fibra.

La anterior aseveración de Mehta, fue comprobada con los resultados que se obtuvieron en esta sección. Las resistencias a tensión y flexión fueron generalmente más bajas en comparación con el concreto simple, cuando se utilizaron fibras cortas y una fracción de volumen de 1%. Como se había discutido anteriormente, es posible que el efecto del sangrado tenga una influencia considerable en la reducción de la adherencia al menos en los concretos con relación $A/C = 0.65$. Mientras que para la relación $A/C = 0.35$ el sangrado disminuye, encontrándose entonces que los concretos con fibras tratadas con parafina tienen una resistencia a flexión mayor en comparación con los especímenes SF.

En la figura 36 se indican los resultados obtenidos para las series 3 ($A/C = 0.65$) y 8 ($A/C = 0.35$) correspondientes a la resistencia a flexión de especímenes con fibras tratadas sometidos a 10 ciclos de humedecimiento y secado. Los especímenes estuvieron

10 meses en el cuarto de curado con 95% de humedad antes de ser sometidos a los ciclos mencionados. Los resultados de esta prueba señalan que los especímenes con fibra tratada con parafina mantienen la capacidad de resistir cargas. Lo que resultó similar a lo obtenido para los especímenes de 14 días de edad.

De acuerdo con los resultados hasta este

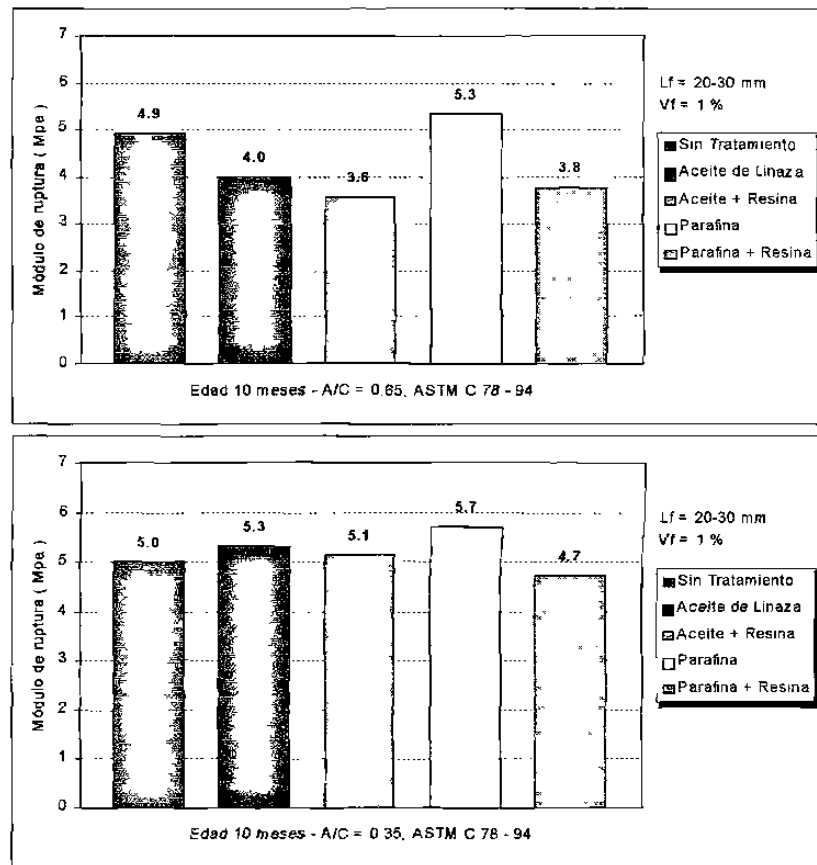


Fig. 36 Efecto en la resistencia a flexión de especímenes con fibras tratadas, debido a ciclos de humedecimiento y secado.

punto, se puede decir que el medio alcalino de la matriz de cemento a la edad de 14 días al parecer no es un factor que reduzca la resistencia a flexión, ya que las barras reforzadas con fibras sin tratamiento mantuvieron una resistencia similar a las reforzadas con fibras tratadas con parafina. Sin embargo, en los especímenes con 10 meses de edad y sometidos a los ciclos de humedecimiento y secado, la alcalinidad parece empezar a afectar a las fibras sin tratamiento ya que disminuyó la resistencia de los especímenes reforzados con estas fibras. Lo anterior puede deberse a que las variaciones de humedad producen contracción y expansión en el concreto originando agrietamientos, los que permiten el paso de la humedad y, por consiguiente, se provoca el deterioro en la fibra sin tratamiento. Así también, la fibra tratada con parafina resultó ser la mejor opción en comparación con los otros agentes protectores. Los resultados de la resistencia a tensión y flexión indican que la parafina puede evitar la absorción de agua de la fibra y reducir los cambios volumétricos de ésta. Por consiguiente, los esfuerzos de adherencia en la fibra con parafina son mayores en comparación con los otros agentes protectores.

Por otra parte, los especímenes sin fibra presentaron una falla frágil con mínima deflexión, aproximadamente 0.2 mm. Sin embargo, la falla en los especímenes con fibra fue dúctil y tuvieron la capacidad de soportar carga después del agrietamiento. En la figura 37 se observan los tipos de fallas en los especímenes ensayados.

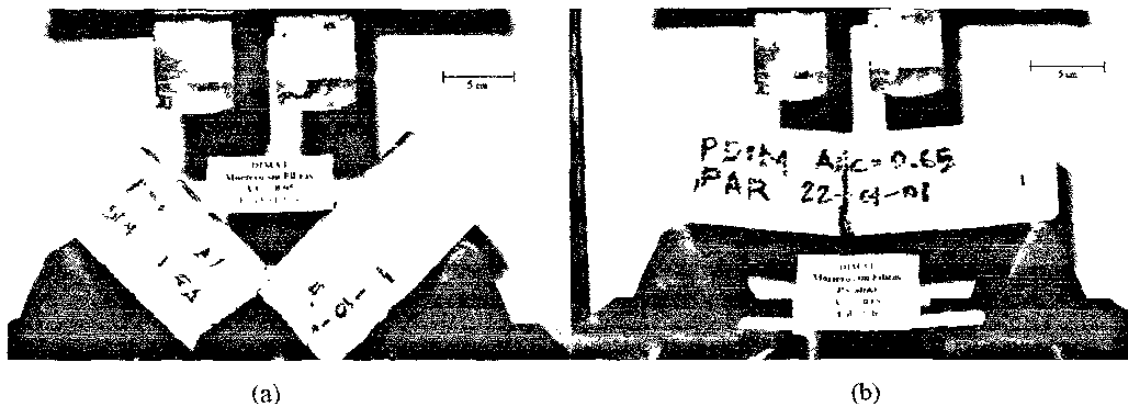


Fig. 37 (a) Falla frágil de un espécimen sin fibras. (b) Falla dúctil debido a las fibras de refuerzo, a flexión. Las fibras le permiten al espécimen deformarse en forma importante sin colapsarse.

El comportamiento observado de 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 es capaz de sostener 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 en más de 10 veces con respecto a la deflexión del agrietamiento, ver figuras 34 y 35. No se observó la formación de pequeñas grietas adicionales a la primera. Al aparecer la primera grieta, ésta 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 las fibras fallaron por extracción y no por ruptura, lo que sugiere que los esfuerzos no se transfieren adecuadamente entre la fibra y la matriz.

3.3.2 Efecto del volumen y la longitud de la fibra.

Según Aziz, Paramaswivam y Lee [7], la resistencia última del concreto con fibras depende principalmente del tipo de fibra, longitud y volumen de las fibras y también de la proporción de los otros materiales. Se ha encontrado que la resistencia a tensión se incrementa con el aumento en la longitud de la fibra, hasta un valor máximo, después disminuye al seguir aumentando la longitud por el efecto del entrelazado o apelmazado. El comportamiento post agrietamiento del concreto con fibras depende del volumen y la longitud de la fibra, además de las propiedades mecánicas de la fibra como su esfuerzo último y la elongación a la ruptura. Goldfein [89], señala que la resistencia a flexión e impacto de especímenes es proporcional a la resistencia a tensión de la fibra usada como refuerzo. Es así, como todos estos factores intervienen en la distribución de los esfuerzos de adherencia entre la fibra y la matriz.

La relación de la longitud y el volumen de fibra difiere para cada tipo de fibra natural [6]. Una cantidad alta de fibra dificulta el mezclado y las fibras tienden a apelmazarse, generando inadecuada adherencia lo que disminuye su resistencia [90,91]. Según los resultados de las secciones anteriores referentes al porcentaje de absorción, y resistencia al medio alcalino de la fibra. Así como, el efecto de los agentes protectores en la resistencia a tensión y flexión de especímenes. Se seleccionó a la parafina como el mejor agente protector de la fibra en comparación con los otros estudiados en este trabajo.

3.3.2.1 Comportamiento a tensión.

En la figura 38 se señalan los resultados obtenidos de los ensayos a tensión por compresión diametral [69], para especímenes de concreto con diferentes volúmenes y

longitudes de fibra. En donde se puede observar que la longitud de fibra igual a 300 mm, mejora la resistencia a tensión, y en combinación con un de volumen de 0.5% aumentan la resistencia en un 20% y 40% para relaciones A/C = 0.65 y 0.35 respectivamente, comparada con los especímenes sin fibra. Se puede observar que en general la resistencia a tensión disminuyó conforme se incrementó el volumen de la fibra, esto puede deberse a la falta de uniformidad en la distribución de la fibra, para volúmenes mayores a 1%. Los porcentajes de fibra de 1.5 y 2% para longitudes mayores de 300 mm representaron dificultades durante su mezclado. Sin embargo, los porcentajes de 0.5 y 1% tuvieron una mejor distribución en la mezcla.

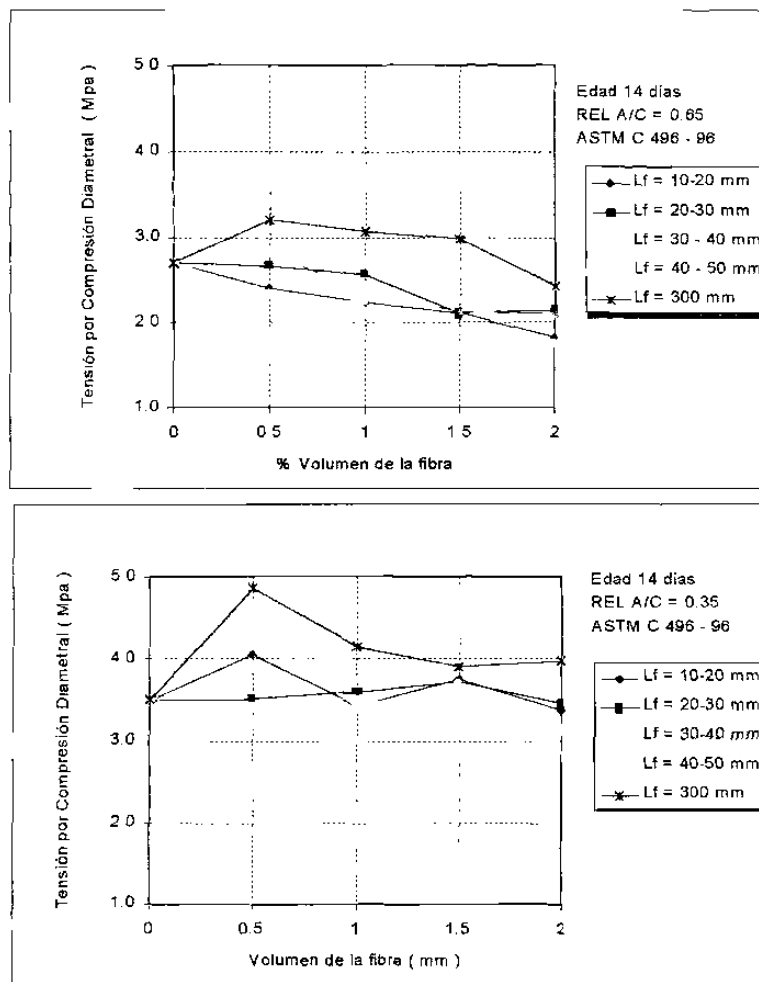


Fig. 38 Efecto del volumen y la longitud de la fibra en la resistencia a tensión. Para ambas relaciones A/C la fibra larga mejora el comportamiento a tensión debido al incremento en la adherencia fibra-matriz.

Mehta [13]. sostiene que la mejora considerable del concreto con fibras. se refleja en su comportamiento post-agrietamiento, es decir, mientras que las resistencias últimas a

la tensión no se incrementaron apreciablemente, las deformaciones unitarias a la tensión de ruptura sí lo hicieron. Por lo tanto, en comparación con el concreto simple, el concreto reforzado con fibra es mucho más tenaz.

3.3.2.2 Comportamiento a flexión.

La resistencia a flexión de los especímenes de concreto es también afectada por la variación del volumen y la longitud de la fibra [92]. La figura 39 muestra los resultados encontrados con estas variables respecto a la flexión.

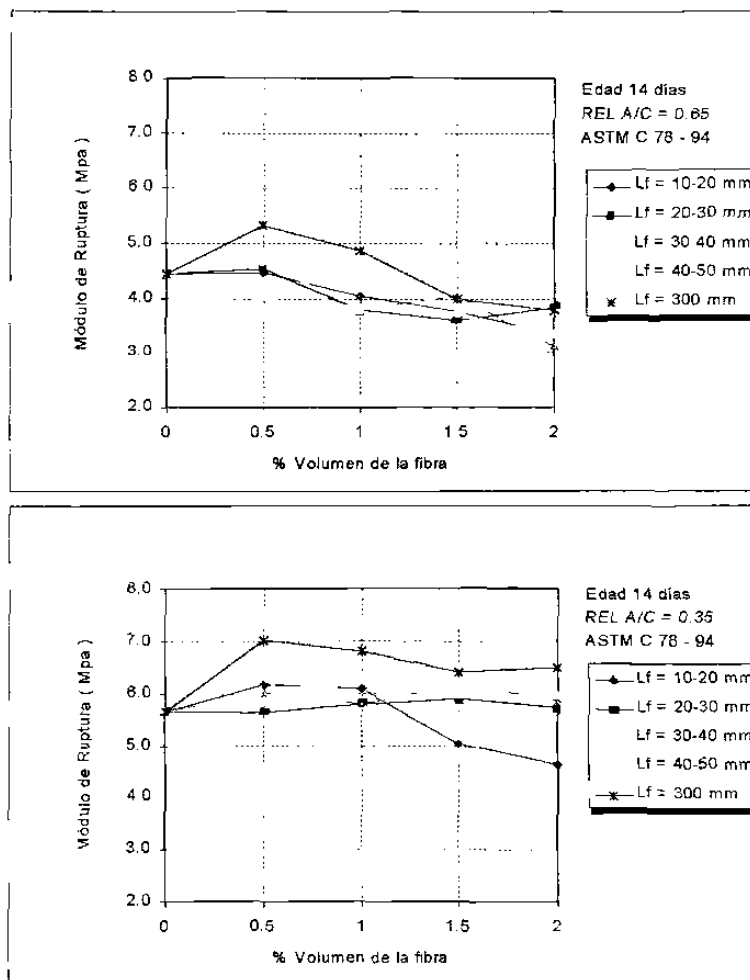


Fig. 39 Efecto del volumen y la longitud de la fibra en la resistencia a flexión. Al igual que en la figura 38 las fibras largas incrementan el módulo de ruptura con respecto al concreto simple. Los datos de las figuras 38 y 39 se encuentran en el anexo B páginas 150 y 151.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el comportamiento fue muy similar a la resistencia a tensión. Como puede observarse en la figura 38 la fibra con longitud de 300

mm aumentó la resistencia a flexión de las barras. Siendo nuevamente 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. Del mismo modo que la tensión, la resistencia a flexión 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, esto se discutirá a detalle más adelante.

Shah [87] 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.

3.3.3 Efecto de tratamientos químicos y mecánicos en la fibra.

En Europa [2], las fibras de celulosa provenientes de la madera son tratadas para proporcionarles durabilidad. Los tratamientos pueden ser químicos, fisicoquímicos o físicos. Sin embargo, estos tratamientos son industrializados y costosos lo que dificulta su utilización en países como México. No obstante, se realizaron algunas pruebas con tratamientos químicos en pequeñas cantidades, usando sobre todo sustancias ácidas y alcalinas para eliminar la lignina y un tratamiento físico-mecánico de fricción para tratar de incrementar la adherencia entre la fibra y la matriz de cemento. De esta manera, se utilizaron en forma controlada tres sustancias químicas para propiciar la disolución de los componentes en las fibras que son responsables de su deterioro dentro de la matriz de cemento [35]. Las sustancias usadas fueron silicato de sodio (Na_2SiO_3) con una concentración de 30-35% y posteriormente diluido en agua a razón de 1:1, sulfato de sodio (Na_2SO_4) al 5% en peso del agua e hidróxido de sodio (NaOH) al 5% en peso del agua, también se usó agua destilada como control.

3.3.3.1 Comportamiento a flexión y compresión

En la figura 40 se muestran los resultados obtenidos, en donde la diferencia entre la resistencia tanto a flexión como a compresión de los diferentes tratamientos no es significativa. Así también se puede observar que los especímenes sin fibra resultaron con mayor resistencia, por lo que la longitud y el volumen seleccionados para las fibras no fueron los adecuados. Por otra parte, al examinar la superficie de falla se observó que la fibra tratada con Na_2SO_4 presentaba una mejor adherencia en comparación con los otros tratamientos químicos y con los especímenes de la sección 3.3.2. Esto puede ser debido al tratamiento de fricción y al efecto que el Na_2SO_4 tiene en la fibra, como se mencionó en la sección 3.2.5 esta sustancia al parecer no produce una reacción alcalina en la superficie de la fibra que origine su deterioro.

De acuerdo con lo anteriormente discutido y los resultados de la figura 40, se decidió utilizar solamente al Na_2SO_4 como tratamiento químico y mantener el tratamiento físico-mecánico de fricción para la fibra.

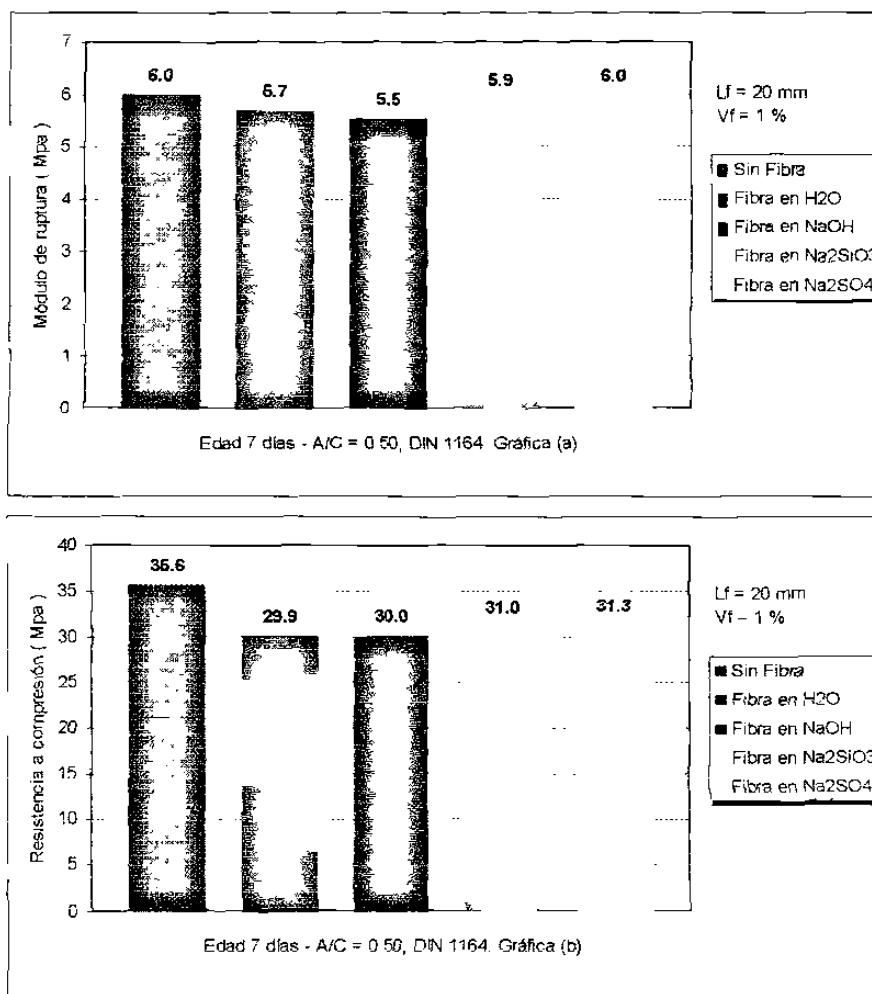


Fig. 40 Efecto de los tratamientos químicos en la resistencia a flexión (a) y a compresión (b). Estos ensayos fueron realizados durante la estancia de investigación en Alemania. Sus datos se tabulan en el anexo B página 152.

Al igual que los especímenes de la sección 3.3.2, se trató de encontrar el volumen y la longitud de fibra adecuados, en los especímenes fabricados en Alemania. Los resultados obtenidos en los ensayos a flexión se indican en la figura 41. Se observa una tendencia muy similar a la encontrada con los especímenes fabricados en México. Las barras con fibras largas de 150 mm y volumen de 0.5% aumentaron la resistencia a flexión y compresión en un 22 y 13% respectivamente, en comparación con las barras sin fibras. Al igual que los resultados de la sección 3.3.2 la resistencia disminuye al incrementarse el volumen de la fibra y al examinar la superficie de falla, la fibra larga falló por ruptura a diferencia de las fibras cortas que fallaron por extracción, como ya se discutió la fibra larga alcanza a desarrollar más adherencia que las cortas, además del anclaje adicional que le proporciona el tratamiento físico-mecánico.

Los resultados obtenidos tanto en México como en Alemania indican que volúmenes bajos de fibra, 0.5% con respecto al volumen de la mezcla aumentaban la resistencia. Es probable que al tener menos cantidad de fibra el efecto desfavorable del sangrado se reduce debido a que el agua puede subir por los poros libremente sin formar los depósitos que posteriormente se convierten en pequeños huecos. También, el utilizar las fibras largas permite tener mayor área de contacto con la matriz incrementando la adherencia. Esto explica el tipo de falla por ruptura que presentó la fibra. Además, aunque la fibra es larga al mezclar volúmenes bajos, éstas no tienden a apelmazarse como sucede con volúmenes mayores.

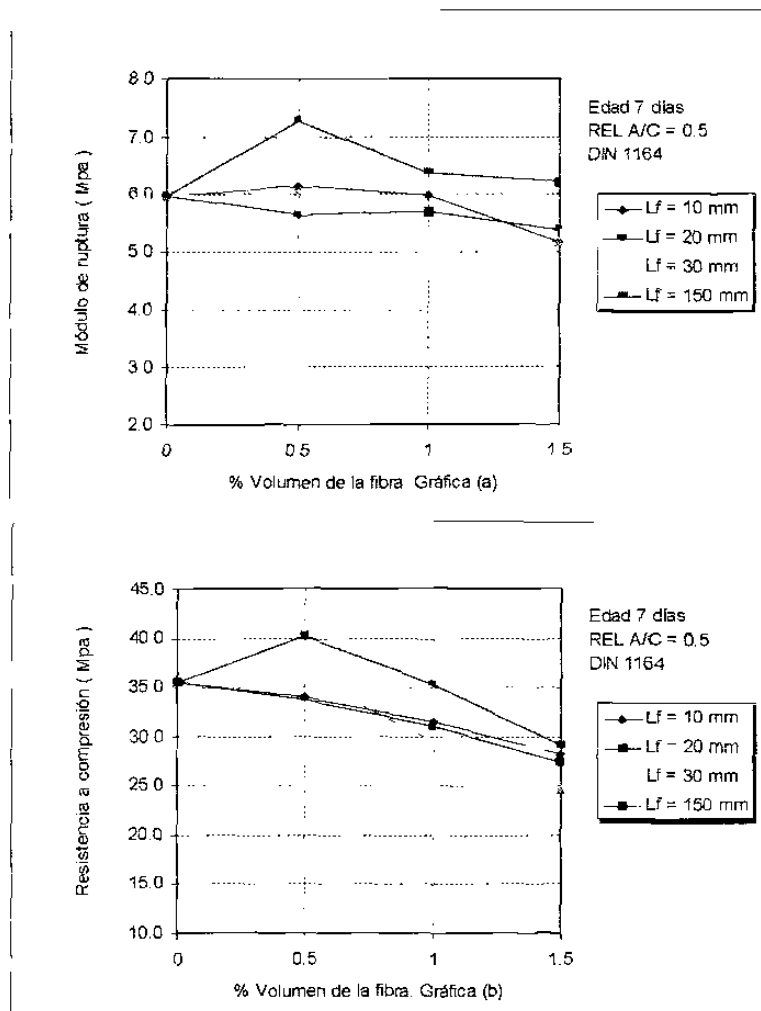


Fig. 41 Efecto del volumen y la longitud de la fibra en la resistencia a flexión y compresión de especímenes con fibras tratadas con Na_2SO_4 . El comportamiento resultó similar a lo mencionado en las figuras 38 y 39, las fibras largas incrementan la resistencia del compuesto. Los datos de esta figura se encuentran tabulados en el anexo B páginas 154 y 155.

La resistencia a flexión de los especímenes elaborados en Alemania no puede ser comparada directamente con la resistencia de los especímenes fabricados en México. La diferencia de los materiales, del proporcionamiento y el método de mezclado, colado y curado pueden influir. Pero principalmente, es el método de ensaye a flexión el parámetro que puede influir en los resultados obtenidos. Neville [93], comenta que el valor del módulo de ruptura depende de la distribución de la carga. La carga en un punto central, produce una distribución triangular del momento de flexión, de manera que el esfuerzo máximo tiene lugar sólo en una sección de la viga. Por otra parte, la carga simétrica en dos puntos produce un momento constante de flexión entre los puntos de carga. Con esta última distribución la cara inferior de la barra en la tercera parte del claro está sometida al esfuerzo máximo, y la grieta crítica puede iniciarse en cualquier sección que no sea lo suficientemente resistente para soportar este esfuerzo. En cambio para la carga central, la falla normalmente ocurre cuando se sobrepasa la resistencia de la pequeña área que se encuentra bajo la carga. Es de esperarse entonces que el módulo de ruptura será menor cuando se aplique la carga en dos puntos, ya que como el concreto está constituido por elementos de resistencia variable, es más probable encontrar en una zona de esfuerzo máximo un punto lo suficientemente débil como para fallar.

3.3.4 Influencia de la humedad del espécimen en el ensaye.

Debido a que todos los ensayes de las secciones 3.3.1 y 3.3.2 se realizaron inmediatamente después de retirar a los especímenes del cuarto de curado, es decir, en condición saturada. Se llevaron a cabo pruebas para determinar si esta condición de humedad afectaba considerablemente la resistencia en el concreto. Neville [93], sostiene que el módulo de ruptura del concreto que se ha dejado secar es menor que el módulo de un espécimen similar en condiciones de saturación. Esta diferencia se debe a los esfuerzos de tensión inducidos por la contracción restringida e irregular que tiene lugar momentos antes de la aplicación de la carga. Sin embargo, también comenta que cuando el espécimen de prueba es pequeño y el secado es muy lento, de manera que pueden redistribuirse y aliviarse los esfuerzos internos, se observa un incremento en la resistencia. La resistencia de los especímenes para pruebas de compresión también se incrementa con el secado.

Los resultados que se indican en la figura 42, muestran que en el caso de especímenes sin fibra y con fibra tratada las condiciones de humedad no influyen en la resistencia a tensión. En el caso de especímenes con fibra sin tratamiento resultó que al secarse se incrementa la resistencia en un 10% aproximadamente.

Por otra parte, comparando los resultados de las tres series entre sí se observa que los especímenes sin fibra tuvieron un 35% y 17% más resistencia que los especímenes con fibra sin tratar y tratada respectivamente. Lo anterior puede deberse al efecto que tuvo el curado acelerado en la fibra, al ser sometidos los especímenes durante 3.5 h a un ambiente húmedo y con alta temperatura las fibras fueron afectadas, sobre todo las fibras sin parafina. De cualquier modo, en lo relacionado a la influencia de la humedad presente en el espécimen durante su ensayo los resultados señalan que resulta prácticamente nula esta influencia en lo que a la resistencia a tensión se refiere. Sin embargo, por criterio es conveniente ensayar los especímenes en las mismas condiciones que tendrá el elemento al estar trabajando.

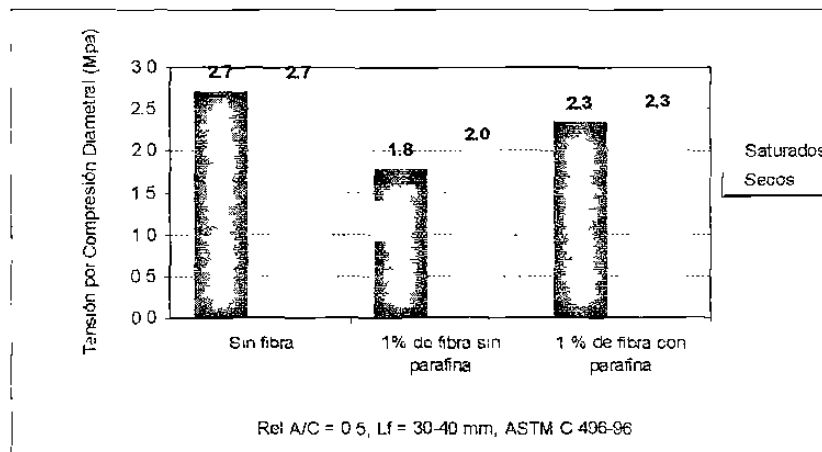


Fig. 42 Influencia de las condiciones de humedad durante el ensayo en la resistencia a tensión. Se realizó un curado acelerado en los especímenes, lo que provocó que la fibra fuera afectada, sobre todo la fibra sin tratamiento. Prácticamente resulta nula la influencia de la humedad al momento del ensayo de acuerdo con los resultados encontrados. Los datos de la figura se encuentran tabulados en el anexo B página 156.

3.4 Pruebas aceleradas de durabilidad del concreto con fibras.

Del mismo modo que cualquier material, el concreto reforzado con fibras también es susceptible al medio que lo rodea. Cuando tiene una baja relación A/C y está bien compactado y curado, normalmente las fibras están bien protegidas por la pasta de cemento. Según Mehta [13], en la mayoría de los ambientes especialmente en aquellos que contienen cloruros, la corrosión cerca de la superficie del concreto es inevitable en el caso de fibras de acero. Sin embargo, las fibras pueden permanecer sin corrosión siempre y cuando el concreto sea denso e impermeable. Por otra parte, la fibra de vidrio ordinaria de carácter ácido reacciona con los concretos de cemento portland, debido a los ataques químicos de la pasta alcalina del cemento. El zirconio y otras fibras de vidrio resistentes a los álcalis tienen mejor durabilidad en los ambientes alcalinos, pero aun en estas fibras se ha informado que presentan un deterioro gradual con el tiempo [94]. Igualmente, las fibras naturales y muchos polímeros sintéticos padecen de falta de durabilidad en el ambiente alcalino de la matriz de cemento [2]. De acuerdo con el Comité 19 de la Reunión Internacional de Laboratorios de Estructuras y Materiales RILEM [95] la durabilidad requerida para los concretos con fibra depende del propósito para el cual fueron diseñados, si éstos son componentes estructurales de un edificio se requiere una durabilidad de 100 años o más. Sin embargo, cuando se aplica para elementos no estructurales su tiempo de vida puede ser mucho menor, por ejemplo 20 años o menos.

Gram [35] sugiere varias alternativas para producir una matriz impermeable, entre las que considera más factibles son la reducción de la relación A/C y el uso de altos contenidos de humo de sílice, aproximadamente del 40 al 50 %. El humo de sílice es altamente reactivo y reduce la alcalinidad de la pasta de cemento hasta un pH de 9 a 10. Sin embargo, es costoso y al disminuir la alcalinidad se puede provocar problemas de corrosión si el elemento está reforzado con varillas de acero. La presente investigación se pretendió obtener matrices más densas reduciendo la relación agua/cementante, esto se logró agregando ceniza volante la cual tiene un costo muy inferior en comparación

con el humo de sílice. La ceniza volante no es tan reactiva como el humo de sílice, la matriz de cemento mantiene su alcalinidad, pero permitió reducir las relaciones A/C de 0.65 y 0.35 a relaciones agua/cementante de 0.40 y 0.30 respectivamente. Por otra parte, también fue usado el estearato de sodio o sal del ácido esteárico de sodio, la cual tiene propiedades hidrófobas, con la finalidad de impermeabilizar la matriz de cemento evitando que la humedad y los medios agresivos afecten a la fibra.

En la sección 2.4 se describieron con más detalle la ceniza volante y el estearato de sodio. Como se comentó en el capítulo 2 para simular el efecto en el concreto con fibras que puede ocasionar la exposición durante años al medio natural, fue necesario realizar pruebas de deterioro acelerado que dieran una tendencia sobre la posible durabilidad de estos concretos. Se han realizado algunos estudios de durabilidad en concretos reforzados con fibras naturales [28,31,35,96], en donde los especímenes se someten a diferentes medios agresivos a manera de pruebas aceleradas, los resultados encontrados por estos investigadores se comentaron en el capítulo 1.

Las pruebas seleccionadas para la presente investigación fueron las siguientes:

- a. Variaciones en la humedad y temperatura.
- b. Ambiente con alto contenido de humedad.
- c. Exposición a los cloruros y sulfatos.

Estas pruebas de deterioro acelerado tratan de simular medios comunes en México, por ejemplo, climas húmedos característicos del centro del país, altas temperaturas con clima seco comunes en el norte y ambientes tropicales con variación en la humedad y temperatura de las costas. Además, del ataque químico producido por la exposición a cloruros y sulfatos que atacan severamente al concreto en ambientes marinos.

3.4.1 Resistencia a las variaciones de humedad y temperatura.

Los cambios de contenido de humedad en conjunto con la variación en la temperatura son causas de agrietamiento debido a la expansión y contracción del concreto [93]. Este agrietamiento permite la penetración de la humedad ambiente al concreto provocando reacciones con el Ca(OH)_2 de la pasta, deteriorando a las fibras, así también, éstas sufren cambios volumétricos que afectan su adherencia con la matriz de cemento. En la figura 43 se señalan los resultados encontrados para la prueba 1 y 2. Las pruebas de deterioro

acelerado fueron establecidas en el capítulo 2 sección 2.4.4. Si se compara únicamente los especímenes del control se observa que el estearato de sodio provoca una disminución en la resistencia a la flexión del orden del 13% al 18%. Esto puede deberse a la acción hidrófoba que tiene el estearato alterando parcialmente la reacción de hidratación del cemento.

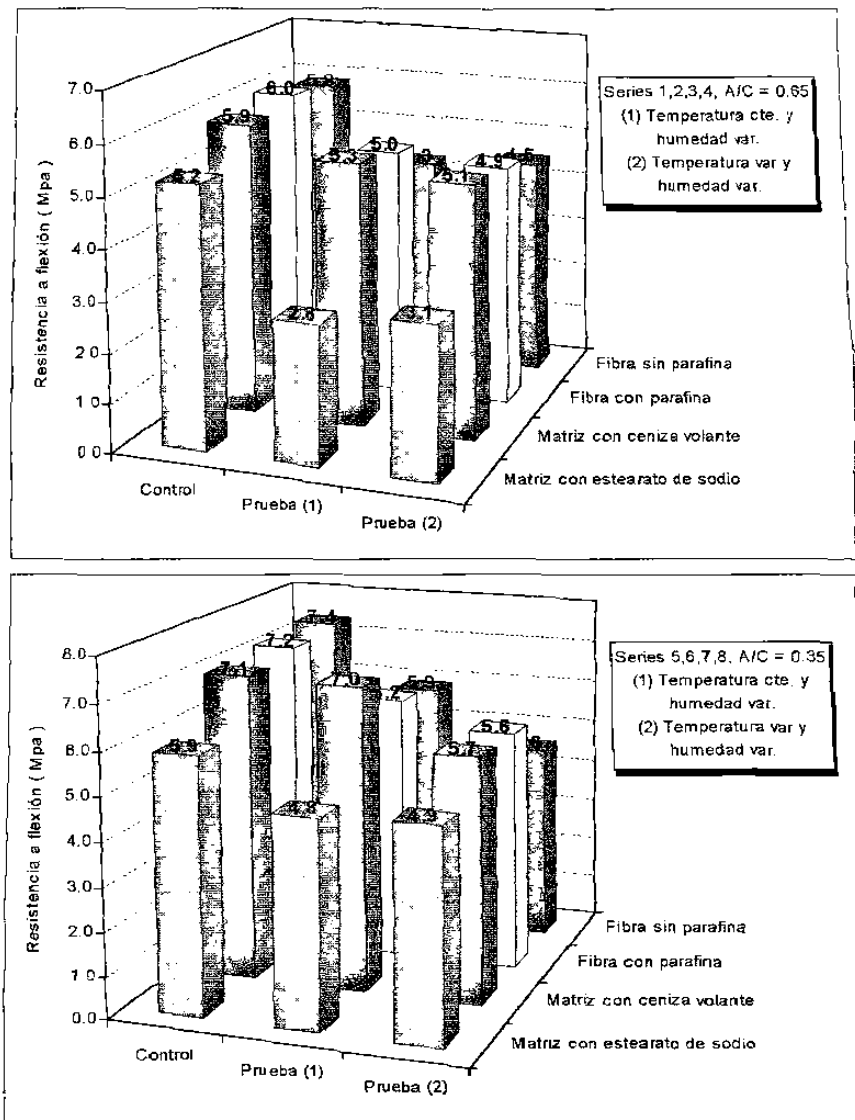


Fig. 43 Efecto de las variaciones de humedad y temperatura en la resistencia a la flexión. Los especímenes con ceniza volante reducen el deterioro producido por los ciclos de humedecimiento y secado. Los datos se tabulan en el anexo B páginas 156 y 157.

Con respecto a la prueba 1 y 2, el concreto con ceniza volante y reforzado con fibras tratadas con parafina resultó con la resistencia a flexión más alta en comparación con los otros concretos. Al agregar la ceniza volante la cual es un cementante, la matriz se

vuelve más densa y minimiza el paso de la humedad, su relación A/C de 0.65 y 0.35 se convierte en relación agua/cementante de 0.40 y 0.30 respectivamente, lo que produjo incrementos en la resistencia si se compara con los otros concretos. La prueba 2 resultó ser más crítica al registrar una mayor disminución de la resistencia en todos los concretos. La matriz densa del concreto con ceniza impide que las variaciones de la humedad deterioren a la fibra, de esta manera la fibra puede mantener su ductilidad y capacidad de refuerzo.

3.4.2 Resistencia al ambiente húmedo.

El efecto de un ambiente con alta humedad en forma constante puede resultar benéfico para el concreto, siempre y cuando las condiciones de humedad no cambien. Según Gram [35], el transporte de los iones hidroxilo OH^- o los iones Ca^{2+} en los poros del concreto es muy lento cuando el ambiente exterior se mantiene constante, lo que disminuye el deterioro en la fibra. De igual forma, los cambios volumétricos por contracción y expansión en la fibra no se llevan a cabo en un ambiente estable.

En la figura 44 se pueden observar los resultados que se obtuvieron para la prueba 3. Se puede apreciar que no hay una diferencia significativa en la resistencia entre los especímenes de control ensayados a los 28 días y los especímenes que estuvieron 150 días en el ambiente húmedo. Estos resultados confirman lo discutido anteriormente, los ambientes estables sin variación en su humedad o temperatura permiten que el concreto con fibras sea durable. Gram [35], concluyó en uno de sus estudios que la degradación de las fibras de sisal en la matriz alcalina de cemento era muy lenta en ambientes constantes, ya sean secos o húmedos. Esto es apreciado en los resultados obtenidos, mientras que para con los ciclos de humedecimiento y secado la resistencia a flexión de concretos con ceniza volante disminuyó en un entre un 14 a 20%, en la exposición al ambiente húmedo constante la disminución solamente fue de un 2%.

3.4.3 Resistencia a los cloruros y sulfatos.

Afortunadamente sólo una pequeña parte del concreto utilizado en la construcción se expone a graves ataques químicos. Neville [93], comenta que las formas más frecuentes de ataque de los agentes químicos al concreto son la lixiviación del cemento, la acción

de los sulfatos, el agua marina y las aguas ligeramente ácidas. Es posible usar diferentes tipos de cementos para contrarrestar el ataque químico, sin embargo, en algunos casos la densidad y permeabilidad del concreto, influyen en su durabilidad a tal grado, que superan la influencia del tipo de cemento empleado.

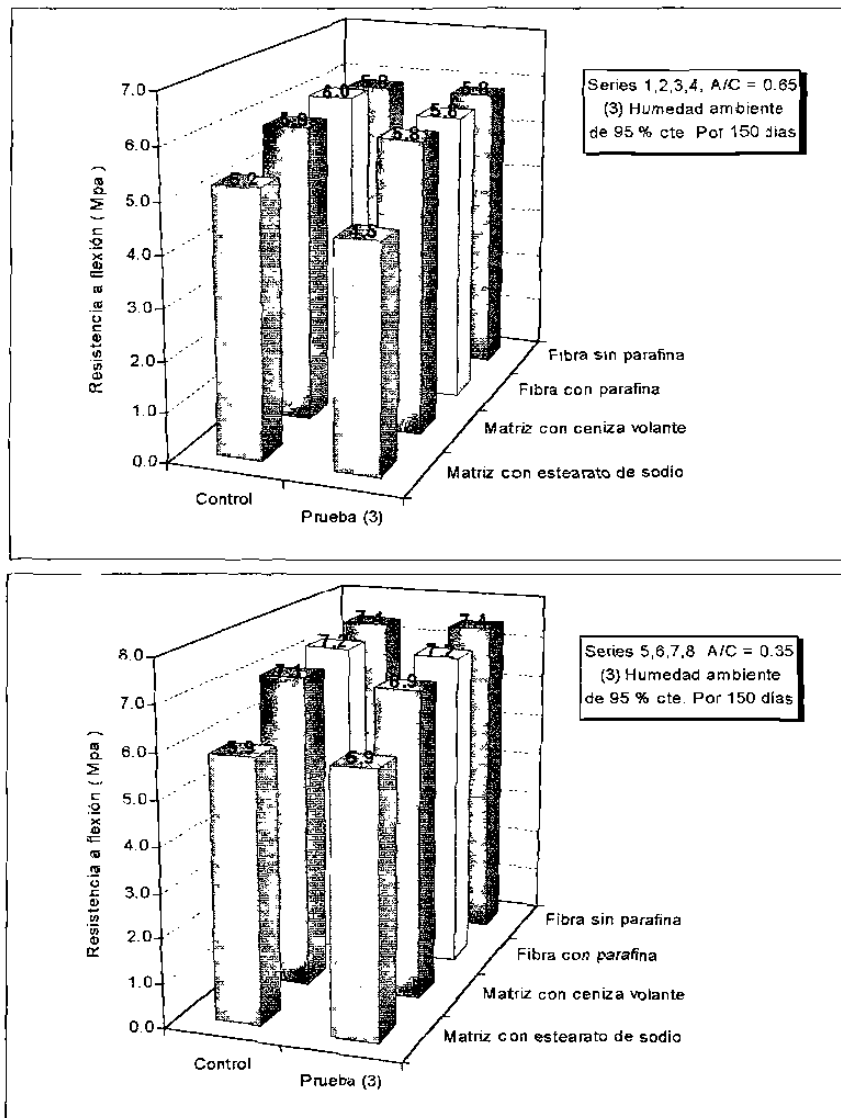


Fig. 44 Efecto de la humedad constante en la resistencia a la flexión. El efecto de ambientes estables es mínimo comparado con la exposición a otros medios, la resistencia del concreto se mantiene sin variación. En el anexo B página 156 y 157 se encuentran los datos tabulados.

Los ataques químicos se manifiestan en efectos físicos dañinos tales como un incremento en la porosidad y en la permeabilidad del concreto, en la disminución de su resistencia mecánica y en el agrietamiento y descascaramiento. En la figura 45 se indican los resultados para las pruebas 4 y 5. Para la prueba 4 que fue la exposición a los

cloruros, el concreto con ceniza volante presenta solamente una disminución del 12% aproximadamente, en comparación con los concretos con estearato de sodio y con fibra sin parafina que disminuyeron su resistencia en un 30% aproximadamente. Los concretos con fibra tratada con parafina presentan resistencias muy similares a los concretos con ceniza volante. Es posible que la reducción en la resistencia a la flexión se deba a la penetración por capilaridad de la sal en los poros del concreto mientras estuvo inmerso en la solución, al secarse los especímenes la solución se evaporó produciendo cristales de la sal los cuales pueden producir rupturas debido a la expansión que se genera dentro de la matriz de cemento [93].

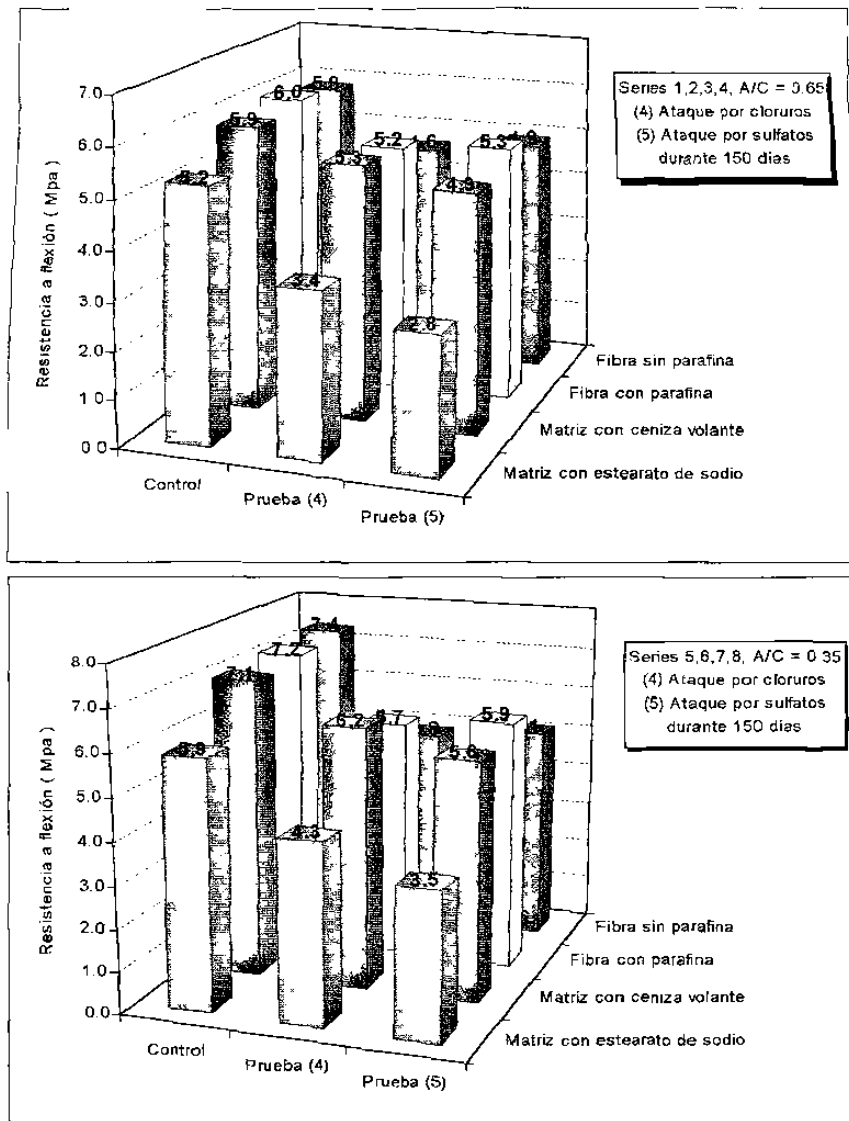
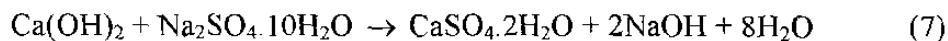


Fig. 45 Efecto del ataque químico por cloruros y sulfatos en la resistencia a la flexión. De igual forma que los resultados anteriores, los especímenes con ceniza volante redujeron el deterioro químico.

Sin embargo, el problema del concreto expuesto al agua de mar es mucho más complejo como para intentar simplificarlo con una prueba de este tipo, ya que intervienen en conjunto causas tanto químicas como físicas que deterioran al concreto. Mehta [13], sostiene que el concreto expuesto al ambiente marino puede ser deteriorado por efectos combinados, por ejemplo, la acción química producida por los constituyentes del agua marina en los productos de hidratación del cemento, de la expansión álcali-agregado, de la presión de cristalización de las sales dentro del concreto. También, por la acción del congelamiento, de la corrosión del acero de refuerzo y de la erosión física debida a la acción de las olas y de los objetos flotantes. Por lo que resulta conveniente que las pruebas se realicen tomando en cuenta estos aspectos.

El ataque de los sulfatos en los especímenes de la prueba 5 produjo una reducción en la resistencia a la flexión, del orden de la discutida para el ataque por cloruros, ver figura 45. El concreto con fibras tratadas con parafina solamente perdió el 18% de su resistencia original. Mientras que los concretos con estearato y fibra sin tratamiento perdieron el 46 y 30% de su resistencia a los 28 días, respectivamente.

De acuerdo con Neville [93], una solución de sulfato puede atacar al concreto puesto que reacciona con el hidróxido de calcio y con los hidratos de aluminato de calcio. Los productos son el yeso y el sulfatoaluminato de calcio, que tienen un volumen mucho mayor que los compuestos originales antes de reaccionar, de modo que esta reacción con los sulfatos produce expansión y ruptura del concreto. Cuando el concreto se agrieta, su permeabilidad se incrementa y el agua agresiva penetra más fácilmente a su interior, acelerando así el proceso de deterioro. Por otra parte, de la reacción química entre el Na_2SO_4 utilizado y el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente en el agua de los poros del concreto resulta en los siguientes productos:



El sulfato de calcio hidratado o yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) produce lo mencionado anteriormente, y el NaOH mantiene el sistema todavía más alcalino, ya que el pH sube hasta 13-14 lo que puede propiciar un deterioro severo en las fibras. Sin embargo, el

concreto con ceniza volante reforzado con fibras tratadas con parafina perdió menos del 20% de su resistencia original después de los 5 meses de exposición a los sulfatos.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, se puede decir que las variaciones en la humedad y temperatura y el ataque químico son las principales causas del deterioro de los concretos con fibras. En forma general, los concretos con ceniza volante reforzados con fibras tratadas con parafina resultaron con la mejor resistencia a la flexión tanto en los ciclos de humedecimiento y secado, como al ataque químico producido por los cloruros y los sulfatos, ya que al reducir las relaciones agua/cementante los concretos con ceniza volante fueron más densos e impermeables. Esto viene a confirmar la importancia de la permeabilidad del concreto en lo referente a su durabilidad.

Por otra parte, los concretos con estearato de sodio registraron los más bajos resultados, ya que para los ciclos de humedecimiento y secado su resistencia se redujo hasta 46% con respecto a su resistencia a la flexión original. Mientras que para el ataque químico la pérdida de resistencia fue de 45% aproximadamente. Estos resultados son ligeramente menores a los registrados para concretos con fibras sin tratamiento, posiblemente se deba, como ya se mencionó, a que el estearato de sodio al ser un compuesto hidrófobo altera las reacciones de hidratación del cemento, al evitar que el grano de cemento se hidrate en su totalidad, origina que los silicatos y aluminatos de las fases del cemento reaccionen en forma incompleta provocando que la matriz tenga una alta porosidad.

Finalmente, es conveniente relacionar los resultados de pruebas de deterioro acelerado como las realizadas, con resultados de especímenes expuestos a las variaciones del clima natural. Esto permitirá poder predecir con mayor confiabilidad el rango de la vida útil de elementos constructivos a partir de concretos con fibras naturales.

3.5 Interacción entre la fibra y la matriz de cemento.

Las propiedades mecánicas del concreto con fibras a nivel macro, dependen de diversos factores entre los más importantes se puede mencionar la interacción química de la fibra con la matriz alcalina del cemento, la que se ha discutido ampliamente en el desarrollo de esta investigación. Por otra parte, igualmente importantes son la adherencia y el tipo de falla que presenta la fibra después de ensayar al concreto. Coutts [90], comenta que el principal factor que controla el comportamiento del concreto con fibras, es la adherencia entre la fibra y la matriz de cemento. Sin embargo, la fibra debe ser lo suficientemente resistente para transferir en forma adecuada los esfuerzos a la matriz agrietada, mediante esfuerzos de adherencia.

3.5.1 Microestructura de la fibra expuesta al medio alcalino.

Gram [35], ha estudiado ampliamente el efecto que el medio alcalino tiene en las propiedades de la fibra de sisal. Este investigador considera que la principal causa del cambio en las características de la fibra de sisal en el concreto es el deterioro químico de la lignina y la hemicelulosa. La alcalinidad del agua en el poro del concreto disuelve a la lignina y hemicelulosa y rompe los enlaces entre las microceldas. Debido a lo anterior la fibra se fragmenta en pequeñas unidades y pierde su capacidad de reforzar al concreto. Así también, las microceldas se llenan de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y las fibras pierden su flexibilidad. De acuerdo a los resultados encontrados hasta este punto, la fibra de lechuguilla es afectada de igual manera que la fibra de sisal.

Con la finalidad de corroborar la aseveración anterior, se observó en el microscopio electrónico de barrido la microestructura de la fibra expuesta al medio alcalino durante 12 meses. Como se puede apreciar en la micrografía de la figura 46, las microceldas de la fibra no aparecen tan definidas como en la micrografía de la figura 15. También se puede observar en la zona señalada, que prácticamente las microceldas han sido saturadas, lo que puede sugerir un deterioro similar al sugerido por Gram [35]. La fibra mostrada en la micrografía de la figura 46 corresponde a fibras sin tratamiento, la cual

después de los 12 meses de exposición al medio alcalino disminuyó su resistencia a tensión en un 70%, ver figura 25. En base con lo anterior el proceso de deterioro descrito por Gram [35], bien puede ser aplicado al deterioro observado y registrado en fibras de lechuguilla.



Fig. 46 Micrografía de la sección transversal de una fibra expuesta durante 12 meses al medio alcalino. Se puede en la zona central de la fibra el deterioro de la microceldas, las cuales han sido saturadas por el $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Observando con más detalle la zona deteriorada de la fibra, ver figura 47. Se puede apreciar el deterioro de la lignina que funciona como matriz de las microceldas de celulosa, perdiendo su capacidad de mantener unidas a las microceldas debido a la hidrólisis alcalina y presentando una morfología alterada que propicia los cambios de sus propiedades físicas y mecánicas, ya discutidas. En las micrografías de las figuras 46 y 47 no se observa aún el efecto de la fragmentación de las microceldas que comenta Gram en sus estudios [35], sin embargo, si puede ser observado el inicio de la "mineralización" que este investigador encontró en fibras extraídas de concretos expuestos al ambiente durante 9 años, en Estocolmo, Suecia. Gram define la mineralización de la fibra como el proceso de deterioro debido al ataque alcalino.

Por otra parte, la fibra de lechuguilla tiene un comportamiento muy similar a la fibra estudiada por Gram, La respuesta al ataque alcalino de ambas fibras es muy semejante y, por consiguiente, las medidas para proteger a la fibra de sisal bien pueden ser aplicadas a la protección de la fibra de lechuguilla.

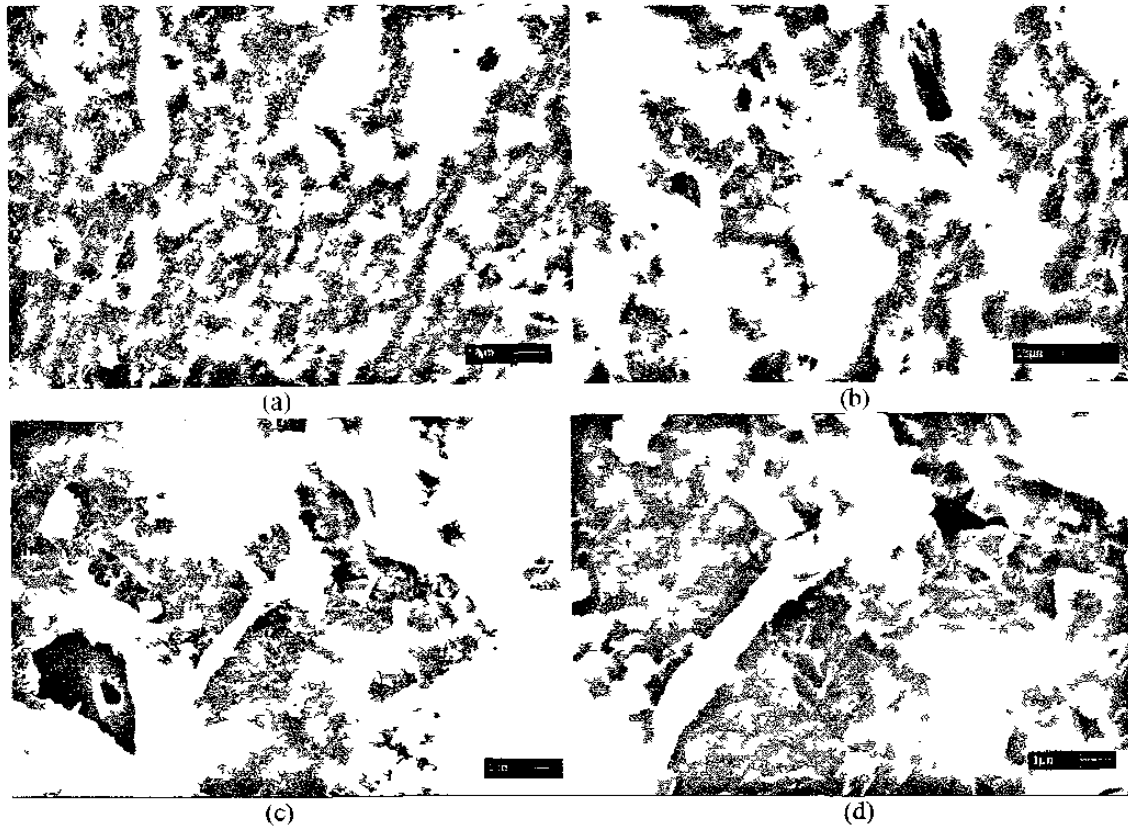


Fig. 47 Micrografías a detalle de la sección transversal de fibra "mineralizada". Se puede observar que la microestructura de la fibra ha sido alterada por el medio alcalino, perdiendo sus propiedades de refuerzo.

3.5.2 Morfología de la interfase fibra - matriz de cemento.

Según Coutts [90], la interfase que es la región de íntimo contacto entre la fibra y la matriz, tiene como función principal el transmitir los esfuerzos entre las dos fases. La adherencia interfacial puede tener una naturaleza por sí misma química o física, o una combinación de ambas. Es así como el comportamiento mecánico del concreto con fibras está relacionado directamente con la naturaleza y las propiedades de la interfase fibra-matriz.

Se han realizado algunos estudios para tratar de incrementar la adherencia química entre la fibra y la matriz de cemento. Coutts [90], comenta que se han probado como tratamientos en fibras de celulosa compuestos con base de titanio y zirconio, sin embargo, solamente se obtuvieron algunas mejoras en el comportamiento mecánico de estos concretos y el costo resultó prohibitivo. Coutts sostiene que la adherencia química entre la fibra y la matriz puede darse debido a la presencia de grupos hidroxilos en la superficie tanto de la fibra como del cemento, suficientes para propiciar una adecuada

interacción química por medio de enlaces de hidrógeno. Otra forma de incrementar la adherencia de la fibra en la matriz es mediante tratamiento físico-mecánicos que incrementa la energía de fricción en la interfase. Esto puede ser obtenido mediante la formación de fibrillas superficiales producidas por la acción mecánica de friccionar externamente a la fibra. En la figura 48 se puede observar la imagen de una fibra con el tratamiento físico-mecánico mencionado.



Fig. 48 Fibrillas superficiales producidas por fricción externa en la fibra. La función principal de las fibrillas, consiste en proporcionar mayor área de contacto con la matriz de cemento e incrementar los esfuerzos de adherencia.

El efecto que se produce puede ser explicado desde el punto de vista de anclaje mecánico, en donde las fibrillas forman puntos adicionales de anclaje que permiten a las fibras tomar los esfuerzos de la matriz y reforzar mejor al concreto. En la figura 49 se observa la superficie de una fibra sin haber recibido el tratamiento físico-mecánico.

Por microscopía óptica se observó la morfología de la interfase fibra-matriz de cemento de los especímenes fabricados y ensayados para la sección 3.4, mediante un estereoscopio con aumento de 100X. En la figura 50 se observa la interfase fibra-matriz de concretos con estearato de sodio y relación A/C = 0.65. En la cual se puede apreciar la relativamente alta porosidad de la matriz alrededor



Fig. 49 Micrografía de una fibra sin tratamiento físico-mecánico

de la fibra y una pobre adherencia en la interfase, debido al comportamiento hidrófobo del estearato. Se observa en la fotografía (a), la fibra cubierta por los productos de hidratación, mientras que en la fotografía (b) se puede observar la pérdida de adherencia debido a la expansión y contracción de la fibra comunes en un medio húmedo.

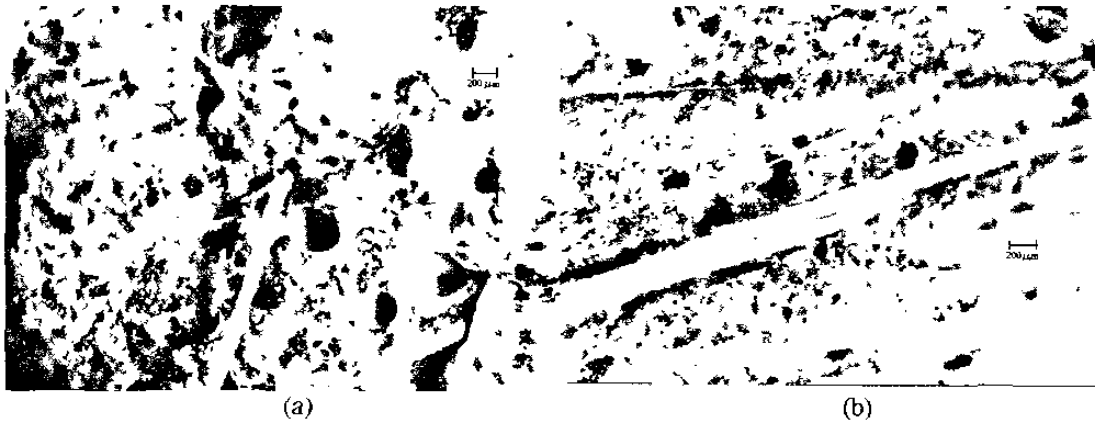


Fig. 50 Interfase fibra-matriz en concretos con estearato de sodio. En donde se puede apreciar que la acción hidrófoba del estearato provoca una alta porosidad de la matriz y pobre adherencia con la fibra.

Como se puede observar en la figura 50 el modo de falla dominante fue por extracción debido a la insuficiente adherencia. Es posible que este comportamiento en la interfase originó la baja resistencia que registraron los concretos con estearato de sodio discutidos en la sección 3.4. Por otra parte, en la figura 51 se puede observar la interfase de concretos con ceniza volante y relación agua/cementante = 0.40. La matriz presenta menos porosidad que la mostrada en la figura 50, además, las fibras muestran ductilidad, lo que indica que todavía no han sido deterioradas por el medio alcalino. Se puede observar que la adherencia entre la matriz y la fibra es mejor, sin embargo, aún se puede observar que los cambios volumétricos de la fibra afectaron la interfase con la matriz de cemento.

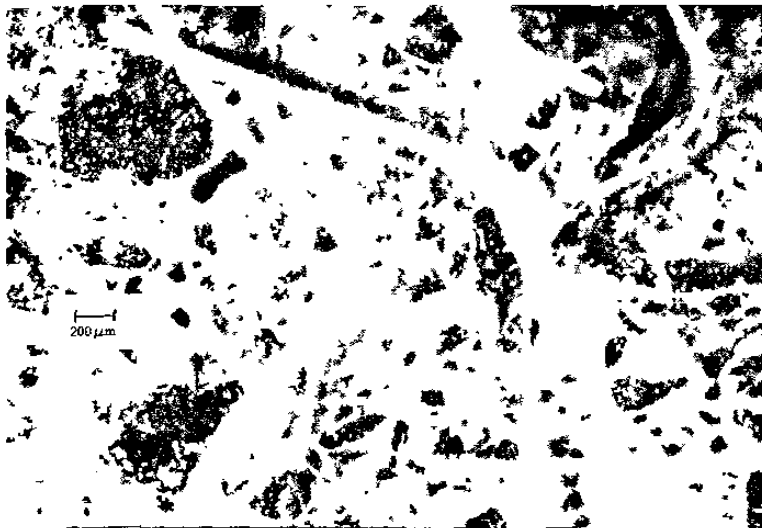


Fig. 51 Interfase fibra-matriz en concretos con ceniza volante. Se puede observar una matriz más densa y las fibras aún conservan su flexibilidad.

También se observó el

efecto que tuvieron las variaciones de la humedad y temperatura en la interfase fibra-matriz. En la figura 52 se muestran para comparación la interfase de fibras tratadas con parafina (a), (b) y fibras sin tratamiento (c), (d). En las fotografías (b) y (d) se puede observar los efectos de los ciclos de humedecimiento y secado, en donde invariablemente la fibra da indicios de fragilidad principalmente la fibra sin tratamiento. También, el efecto de la expansión y contracción debido a las variaciones de humedad es todavía más señalado. Las matrices de estos concretos fueran fabricadas con relación $A/C = 0.35$, de tal manera, que presentan menos porosidad que las anteriores.

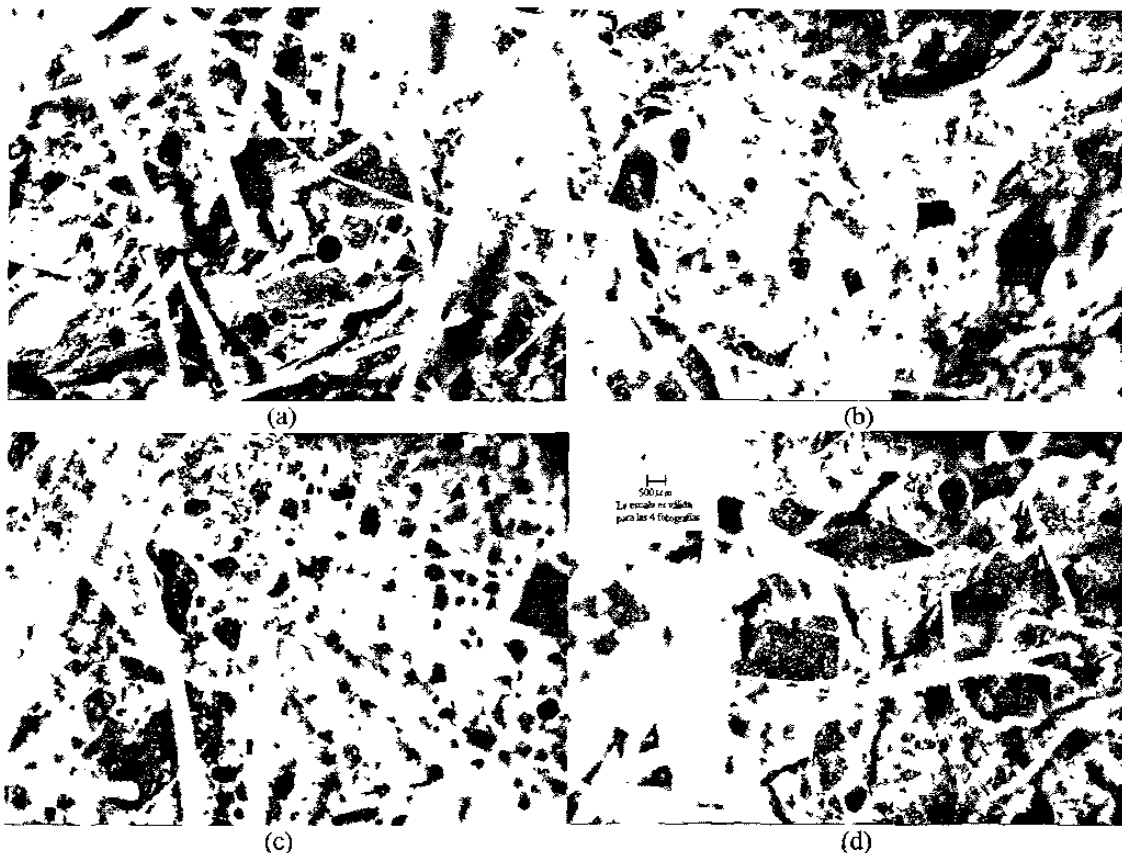


Fig. 52 Interfase fibra-matriz en concretos con fibra tratada (a), (b) y sin tratamiento (c), (d) sometidos a ciclos de humedecimiento y secado. En la figura (d) se observa lo crítico que resultan las variaciones en la humedad para este tipo de compuestos, ya que la fibra pierde flexibilidad y se fragmenta en pequeñas piezas.

En ambos casos es característico el cambio de color en las fibras, producto de la hidrólisis alcalina. En los concretos sometidos a ciclos de humedad y temperatura se puede observar la pérdida de adherencia de la fibra con la matriz alrededor de ella. Pueden medirse separaciones entre fibra y matriz de algunas micras, esto ocasiona una considerable reducción en la resistencia mecánica del concreto.

Durante la estancia en Alemania, se tuvo la oportunidad de estudiar la interfase de los concretos fabricados para la sección 3.3.3. En la figura 53 se muestran las fotografías de la interfase entre el concreto con relación A/C = 0.50 y fibras tratadas mecánicamente por medio de fricción, ver figura 48, y tratadas químicamente con Na_2SO_4 . Puede observarse que la porosidad del concreto es relativamente baja y que la fibra muestra una buena adherencia con la matriz que la rodea, ya que no se aprecia separación entre ellas. Es posible que con la acción conjunta del tratamiento químico y mecánico mejoraran los resultados referentes a la adherencia.



Fig. 53 Interfase fibra-matriz en concretos con fibra tratada química y mecánicamente. Se observa relativamente baja porosidad y mejor adherencia fibra-matriz, posiblemente la acción conjunta del tratamiento químico y mecánico mejoró la microestructura de la interfase.

Se han realizado algunos estudios acerca de los cambios de la morfología en la superficie de fractura y en la microestructura de la interfase cuando el concreto se expone a ciertos ambientes. Bentur [97,98,99], discute que los principales modos de falla de la fibra fueron por extracción debido a la pérdida de adherencia, en donde la matriz alrededor de la fibra era relativamente porosa. Este tipo de falla se presentó para especímenes con fibras cortas, sin embargo, para concretos con estearato de sodio se observó una matriz porosa y pérdida de adherencia, aún con fibras largas de 300 mm. Por otra parte, Bentur concluye que para especímenes que fueron sometidos a pruebas aceleradas en ambiente normal, el modo de falla de la fibra fue frágil y muy cercano al plano de fractura. Este modo de falla se puede observar en la figura 52(d) para las fibras que fueron sometidas a ciclos de humedecimiento y secado, también pueden ser observadas pequeñas separaciones entre la fibra y la matriz circundante debido posiblemente a la contracción de la matriz y las fibras, inducida durante los ciclos. Esto sugiere que la fibra pudo perder su resistencia debido al deterioro físico por los cambios

volumétricos que sufrió y, consecuentemente, se traduce en una reducción considerable de la resistencia y tenacidad del concreto.

Akers por su parte, ha trabajado en estudios micromecánicos de concretos con fibra [100,101,102], en los cuales sostiene que el modo de falla de los concretos con fibra consiste de una compleja combinación de múltiple agrietamiento, pérdida de adherencia, redistribución de los esfuerzos en grietas secundarias. También sugiere que la adherencia interfacial fibra-matriz se incrementa durante el proceso de maduración debido a la edad del concreto. Sin embargo, los resultados de la presente investigación sugieren que cuando el concreto con fibras es expuesto a un medio que propicie el deterioro de las fibras, la adherencia interfacial no se incrementa, si no al contrario, en algunos casos tiende a disminuir. En las pruebas de la sección 3.3.1 se notó un incremento en la resistencia de especímenes con 10 meses de edad, con respecto a los de 14 días, sin embargo, este incremento puede deberse principalmente al efecto de la humedad en las reacciones de hidratación del concreto. En lugar de un posible incremento originado por la adherencia interfacial fibra-matriz.

En lo concerniente a la interfase entre la fibra tratada química y mecánicamente con la matriz de concreto, los resultados de especímenes expuestos al ambiente del laboratorio indican una adecuada adherencia, sin embargo, Coutts [103,104,105] comenta que la adherencia interfacial puede ser afectada por diversas variables tal como la relación A/C, porosidad, la morfología de la fibra y la compactación. Los procedimientos utilizados para fabricar los concretos con fibra tratada químicamente pudieron influir mejorando la compactación y reduciendo la porosidad del concreto. Sin embargo, es necesario tener resultados de especímenes sometidos a pruebas aceleradas o bien, a ciclos de humedecimiento y secado para evaluar si el tratamiento químico y mecánico representa una mejora sustancial en la durabilidad de la fibra y, por consiguiente, del concreto. Finalmente, los resultados indican que matriz porosas con altas relaciones A/C (mayor a 0.60), no proporcionan la protección suficiente a la fibra aunque ésta sea tratada con el agente protector. Por otra parte, las matrices de cemento se pueden densificar agregando partículas finas tal como la ceniza volante, lo que reduce la relación A/C y de acuerdo a los resultados encontrados, esto es la mejor manera de proteger a la fibra y proporcionarle durabilidad al compuesto.

3.6 Elementos constructivos.

El concreto reforzado con fibras naturales está siendo utilizado en varios países como material de construcción. Su importancia radica en reducir los costos de construcción y ahorrar la energía consumida en la producción de otros tipos de fibras. Además, puede ser utilizado como posible sustituto del asbesto-cemento el que ha dejado de utilizarse por relacionarlo a enfermedades como la asbestosis. Swamy [4], comenta que es necesario que cada país desarrolle sus materiales de construcción y que puedan tenerlos disponibles localmente, y enfatiza que mejorar la calidad de los productos y entender como estos materiales constructivos se comportan en ambientes reales no puede ser pasado por alto.

De esta forma, se fabricaron en la presente investigación algunos posibles elementos constructivos que pueden tener una aplicación directa en la industria de la construcción. Esto no significa que sean los únicos tipos de materiales de construcción que puedan ser fabricados con el concreto con fibras, al contrario, el campo de aplicación es amplio como se ha demostrado en países como la India [106], Zambia [29], etc.

Robles, Pama y Valls [107], recomiendan el uso de las fibras naturales para producir materiales de construcción que mejoren la calidad de vida de las personas que habitan las áreas rurales de diversos países. En esta dirección, se piensa que los materiales de construcción fabricados durante la presente investigación pueden ofrecer una alternativa viable para reducir costos en la construcción, además de representar una posible fuente de ingresos para las personas que sobreviven del tallado de la fibra de lechuguilla.

3.6.1 Bóvedas como aligerante para losas.

Este tipo de material para construcción ya ha sido propuesto en Alemania por Schafer y Brunssen [76], ellos sugieren el uso de las bóvedas como aligerante y cimbra perdida para losas, por su capacidad de carga y la facilidad en la técnica de producción. Han realizado ensayos en sus bóvedas encontrando que soportan 7 kN como carga concentrada, lo que según ellos garantiza un alto factor de seguridad durante el proceso

de colado de la losa. En México la construcción mediante el sistema de vigueta y bovedilla se ha popularizado para solucionar losas estructurales apoyadas en una dirección. Las viguetas son elementos de concreto, cuyas dimensiones son generalmente de 150 a 200 mm de ancho y 80 a 100 mm de peralte, las viguetas tienen embebido parcialmente al acero de refuerzo el cual es de alta resistencia. La separación entre las viguetas es de 600 mm y dan soporte a las bovedillas que se utilizan como aligerante y cimbra pérdida. La bovedilla es de mampostería cuyo peso es de aproximadamente 15 kg y se necesitan 5 de ellas para cubrir 1 m de longitud. Sus dimensiones son variables dependiendo del espesor de la losa. Este sistema normalmente cubren claros de hasta 3.00 m, y para evitar una deflexión excesiva usualmente se requiere colocar un apoyo intermedio que puede ser un puntal de madera. En la figura 54 se observa las viguetas y al frente se muestran las bóvedas de concreto con fibras fabricadas en este proyecto, mientras que al fondo se puede apreciar la bovedilla tradicional.

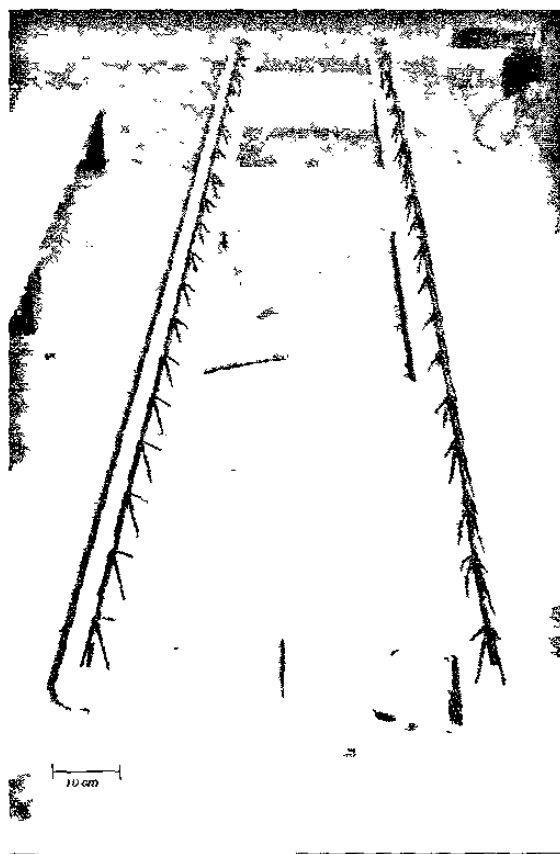


Fig. 54 Sistema vigueta y bovedilla. al frente se muestra la bóveda de concreto con fibras. El uso de la bóveda de concreto fibras permitirá reducir el peso del aligerante en 80% por m^2 de losa, lo que incrementará la rapidez del cimbrado.

La sustitución de la bovedilla tradicional por la bóveda de concreto con fibras tiene las siguientes ventajas, el peso del material, ya que la bóveda pesa aproximadamente 10 kg y cubre un área de 600x600 mm. Esto representa que la bóveda tiene un peso/m² de 28 kg, mientras que la bovedilla tradicional tiene un peso/m² de 125 kg lo que representa una disminución del peso/m² de un 80 %. Otra ventaja es la rapidez de la colocación, por ejemplo, para una losa típica con una supuesta área de 20 m² se requieren aproximadamente 50 bóvedas, mientras que se necesitan 160 bovedillas tradicionales para la misma área, lo que representa una cantidad considerable de trabajo siendo necesario aumentar la mano de obra, lo que encarece la construcción. Por otra parte, la bóveda está diseñada con materiales económicos como la ceniza volante y la fibra natural, por lo que para una resistencia adecuada con una relación agua/cementante de 0.40 el consumo de cemento no se incrementa, esto representa un ahorro ya que el cemento es el material que más impacta en el costo total.

3.6.2 Placas acanaladas.

Las placas acanaladas más comunes fueron hasta hace algunos años las de asbesto-cemento, actualmente se han realizado algunos desarrollos probando fibras de polipropileno y celulosa en Dinamarca e Inglaterra [48,108] como posibles alternativas. Parry y asociados [75], sostienen que uno de los más importantes aspectos en la industria de la construcción de países en desarrollo es producir y aplicar materiales para techos que sean durables y baratos. Las placas acanaladas de concreto con fibras pueden usarse para la construcción de techos de bajo costo, las placas pueden ser fácilmente fabricadas y producidas a escala comercial impulsando la construcción en los países en desarrollo. Swift, Smith [15], han trabajado en Kenia fabricando placas acanaladas de concreto con fibras que soportan 180 kg a la primera grieta y falla con múltiple agrietamiento con cargas mayores a 200 kg.

A diferencia de las bóvedas en donde la durabilidad no es crítica debido a que es un elemento no estructural y que sólo resiste cargas durante la construcción de la losa. Las placas acanaladas deben satisfacer condiciones de durabilidad para que sean una alternativa real para sustituir al asbesto-cemento. En la presente investigación se fabricaron placas acanaladas de concreto con fibras de 2000x1000x10 mm, con la

finalidad de probar las técnicas sugeridas por algunos investigadores [15,19,36,75], y ver la factibilidad de su aplicación en México. En la figura 55 se observa una placa acanalada fabricada de acuerdo al método sugerido por Parry [75]. En este método la mezcla húmeda de concreto con fibras se coloca sobre una cimbra rectangular plana con el espesor de 10 mm, la interfase entre la mezcla y el fondo de la cimbra es un plástico que evita la adherencia entre ellos. Posteriormente, usando este plástico de la interfase se traslada la mezcla húmeda a una placa acanalada comercial de asbesto o de acero. La mezcla en estado plástico tomará la curvatura de su nueva cimbra prosiguiendo con el curado, después de 2 días de curado puede ser descimbrada y trasladada en forma manual.

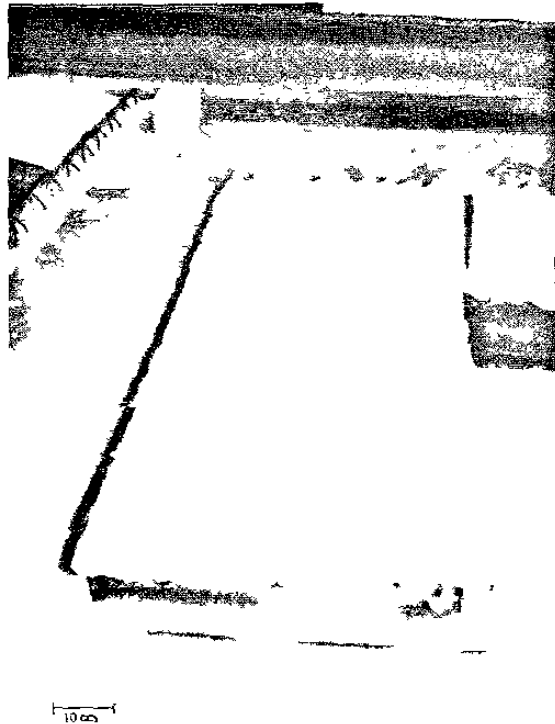


Fig. 55 Placa acanalada de concreto reforzado con fibras de lechuguilla. Estas placas acanaladas están proyectadas para sustituir a las placas de asbesto-cemento en la construcción de techos en viviendas de bajo costo.

3.6.3 Placas planas como cimbra perdida para puentes y edificios.

Es escasa la información acerca de placas planas de concreto con fibras naturales. Un material similar puede ser los paneles de yeso reforzado con fibras de sisal o plásticas que son ampliamente usados en Europa y Estados Unidos [11]. La aplicación de las

placas planas de concretos con fibras es similar a la descrita para las bóvedas en donde la placa queda embebida en la losa de los puentes o del edificio. Su principal función es la de resistir las cargas propias de la construcción antes del colado y de soportar al concreto en estado fresco. Una vez endurecido el concreto de la losa principal, la placa con fibras es relevada de los esfuerzos. Esto representa un ahorro económico ya que actualmente se utilizan placas pretensadas como cimbra perdida en puentes y para los edificios las placas se refuerzan con malla de acero. En ambos casos el costo del refuerzo es considerablemente mayor que el ocasionado por las fibras. Las placas fabricadas tuvieron las siguientes dimensiones 1200x600x40 mm, cada placa tiene un peso aproximado de 50 kg lo que es manejable entre 2 personas. Al igual que con las bóvedas se utilizó ceniza volante para incrementar su relación agua/cementante sin aumentar la cantidad de cemento, lo que mantiene al producto con una adecuada resistencia y bajo costo. En la figura 56 se pueden observar las placas fabricadas durante esta investigación.

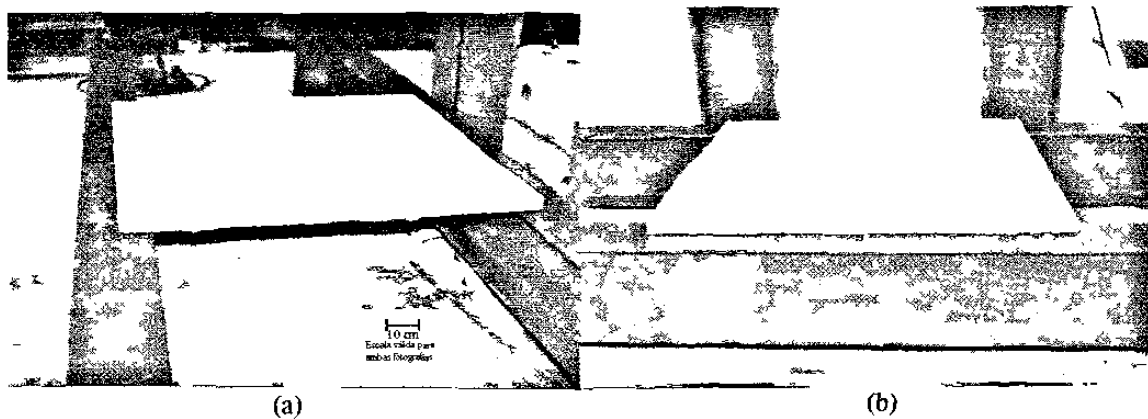


Fig. 56 Placas planas de concreto con fibras. Las placas pueden tener aplicación en la construcción de edificios y puentes, donde sea deseable la acción compuesta viga-losa.

A excepción de las placas acanaladas, las aplicaciones propuestas tanto para las bóvedas como para las placas planas son de un elemento estructural secundario. Los principales esfuerzos que deben soportar estos elementos son la contracción por secado, los cambios de volumen por la temperatura y los producidos por las cargas propias durante la etapa de construcción las cuales pueden ser de impacto. De acuerdo con Shah [109] y Naaman [110] el concreto con fibras tiene una alta resistencia a las cargas de impacto debido a su capacidad de absorber energía o tenacidad. La exposición al

ambiente natural que tienen estos elementos es mínima, y el problema de durabilidad no es tan crítico ya que se encuentran protegidos por la estructura principal. Sin embargo, la aplicación del concreto con fibras naturales puede ser más amplia, por ejemplo, en la construcción y reparación masiva con concreto, en el concreto lanzado y prefabricados. Los elementos constructivos fabricados para esta investigación tuvieron una relación $A/C = 0.65$, pero al usar ceniza volante la relación agua/cementante fue de 0.40, esto proporciona resistencia y economía a la vez. No fue posible realizar pruebas mecánicas y de durabilidad a los elementos constructivos fabricados. Sin embargo, quedó el precedente de la factibilidad de producir este tipo de materiales de construcción.

Se han realizado algunos estudios donde se compara los costos de producción entre placas acanaladas de concreto con fibras naturales y placas de asbesto-cemento [29], en esta parte de la investigación no se consideró necesario realizar una comparativa económica de este tipo, ya que es conveniente seguir trabajando en lo referente a la durabilidad de la fibra. Al resolver este aspecto, una comparativa de costos no sólo con el asbesto sino también con los otros tipos de fibras resultaría prioritario.

El objetivo principal mencionado en el capítulo 1 de ofrecer una alternativa pertinente y factible para el desarrollo de la infraestructura y la vivienda en las comunidades de las zonas áridas y semiáridas del país, mediante la aplicación del concreto con fibras de lechuguilla, se trató de cumplir con las propuestas presentadas en esta sección. Sin embargo, son necesarios esfuerzos adicionales para mejorar aún más la durabilidad de elementos constructivos expuestos al ambiente natural.

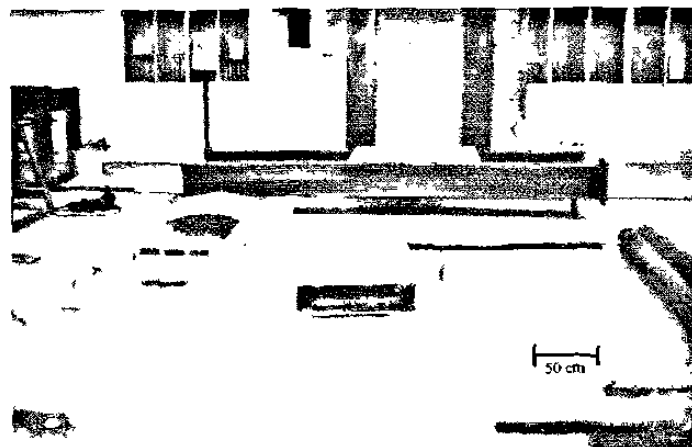


Fig. 57 Vista general de los elementos constructivos fabricados en la presente investigación, colocados en el área de la losa de reacción del Instituto de Ingeniería Civil, FIC, UANL.

Capítulo 4

CONCLUSIONES

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES

Los aspectos más relevantes que se desprenden de esta investigación, son la comprobación de que los concretos reforzados con fibras naturales de lechuguilla tienen el potencial para ser usados como materiales de construcción económicos, y que es necesario seguir investigando para asegurar una vida útil apropiada de estos nuevos materiales en México. A continuación se presentan las principales conclusiones del trabajo de investigación realizado.

En el primer objetivo se estableció producir un material compuesto a base de concreto y fibras naturales de lechuguilla que posea propiedades mecánicas adecuadas para ser utilizado como elemento constructivo.

1. Las fibras de lechuguilla tienen las propiedades físico mecánicas, tal como su resistencia última a la tensión y su flexibilidad, que les permite ser consideradas como posible refuerzo en el concreto.
2. El tratamiento protector con parafina, le permite a la fibra 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. Las fibras largas tratadas con parafina y con 0.5% en volumen del concreto, tienen la capacidad para soportar mayores cargas de tensión y flexión en comparación con el concreto simple.
4. La fibra de lechuguilla permite un comportamiento dúctil del concreto después del agrietamiento de la matriz.

El segundo objetivo buscó obtener un concreto reforzado con fibras naturales que fuera resistente a las variaciones de humedad y temperatura, así como, a la exposición a los ambientes agresivos.

5. La resistencia inicial del concreto con fibras disminuye cuando se expone tanto a ciclos de humedecimiento y secado, como a los ambientes agresivos de cloruros y sulfatos.
6. El ambiente estable sin cambios de humedad y temperatura no afecta al concreto con fibras.
7. La ceniza volante agregada a la mezcla produce una matriz más densa e impermeable, lo que minimiza el efecto de las pruebas de deterioro acelerado en el concreto.
8. El concreto con ceniza volante reforzado con fibras tratadas con parafina, es viable para fabricar elementos constructivos resistentes al ambiente natural.

El tercer objetivo pretendió ofrecer una alternativa pertinente y factible para el desarrollo de la vivienda en las comunidades de las zonas áridas y semiáridas del país, mediante la aplicación de este material compuesto.

9. Si la fibra se protege con parafina y se utiliza ceniza volante en la mezcla del concreto, este material compuesto puede ser aplicado en la fabricación de elementos constructivos, tales como láminas acanaladas para las viviendas rurales, prefabricados para aplicaciones arquitectónicas o bien como cimbras perdidas.
 10. Es necesario mejorar aún más la durabilidad del concreto con fibras para que sea viable en el desarrollo de la infraestructura en las zonas rurales, tal como tuberías, tanques de almacenamiento y caminos.
-

Capítulo 5

SUGERENCIAS DE INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO 5

5. SUGERENCIAS DE INVESTIGACIÓN

La investigación del concreto reforzado con fibras naturales de lechuguilla no concluye con esta tesis, al contrario, el presente proyecto proporciona el fundamento para investigaciones futuras sobre el tema estudiado. Es necesario esforzarse aún más para poder llegar a obtener los resultados esperados en lo referente a la durabilidad. Con esto en mente y tratando de dar respuesta a interrogantes que surgieron durante el desarrollo de este proyecto, se hacen las siguientes recomendaciones de investigación:

1. Investigar la durabilidad de la fibra de lechuguilla sometida al medio alcalino del concreto y a pruebas de deterioro acelerado, cuando es tratada con agentes protectores, tales como polímeros. Se han realizado pruebas preliminares de absorción de agua en fibras recubiertas con alcohol polivinílico, y se ha conseguido reducir el porcentaje de absorción a 50% respecto al peso seco de la fibra. Lo que resulta alentador, ya que la parafina sólo redujo la absorción de agua en 61%.
 2. Investigar la durabilidad de concretos con fibras cuando son expuestos al ambiente natural a largo plazo en lugares con diversidad de climas, y relacionar sus resultados con los obtenidos en las pruebas de deterioro acelerado.
 3. Investigar las propiedades mecánicas de tenacidad e impacto de los concretos con fibras naturales.
 4. Investigar las propiedades dinámicas de los concretos con fibras naturales para su aplicación en estructuras sismorresistentes.
-
-
-