

22  
29



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE  
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO REFORZADO  
CON FIBRA DE ACERO

T E S I S

Que para obtener el título de :

INGENIERO CIVIL

presenta

JULIAN BOYAS DELGADO



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D.F.

JULIO 1991



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## INDICE

### CAPITULOS

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.  | INTRODUCCION.....   | 1  |
| 2.  | CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS DE ACERO Y<br>PROPORCIONAMIENTOS TÍPICOS.....   | 3  |
| 2.1 | Características de las fibras.....  | 3  |
| 2.2 | Proporcionamientos típicos del concreto<br>reforzado con fibras de acero..... | 7  |
| 3.  | DESCRIPCION DE LOS ENSAYES EN CONCRETO<br>REFORZADO CON FIBRA DE ACERO.....   | 10 |
| 3.1 | Prueba del revenimiento.....  | 10 |
| 3.2 | Prueba del cono de revenimiento inverso.....                                  | 11 |
| 3.3 | Prueba Ve Be.....   | 12 |
| 3.4 | Prueba del peso volumétrico.....  | 13 |
| 3.5 | Resistencia a compresión.....   | 14 |
| 3.6 | Módulo de elasticidad.....  | 15 |
| 3.7 | Resistencia a tensión por flexión.....  | 16 |
| 3.8 | Tenacidad.....  | 17 |
| 3.9 | Contracción por secado.....   | 17 |
| 4.  | DESCRIPCION DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.....                                     | 20 |
| 4.1 | Materiales componentes.....   | 20 |
| 4.2 | Proporcionamiento.....  | 21 |
| 4.3 | Procedimiento de mezclado.....  | 22 |
| 4.4 | Pruebas realizadas al concreto con<br>fibras de acero en estado fresco.....   | 22 |
| 4.5 | Pruebas realizadas al concreto con<br>fibras de acero estado endurecido.....  | 24 |
| 5.  | EVALUACION DE LOS RESULTADOS DE ENSAYE.....                                   | 28 |
| 5.1 | Concreto en estado fresco.....  | 28 |
| 5.2 | Concreto en estado endurecido.....  | 29 |

|     |   |           |
|-----|---|-----------|
| 6.  | <b>APLICACIONES DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRA.....</b> | <b>32</b> |
| 6.1 | Estructuras Hidráulicas.....                              | 32        |
| 6.2 | Pavimentos.....   | 33        |
| 6.3 | Aplicaciones estructurales.....                           | 34        |
| 6.4 | Concreto lanzado.....                                     | 35        |
| 6.5 | Concreto refractario.....                                 | 37        |
| 7.  | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>                | <b>38</b> |
|     | <b>REFERENCIAS.....</b>                                   | <b>40</b> |
|     | <b>TABLAS Y FIGURAS</b>                                   |           |

" LA UNICA JUSTIFICACION QUE TIENE EL HOMBRE  
ANTE LA MUERTE ES EL TRABAJO BIEN HECHO, CON  
HONRADEZ Y HUMILDAD "

HEMINGWAY

A LA MEMORIA DE MI PADRE  
Sr. GABRIEL BOYAS C

A MI MADRE. Sra. AGUSTINA DELGADO C  
CON ADMIRACION Y RESPETO. POR HABERME  
DADO SIMPRE LA TERNURA QUE SIRVE DE  
ALICIENTE PARA HACER MEJOR LAS COSAS,  
POR QUE JUNTOS SUPERAMOS ETAPAS DIFI-  
CILES DE LA VIDA, HOY CULMINAMOS UNA  
MAS GRACIAS A TI MAMA.

TAMBIEN UNA DEDICATORIA CON MUCHO  
CARIÑO EN MEMORIA DE MI ABUELITA  
QUE DEDICO PARTE DE SU VIDA A MI  
EDUCACION, NUNCA TE OLVIDARE.

**A MIS HEMANOS. PABLO Y GUILLERMO  
POR SU CONSTANTE APOYO MORAL Y  
SU ESFUERZO INCONDICIONAL. GRACIAS  
A USTEDES PUDE CONCLUIR MI CARRERA  
Y ASI DARLE JUNTOS UNA GRAN SATIS-  
FACCION A NUESTROS PADRES.**

**CON MUCHO CARIÑO Y AGRADECIMIENTO  
A MIS CUÑADAS HORTENCIA Y SILVIA.  
POR SU APOYO Y LAS ATENCIONES QUE  
SIEMPRE HAN TENIDO HACIA MI PER-  
SONA, MUCHAS GRACIAS.**

**A MIS SOBRINOS QUE LOS QUIERO MUCHO.**

**GABRIEL  
ROCIO  
IRMA  
GUILLERMO  
ERIC  
NANCY  
VICTOR**

A MIS TIOS. POR QUE NUNCA CESARON  
EN BRINDARME SU APOYO MORAL GRACIAS  
A TODOS.

A TODOS MIS PRIMOS.

QUIERO AGRADECER SU AMISTAD Y APOYO INCONDICIONAL  
A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS ARTURO ALCARAZ C,  
ARIEL ARENAS P, J. CESAR ARZATE S, OSCAR VICENTE,  
ANTONIO LAGUNAS, FIDEL MARTINEZ.

Y A TODOS MIS AMIGOS.  
YA QUE SABEN POR QUE LOS LLAMO ASI.

## RECONOCIMIENTO

Quiero hacer patente mi agradecimiento y admiración al Ing. Mario A. Montero Catalán, por la acertada dirección y los conocimientos transmitidos, consejos y múltiples facilidades que desinteresadamente me brindó durante la elaboración de esta tesis. Demostrando siempre su gran calidad humana y su alta capacidad de investigador.

También deseo hacer un reconocimiento por su colaboración en el proyecto, y la ayuda que me brindaron las siguientes personas: Ing. Alberto Fuentes G, Concepción Hernández, José Rosales y Francisco Reyes.

Al Dr Mario Zermeño de León por su apoyo y consejos brindados durante mi estancia en el instituto de ingeniería.



## 1. INTRODUCCION

El concreto reforzado con fibras, es aquél que se prepara con cementos hidráulicos, agregados de diversos tamaños ( fino y grueso ), y fibras cortas separadas que constituyen el refuerzo.

La idea de reforzar con fibras, materiales de construcción relativamente quebradizos, se conoce y practica desde la antigüedad. Las chozas de barro construidas con arcilla cocida reforzada con paja y el mortero de mampostería reforzado con pelo animal, son ejemplos típicos que datan de muchos años atrás.

El desarrollo y uso de fibras artificiales en matrices cementantes se remonta hasta el final del siglo XIX, cuando por primera vez se produjo asbesto-cemento. El empleo de fibras cortas de acero, como refuerzo de concretos hidráulicos, se ha venido desarrollando a partir de 1964.

Actualmente, las fibras que han encontrado mayor campo de aplicación, después de las de asbesto, son las de acero y las de propileno, en concretos, y las de vidrio en aplicaciones de morteros de cemento portland de sección delgada.

Independientemente de la naturaleza de las fibras, el principio básico, consiste en mejorar las propiedades de una matriz débil y quebradiza, mediante la adición de fibras que no solamente aumentan la resistencia a la tensión sino que disminuyen la fragilidad de la matriz y producen un material más flexible.

Puesto que las pastas de cemento, mortero y concreto son de materiales quebradizos que presentan una baja resistencia a tensión, es de esperarse que las fibras constituyan un método conveniente, práctico y económico de superar estas deficiencias,

particularmente en aplicaciones donde el refuerzo convencional con barras de acero, resulte inapropiado.

Las propiedades mecánicas de los concretos reforzados con fibras difieren notablemente de las propiedades de los concretos simples. Estas propiedades dependen del volumen de fibra, la geometría y la orientación de la fibra, la adherencia entre la fibra y la matriz, la distribución de fibras, los proporcionamientos de la mezcla, el tamaño, la forma, y el volumen del agregado grueso y los métodos de mezclado y compactación.

Las propiedades de los concretos reforzados con fibras de acero se han venido estudiando desde finales de la década de los años cincuenta, sin embargo, actualmente no es posible decir que se conozca plenamente el comportamiento mecánico del concreto fibroso, por esta razón, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, se han realizado diversos estudios experimentales tendientes a determinar el comportamiento de este tipo de concreto.

En este trabajo se presenta un estudio experimental realizado en el mencionado instituto, en donde se utilizó un solo tipo de fibra, variando los porcentajes volumétricos de la misma de 0% a 1.8%; este estudio se describe con detalle en los capítulos 4 y 5. También se comentan los resultados obtenidos en estudios experimentales realizados en otras partes del mundo, y se mencionan, en el capítulo 6, las aplicaciones a gran escala que ha tenido el concreto reforzado con fibras de acero. En el capítulo 2 se describen las características geométricas y mecánicas de las fibras de acero, y en el capítulo 3 se describen brevemente las pruebas que se llevaron a cabo en el estudio experimental.

## 2. CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS DE ACERO Y PROPORCIONAMIENTOS TIPICOS

### 2.1 Características de las fibras

Las primeras fibras de acero se produjeron cortando alambres de acero de alta resistencia estirados en frío, mucho del cual, eran porciones rechazadas del alambre usado en la fabricación de otros productos. Sin embargo las fibras resultaban relativamente costosas ya que este material no era de desperdicio y estaba en buen estado.

Para reducir los costos, las fibras de acero se empezaron a producir mediante un proceso de extracción de material fundido. En este procedimiento se emplea una rueda giratoria que golpea la superficie libre del material fundido salpicando gotas de metal líquido que se enfría rápidamente y que son lanzadas fuera mediante una fuerza centrípeta. Las fibras tienen una superficie irregular y una sección transversal en forma decreciente.

La mayoría de los fabricantes de fibras de acero, están continuamente modificando la naturaleza de su producto, con el fin de proporcionar mayor facilidad de manejo y miscibilidad de las fibras, y para incrementar la resistencia y la tenacidad del concreto.

La forma y textura de las fibras puede ser muy variada. Actualmente los tipos de fibras que se emplean con más frecuencia son: Fibras de acero trenzadas, con extremos ensanchados, de hojas cortadas, fibras de alambre de extremos curvados, de alambre ondulado, de alambre de sección transversal variable con superficies rugosas, fig 2.1. La geometría de la fibra influye en la adherencia que se genera entre la fibra y la matriz, sin embargo las endaduras superficiales y las diferentes formas de la

sección, solo proporcionan incrementos limitados en las propiedades y resistencia del concreto reforzado con fibras.

Para mejorar la adherencia entre las fibras y la matriz también se han empleado procedimientos químicos, que consisten en la aplicación de recubrimientos de latón y de cobre, pero su comportamiento no es mejor que el de las fibras sin recubrir.

El parámetro que con mayor frecuencia se emplea para describir una fibra es su relación de aspecto, esto es, la longitud de la fibra dividida entre el diámetro equivalente de la misma.

La relación de aspecto de la fibra está regida por la facilidad para mezclarlas con el concreto, y generalmente la relación óptima para el mezclado es inferior a la relación de aspecto óptima desde el punto de vista de resistencia.

Las fibras se ofrecen con relaciones de aspecto que varían entre 30 y 150, para longitudes de fibra de 25 mm a 75 mm. Las fibras redondas de acero se producen al extraer, y cortar alambres, cuyos diámetros suelen oscilar entre 0.15 mm y 0.75 mm. Las fibras planas varían entre 0.15 mm y 0.40 mm de espesor, y entre 0.25 mm y 0.80 mm de ancho, también existe la configuración estándar de otro tipo de fibra la cual mide 0.25 mm x 0.56 mm x 25 mm fabricada con acero bajo en carbón.

Las fibras que se utilizan con mayor frecuencia miden de 0.4 a 0.5 mm de diámetro, y de 25 mm a 50 mm de longitud y fibras planas de 0.25 mm x 0.56 mm x 25 mm . En fechas más recientes ha aumentado en los Estados Unidos el uso de fibras de 0.625 mm de diámetro y 62.5 mm de longitud.

Para evitar que durante el mezclado se formen grumos de fibras, es necesario emplear algún medio para dispersarlas dentro

de la revolvedora; una alternativa es emplear haces de fibras adheridas con goma soluble en agua, la cual desaparece gradualmente durante el proceso de mezclado, permitiendo que las fibras individuales se distribuyan uniformemente en toda la mezcla.

La capacidad de refuerzo de una fibra, depende del grado en que los esfuerzos pueden serle transferidos desde la matriz, grado que a su vez, está regido por las características intrínsecas de la fibra, que se mencionan a continuación.

a) Resistencia a tensión.- La resistencia a la tensión de la fibra debe ser considerablemente mayor que la de la matriz, ya que el área efectiva que soporta la carga, para concentraciones típicas de fibras ( de 1 a 5 % por volumen ), es mucho menor que la de la matriz ( de 99 a 95 % del volumen total ). Por lo general, esto siempre se cumple ya que la resistencia a tensión de las matrices cementantes es muy baja.

b) Deformación a la falla.- La fibra debe ser capaz de soportar deformaciones muy superiores a la deformación que produce el agrietamiento de la matriz. Como el acero fluye a una deformación unitaria de 0.002 y el concreto falla a 0.003, se puede afirmar que el requisito anterior siempre se satisface.

c) Módulo de elasticidad.- Es conveniente que las fibras tengan un módulo de elasticidad grande, ya que mientras mayor sea el módulo de elasticidad de las fibras, mayor será el esfuerzo que soporte un elemento sometido a carga, siempre y cuando no existan desplazamientos relativos entre las fibras y la matriz.

d) Resistencia a cortante por adherencia interfacial.- La transferencia de carga de la matriz a las fibras es consecuencia de la adherencia entre ambas. Esta adherencia depende de varios factores los más importantes son: la adherencia química entre el

acero y el concreto, la fricción y el entrelazamiento mecánico generado por las ondulaciones de las fibras. Desafortunadamente, los factores que rigen la adherencia no están suficientemente estudiados y no es posible establecer una relación entre ellos y las características geométricas y mecánicas de las fibras.

e) Flujo plástico.- Es conveniente que las fibras que se utilizan para reforzar matrices cementantes no presenten fluencia bajo una carga constante, ya que esto produce una relajación de esfuerzos y la eficiencia de las fibras se reduce con el tiempo. Este fenómeno no se presenta comunmente en fibras de acero pero puede ser significativo en fibras de polimeros, aún cuando estén sometidas a condiciones normales de temperatura.

Además de las características mecánicas propias de las fibras el comportamiento de los concretos fibrosos depende de la relación de aspecto, de la cantidad de fibra, y de la oposición que presenta la fibra a la extracción.

En fibras rectas convencionales de sección transversal uniforme, los parámetros que determinan el esfuerzo que toman las fibras son la relación de aspecto y la cantidad de las mismas; una revisión de varios estudios experimentales demostró que, cuando se emplea este tipo de fibras, el mejoramiento de las propiedades está relacionado con el producto de estos dos párametros, aunque la magnitud varía según la naturaleza de la matriz.

En fibras con extremos curvados o ensanchados, la relación de aspecto, ya no es relevante y el factor más importante es la resistencia de la fibra a la extracción; parámetro mucho más difícil de cuantificar.

Otro aspecto que también preocupa es la durabilidad de las fibras en el concreto, y aunque el acero, es estable en el ambiente alcalino del concreto normal, la corrosión puede

constituir un problema cuando se agrieta la matriz.

El problema de la corrosión en las fibras de acero, es algo que se ha tratado de aclarar; sin embargo los estudios que se han realizado son a largo plazo, y por lo mismo los datos que se tienen son muy limitados. Los especímenes sin grietas expuestos a la intemperie no han mostrado manchas superficiales de corrosión antes de transcurrir tres años, y los expuestos a inmersiones parciales y totales en agua de mar, acusan tan solo una reducción en resistencia del 10 % después de un año. Los especímenes agrietados expuestos a la intemperie y vueltos a probar después de meses, acusan pérdidas de resistencia de hasta el 20 %, mientras que los especímenes sin grietas han conservado toda su resistencia. Asimismo, un estudio de vigas agrietadas, expuestas a un ambiente marino húmedo, demostró que la corrosión no es importante si el ancho de la grieta es inferior a 0.15 mm . Por otro lado, en condiciones ambientes más severas, con circulación de soluciones de cloruro de calcio, se observó una fuerte corrosión con anchos de grietas tan pequeños como 0.05 mm, esto hace pensar que la corrosión es función tanto del ancho de grieta como de las condiciones ambientes.

## **2.2 Proporcionamientos típicos de concretos reforzados con fibras de acero**

El proporcionamiento para concreto reforzado con fibra de acero, es similar al proporcionamiento del concreto convencional, sin embargo, en los concretos con fibras, se debe de cuidar que la trabajabilidad y la separación de las partículas sean adecuadas, por lo tanto, se recomienda utilizar agregados que tengan un tamaño máximo de 3/8" ( 9.8 mm ); pero si se utilizan tamaños mayores que este es necesario ajustar la cantidad de arena requerida.

Debido a que la absorción que existe en el concreto con fibra, es diferente de la de los concretos convencionales, el contenido de agua estará en función del tipo y naturaleza de la fibra que se emplee, esto es , la cantidad de agua puede aumentar o disminuir.

Para evitar una mala dispersión de la fibra, es recomendable elaborar una mezcla plástica. Para esto, la experiencia sugiere que la relación agua/cemento sea de 0.4 a 0.6 y que los contenidos de cemento sean entre 300 y 600 kg/m<sup>3</sup>. Con estas cantidades se puede obtener una buena pasta que permita cubrir totalmente la superficie de las fibras.

En la tabla 2.1 se muestran proporcionamientos típicos de concretos con fibra, recomendado por el ACI.

Las puzolanas, tales como las cenizas volantes muy finas, pueden ser utilizadas en los concretos fibrosos, esto permite reducir los contenidos de cemento, que generalmente son muy altos, de la misma manera que en el caso de concretos convencionales que requieran un volumen muy alto de material cementante. La ceniza volante también aumenta la trabajabilidad del concreto y mejora las propiedades a largo plazo del material endurecido.

Los estudios de laboratorio y la experiencia en campo, nos recomiendan un remplazo de cenizas volantes por cemento, de un 25 a un 30 por ciento del volumen total, claro está, que estas cantidades pueden variar de acuerdo a la calidad y composición de la ceniza volante y el tipo de cemento que se este usando.

En los concretos con fibra al igual que en los concretos convencionales, también podemos usar aditivos, los cuales nos mejoran la calidad y resistencia del concreto, así como también la trabajabilidad.



Los aditivos pueden ser: inclusores de aire, reductores de agua, y estabilizadores de volumen. También los superfluidificantes o reductores de agua de alto grado, son muy útiles ya que pueden ayudar a obtener concreto fibroso de alta calidad, con una baja relación agua/cemento y una elevada trabajabilidad.

Los concretos con fibra se distinguen de los concretos convencionales, por su alto contenido de cemento, alto contenido de agregado fino, y el empleo de agregados gruesos de menor tamaño. Debido a estas características de los concretos con fibra, los procedimientos para proporcionamientos de concretos convencionales, pueden no ser aplicables a los concretos reforzados con fibra.

Los concretos reforzados con volúmenes de fibra superiores al 2 por ciento, son difíciles de mezclar, por lo tanto se recomienda usar los proporcionamientos para concreto convencional, cuidando que el tamaño máximo del agregado sea de  $3/8"$  ( 9.8 mm ). Cuando se aumenta el volumen de la fibra, se presenta una disminución de la trabajabilidad del concreto.

### **3. DESCRIPCION DE LOS ENSAYES REALIZADOS EN CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO**

En este capítulo se hace una breve descripción de las principales pruebas que se hicieron en el estudio experimental que se describe en el capítulo IV.

Estas pruebas se explican detalladamente en las normas ASTM, y en el presente capítulo solo se pretende dar una explicación sencilla que permita una mejor comprensión del trabajo experimental realizado.

#### **3.1 Prueba del revenimiento**

Esta es una prueba que se usa con frecuencia tanto en obra como en laboratorio. La prueba del revenimiento es muy útil para determinar la cohesión de una mezcla, se dice que un concreto carece de cohesión cuando en lugar de reventarse en forma uniforme y redonda se desliza en un plano inclinado. Sin embargo se ha encontrado que no es aplicable a concretos no plásticos y no cohesivos, ni tampoco a concretos que tienen gran cantidad de agregado grueso, (mayor de 5 mm), o grandes cantidades de fibras.

El equipo que se utiliza para la prueba consta de un cono para revenimiento, una varilla metálica para compactar, y un cucharón. La muestra de concreto, de la cual se harán los especímenes de ensaye, debe ser representativa de la revoltura completa.

El procedimiento es el siguiente: Se humedece el cono y se coloca sobre una superficie rígida, plana, húmeda y no absorbente; el operador debe sujetarlo firmemente en su lugar durante el llenado, parándose sobre las dos piezas que para este fin tiene el cono. Con la muestra obtenida se llena el cono en tres capas, cada

una aproximadamente igual a un tercio del volumen total. Cada capa se compacta con 25 golpes, que se le dan con la varilla metálica; distribuidos uniformemente sobre la sección transversal. Para la capa inferior es conveniente inclinar un poco más la varilla; aproximadamente la mitad de los golpes se dan cerca del perímetro, después se continúa con golpes verticales en espiral hacia el centro. Las tres capas se compactan únicamente a través de sus respectivos espesores; de manera que los golpes solo penetren ligeramente en la capa inmediata inferior.

Si al compactar, el concreto se asienta a un nivel inferior al borde superior del cono, se agrega concreto para mantener todo el tiempo un exceso sobre la parte superior. Después que la última capa ha sido compactada, se empareja la superficie rodando la varilla en toda la sección, inmediatamente después, se retira el cono alzándolo cuidadosamente en dirección vertical. A continuación, se obtiene el revenimiento, midiendo la diferencia entre la altura del cono y la del concreto sobre el centro original de la base. Si claramente se desplaza hacia un lado, o si ocurren deslizamientos por cortante, entonces se desecha el ensaye y se procede a realizar uno nuevo con otra porción de la muestra.

### **3.2 Prueba del cono de revenimiento inverso**

La prueba del cono de revenimiento inverso, proporciona una buena medida de la trabajabilidad de los concretos reforzados con fibra, con este procedimiento se mide el tiempo en segundos que tarda una mezcla plástica en moverse una determinada distancia, cuando la mezcla se encuentra sujeta a vibración. El tiempo del cono de revenimiento inverso, es un buen indicador de la trabajabilidad del concreto reforzado con fibra colocado con vibración.

Este ensaye es aplicable a concreto en estado fresco, con tamaño máximo de agregado de 38 mm, que no fluyen facilmente a través del cono.

El equipo que se requiere para llevar a cabo este ensaye es el siguiente: Cono de revenimiento, vibrador, cronómetro, recipiente con tapa perforada, varilla metálica y cucharón.

El procedimiento para realizar esta prueba se describe a continuación: Se centra la tapa perforada posicionandola sobre la parte superior del recipiente; posteriormente se humedece el cono y se introduce en posición inversa dentro de la perforación de la tapa. Con la muestra de concreto seleccionada se llena el cono en tres capas. cada una aproximadamente igual a un tercio del volumen del cono; en esta etapa no debe compactarse el concreto. Para minimizar la gran cantidad de vacíos se nivela ligeramente la superficie de cada capa con un cucharón. La última capa se enrasa con una regla metálica, las fibras sobresalientes se pueden remover manualmente. Una vez realizado lo anterior se enciende el vibrador, y se inserta en el centro del cono deslizando verticalmente; simultaneamente se pone en marcha el cronómetro, el vibrador debe descender a una velocidad tal que toque el fondo del recipiente en 3 seg. Una vez que se alcanza el fondo del recipiente se mantiene el vibrador en posición vertical, evitando el contacto con el cono de revenimiento. Se suspende la marcha del cronómetro cuando el cono comienza a vaciarse, lo cual ocurre cuando existe una abertura visible entre el borde inferior del cono y la masa de concreto. La prueba debera repetirse, utilizando otra porción de la muestra, si el cono se tapona durante el ensaye, o no se vacía debido al exceso de material dentro del recipiente.

### **3.3 Prueba Ve Be**

La prueba Ve Be es un procedimiento en el que, la energía necesaria para remoldear un concreto, se toma como medida de la trabajabilidad del mismo.

Esta prueba se lleva a cabo con el aparato Ve Be el cual

consta de lo siguiente : Mesa vibradora, recipiente, cono de revenimiento, placa de acrílico, y varilla para compactar.

La prueba consiste en lo siguiente: Se coloca un cono de revenimiento dentro de un recipiente. Con la muestra de concreto seleccionada, se llena el cono de revenimiento en tres capas. Utilizando la varilla metálica cada capa se compacta con 25 golpes, distribuidos uniformemente en toda su superficie, se saca el cono de revenimiento y se vibra el concreto hasta alcanzar un cierto grado de compactación, registrándose el tiempo necesario para lograr la compactación deseada, el cual será una medida de la trabajabilidad.

### 3.4 Prueba del peso volumétrico

Esta prueba se emplea para determinar el peso por unidad de volumen del concreto recién mezclado.

El equipo que se utiliza para determinar el peso volumétrico es el siguiente: Recipiente de acero, maquinado a dimensiones exactas en su interior, varilla metálica, y una báscula con sensibilidad de 0.005 kg.

El procedimiento es el siguiente: Con la mezcla de concreto seleccionada se llena el recipiente hasta un tercio de su capacidad, esta capa se compacta golpeando uniformemente toda su superficie con la varilla metálica. Para las dos capas siguientes se repite el procedimiento descrito anteriormente. Las tres capas se compactan solo a travéz de sus respectivos espesores; procurando que la varilla penetre ligeramente en la capa anterior. La superficie exterior del recipiente se golpea ligeramente de 10 a 15 veces, o hasta que no aparezcan burbujas de aire en la superficie de la capa compactada. Después de compactar el concreto, se enrasa la superficie superior y se pule con una placa de acero plana, cuidando que el recipiente quede lleno hasta su nivel superior. Se

limpia el exceso de concreto en la parte exterior y se pesa el recipiente al más próximo 0.005 kg.

### 3.5 Resistencia a la compresión

La resistencia a compresión se determina, generalmente, mediante el ensaye de especímenes cilindricos sujetos a una carga axial de compresión. Los especímenes estandar tienen una relación altura/diámetro igual a dos, los más comunes tienen 15 cm de diámetro y 30 cm de altura.

El proceso que se sigue para la elaboración y ensaye de los especímenes, se describe brevemente a continuación: Primeramente se humedecen con grasa los moldes para evitar que el concreto se pegue en ellos, posteriormente se llenan de concreto en tres capas, cada una se compacta con una varilla de punta de bala de 16 mm de diámetro, o en dos capas si se compacta mediante vibrado, después con una llana se alisa la cara superior con el fin de darle un acabado plano.

Durante la prueba de compresión las caras del espécimen de ensaye quedan en contacto con las platinas de la máquina de pruebas, y como las superficies no son perfectamente planas, es posible que se presenten concentraciones de esfuerzos que reducen notablemente la resistencia del concreto. Para evitar esta pérdida de resistencia debe cuidarse que las superficies terminales sean planas. Existen tres formas de evitar las concentraciones de esfuerzos, estos son: Cabecear, pulir, o colocar materiales deformables entre las platinas de la máquina y las superficies del espécimen. El cabeceo de especímenes es el método que se utiliza con más frecuencia. El material ideal para cabecear debe tener resistencia y propiedades elásticas similares a las del concreto de la muestra; si esto se cumple no se presentará ninguna separación entre el material utilizado para cabecear y el cilindro de concreto. Existen diversos materiales que pueden utilizarse

para cabecear cilindros con resultados satisfactorios, el material que se utiliza con mayor frecuencia es el azufre.

La prueba se lleva a cabo de la siguiente manera: Se coloca el cilindro de concreto dentro de la máquina de ensaye procurando que su eje longitudinal coincida con el eje de la platina, de esta forma se garantiza una distribución uniforme de esfuerzos, a continuación se aplica al espécimen una carga monotónicamente creciente hasta hacer fallar el espécimen.

Para calcular la resistencia a compresión, se divide la carga máxima registrada entre el área de la sección transversal.

### 3.6 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad de un material es una medida de su rigidez; esto es la medida de la oposición que presenta el material a la deformación.

En materiales con comportamiento lineal el módulo de elasticidad se determina obteniendo la pendiente de la gráfica esfuerzo-deformación.

Para los materiales que presentan un comportamiento no lineal como el concreto, no es posible definir un solo módulo elástico, ya que la pendiente del diagrama esfuerzo-deformación unitaria cambia de un punto a otro de la curva. En estos materiales el módulo elástico se determina mediante definiciones arbitrarias basadas en consideraciones empíricas. En ensayos de laboratorio, el módulo de elasticidad secante es el parámetro que con mayor frecuencia se utiliza para determinar la deformabilidad.

En la Fig 3.1 se muestra una gráfica esfuerzo-deformación unitaria típica de los concretos ensayados; en estas gráficas es posible definir dos puntos de la curva, uno correspondiente a una

deformación unitaria igual a 0.00005 y otro correspondiente al 40% del esfuerzo máximo. El módulo de elasticidad del concreto se obtiene calculando la pendiente de la recta que une esos dos puntos; esto es:

$$E = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)}{(\epsilon_2 - 0.00005)}$$

Donde:

E: Módulo de elasticidad del concreto

$\sigma_2$ : Esfuerzo correspondiente al 40% del esfuerzo último

$\sigma_1$ : Esfuerzo correspondiente a una deformación unitaria de 0.00005

$\epsilon_2$ : Deformación unitaria correspondiente a  $\sigma_2$

### 3.7 Resistencia a tensión por flexión

El ensaye a tensión directa del concreto es difícil de implementar, por esta razón se determina en forma indirecta mediante el ensaye de vigas prismáticas de concreto, libremente apoyadas, sujetas a dos cargas concentradas aplicadas en los tercios del claro. El esfuerzo máximo en tensión que se presenta en las fibras inferiores de la viga se conoce como resistencia a tensión por flexión o módulo de rotura.

En vigas de concreto simple, la resistencia tensión por flexión coincide con la falla brusca del espécimen. A diferencia de lo anterior, las vigas de concreto reforzado con fibras de acero presentan un comportamiento dúctil.

El esfuerzo máximo en tensión ( $\sigma_{\text{máx}}$ ) se determina mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{\text{t máx}} = \frac{M}{I} Y$$

Conviene señalar, que el empleo de la expresión anterior supone un comportamiento elástico lineal del concreto, y es válido



ocuparla ya que para niveles bajos de los esfuerzos, el concreto presenta un comportamiento elástico lineal.

### 3.8 Tenacidad

El parámetro que se utiliza para determinar la tenacidad de los concretos reforzados con fibra es el "índice de tenacidad", este parámetro puede interpretarse como una medida de la energía requerida para flexionar una viga en ensaye de módulo de rotura.

Para determinar el índice de tenacidad es necesario obtener las gráficas carga-deflexión de una viga ensayada a tensión por flexión módulo de rotura. En estas gráficas se pueden observar dos estados del comportamiento en la curva carga-deflexión. Como se puede apreciar en la Fig 3.2, la curva carga deflexión se puede considerar lineal hasta el punto A. Después del punto A la curva es significativamente no lineal y alcanza un máximo en el punto B. La carga o el esfuerzo correspondiente al punto A se ha llamado resistencia al primer agrietamiento, límite elástico o límite de proporcionalidad. El esfuerzo correspondiente al punto B se ha denominado resistencia última.

El índice de tenacidad se calcula dividiendo el área bajo la curva carga-deflexión, hasta una deflexión de 1.9 mm, entre el área bajo la curva carga-deflexión correspondiente al primer agrietamiento. El índice de tenacidad para un concreto simple se considera igual a 1, ya que en este caso la falla súbita del espécimen hace que la carga disminuya bruscamente después que se alcanza la resistencia al primer agrietamiento.

### 3.9 Contracción por secado

Este método permite determinar los cambios de longitud producidos por causas que no sean la aplicación de fuerzas externas o

cambios de temperatura.

El equipo que se emplea para obtener la contracción por secado es el siguiente: Pisón fabricado con material no absorbente, moldes, índices de acero inoxidable, varilla metálica para compactar y cámara de secado con controles de humedad y temperatura.

Para determinar la contracción por secado se elaboran tres o más especímenes, los cuales son prismáticos, de sección transversal cuadrada, de 7.5 cm por lado, y 28 cm de longitud. El proceso que se sigue para la elaboración de los especímenes se describe a continuación: Se coloca el concreto dentro de los moldes en dos capas, aproximadamente iguales, cada capa se compacta con la varilla metálica. Al colocar la capa superior, debe compactarse cuidadosamente con los dedos el concreto alrededor de cada índice, la capa superior se sobrellena ligeramente para, después de terminada la compactación, eliminar el concreto excedente con una regla. A continuación se sueltan los dispositivos que sostienen a los índices de medición en su posición, a fin de evitar cualquier restricción de estos durante la contracción inicial del espécimen.

Los especímenes de ensaye se curan dentro de los moldes a una temperatura de 23 °C, y con una humedad relativa superior al 90 %. Después de 24 horas, contados a partir del mezclado del concreto, se sacan los especímenes de los moldes evitando golpear los índices de referencia. A continuación, se colocan los especímenes de ensaye en agua limpia a 23 °C durante 30 minutos o más; después de este tiempo se sacan, se secan con paño húmedo, utilizando el comparador se determina su longitud, y se sumergen en el agua. A la edad de 24 horas, contadas a partir del mezclado del concreto, sacan los especímenes, se secan con paño húmedo y se mide nuevamente su longitud. Después de la última medición, los especímenes se curan en agua con cal, a 23 °C de temperatura, hasta que alcancen 28 días de edad, contados a partir del mezclado del concreto, transcurrido este tiempo se sumergen en agua limpia

durante 30 minutos, se secan y se determina su longitud. Los especímenes se almacenan en una cámara de secado a una temperatura de 23 °C y una humedad relativa del 50 %, procurando que exista una separación de por lo menos 2.5 cm; en todas sus caras.

Durante la primera semana que permanecen los especímenes dentro de la cámara de secado se determina diariamente su longitud, después se harán lecturas semanales durante un mes, y posteriormente se toma una lectura mensual durante un año.

## **4. DESCRIPCION DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL**

### **4.1 OBJETIVO DEL ESTUDIO**

En el presente capítulo se describe un estudio experimental, realizado en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, que tiene como objetivo determinar las propiedades, en estado fresco y en estado endurecido, del concreto reforzado con fibras cortas de acero.

### **4.2 Materiales componentes**

#### **Cemento**

En la fabricación de los concretos se empleó cemento normal, que satisface los requisitos de la norma oficial mexicana NOM C2, para cementos portland puzolánicos.

Con el fin de no incluir variables adicionales en este estudio, se procuró que todo el cemento utilizado perteneciera a un mismo lote. Para evitar que el cemento se humedeciera, los sacos de este material se protegieron con bolsas de plástico.

#### **Agregados**

En la fabricación de todas las mezclas de concreto se utilizó arena andesítica y grava basáltica vesicular triturada. La grava se clasificó en dos tamaños: Grava 1-a (de 4.75 mm a 9.5 mm) y grava 1-b (de 9.5 mm a 19.0 mm).

En la tabla 4.1 se presentan las características físicas de los agregados; los valores que muestran estas características no son los más deseables para producir concretos de buena calidad, pero se consideran aceptables. Se puede apreciar que tanto la grava como la arena tienen alta absorción y densidades relativamente

bajas.

## **Agua**

El agua que se utilizó para el mezclado fue tomada de la red local de agua potable ya que cumple con las características adecuadas para la fabricación de concreto.

## **Fibras de acero**

En las mezclas de concreto se emplearon unicamente fibras lisas con extremos ondulados. Sus características geométricas se presentan en la tabla 4.2 .

La relación de aspecto de estas fibras (largo entre diámetro equivalente) es igual a 100.

### **4.2 Proporcionamientos**

Se fabricaron 8 mezclas en las cuales las cantidades de cemento, agua, y agregados se mantuvieron constantes variando únicamente el porcentaje de fibras.

El proporcionamiento base tuvo un consumo de cemento de 420 kg/m<sup>3</sup>, y una relación agua/cemento de 0.5. Las cantidades de arena y grava se mantuvieron al 50 % del volumen total de agregados. Del volumen correspondiente a la grava el 35 % fue grava 1-a y el 65 % grava 1-b. Las cantidades empleadas se muestran en la tabla 4.3.

Las cantidades de fibras agregadas a las mezclas se presentan en la tabla 4.4.

Como podemos observar, la mezcla No. 1 es un concreto simple, sin fibra, y las demás mezclas tienen porcentajes que varían de 0.3 hasta 1.8. Estos límites representan un rango razonable de

volumenes de fibra que normalmente se utilizan en la práctica.

#### **4.3 Procedimiento de mezclado**

En el estudio experimental que se presenta, el procedimiento de mezclado fue el siguiente:

Para evitar pérdidas en el agua de mezcla primero se humedece completamente la revolovedora y se deja escurrir el agua excedente; a continuación se introduce la grava, la arena y el agua de absorción y se mezclan estos materiales durante tres minutos, a una velocidad de 18 rpm; transcurrido ese tiempo se agrega el cemento y el agua de mezclado y se revuelve todo durante tres minutos; posteriormente se suspende el mezclado y se deja reposar el concreto durante 5 minutos con el fin de propiciar el fraguado falso de este material; por último, para romper el fraguado falso se inicia nuevamente el mezclado, y trascurridos 2 minutos se empieza a adicionar manualmente la fibra de acero. Para evitar el apelmamiento de las fibras esta operación debe realizarse en un tiempo no mayor de 2 minutos procurando distribuir las uniformemente.

#### **4.4 Pruebas realizadas al concreto con fibras de acero en estado fresco**

Las pruebas que se le hicieron al concreto en estado fresco, para cada una de las mezclas, fueron: revenimiento, Ve Be, cono inverso y determinación del peso volumétrico.

##### **Prueba del revenimiento**

La prueba del revenimiento se realiza como se describe en la norma ASTM C143-78. fig 4.1. En la tabla 4.5 se muestran los revenimientos obtenidos en cada una de las mezclas elaboradas. Se puede ver que esta prueba no es un buen parámetro para cuantificar la

trabajabilidad de los concretos fibrosos.

### **Prueba Ve Be**

El procedimiento que se sigue para realizar esta prueba, fig 4.2, se encuentra descrito en la British standard 1881, segunda parte 1970, "Methods of testing concrete", los resultados se expresan en segundos Ve Be.

Experimentalmente se ha observado que en mezclas trabajables los tiempos Ve Be varían de 4 a 17 seg.

Los resultados obtenidos en el estudio que se describe se presentan en la tabla 4.5.

### **Prueba del cono de revenimiento inverso**

Como se mencionó anteriormente, la prueba del cono de revenimiento inverso se emplea para determinar la trabajabilidad de los concretos reforzados con fibras.

El tiempo registrado en las pruebas del cono de revenimiento inverso para concretos reforzados con fibras que presentan una buena trabajabilidad varía de 11 a 28 segundos. Los resultados de los ensayos del estudio realizado se presentan en la tabla 4.5.

El procedimiento que se sigue para realizar este ensaye, fig 4.3, se encuentra descrito en la norma ASTM C995.

### **Prueba del peso volumétrico**

A todas las mezclas estudiadas se les determinó el peso volumétrico mediante el peso de un volumen conocido de concreto igual a 7 l, fig 4.4. En la realización de la prueba se siguió el método ASTM C138 . Los resultados de los ensayos se presentan en

la tabla 4.5

#### **4.5 Pruebas realizadas al concreto con fibras de acero en estado endurecido**

Los especímenes elaborados con cada una de las mezclas, permanecieron durante 28 días dentro de la cámara de curado, transcurrido este tiempo se procedió a los ensayos correspondientes para determinar las siguientes propiedades mecánicas del concreto:

- 1) Resistencia a compresión.
- 2) Módulo de elasticidad.
- 3) Resistencia a tensión por flexión.
- 4) Tenacidad.
- 5) Resistencia a cortante.
- 6) Contracción por secado.

#### **Resistencia a compresión**

Diversos estudios experimentales indican que la resistencia a compresión del concreto reforzado con fibras depende, básicamente, de la resistencia a compresión de la matriz, y aún cuando se empleen porcentajes volumétricos de fibra muy altos, los incrementos de la resistencia no son significativos. Edgington observó, que para concretos reforzados con un volumen porcentual de fibra igual a 1.2, los incrementos en resistencia a compresión son menores al 25 %. Sin embargo, la inclusión de las fibras permite alcanzar mayores deformaciones últimas.

En el estudio experimental que se describe en este capítulo, la resistencia a compresión se determinó utilizando especímenes cilíndricos de 15 x 30 cm, fig 4.5. Con cada una de las mezclas se elaboraron 3 especímenes que se ensayaron de acuerdo con la norma ASTM C-39, descrita en el capítulo 3. En la tabla 4.6 se muestran los resultados de estos ensayos.



## **Módulo de elasticidad**

El módulo de elasticidad del concreto, es controlado por el volumen y módulo de elasticidad del agregado. Pequeñas adiciones de fibras de acero no alteran grandemente el módulo elástico del compuesto. Las gráficas esfuerzo-deformación obtenidas en concreto simple y en concreto reforzado con fibras, muestran que no existe gran diferencia en el módulo.

Para determinar el módulo elástico en cada una de las mezclas elaboradas, se siguió el procedimiento establecido en la norma ASTM C469.

De cada una de las mezclas se obtuvieron las gráficas esfuerzo-deformación unitaria de 3 cilindros ensayados en compresión axial, fig 4.6.

En la figura 4.7 se muestra una gráfica esfuerzo-deformación unitaria típica de los concretos ensayados; en estas gráficas es posible definir dos puntos de la curva, uno correspondiente al 40% del esfuerzo máximo y otro a la deformación unitaria igual a 0.00005. El módulo de elasticidad del concreto se obtiene calculando la pendiente de la recta que une esos dos puntos. Los resultados obtenidos en los ensayos se presentan en la tabla 4.6. En la misma tabla se presentan los valores promedio de las deformaciones correspondientes al esfuerzo máximo, para cada una de las mezclas.

## **Resistencia a tensión por flexión**

Los principales factores que influyen en la resistencia a tensión por flexión son, la relación de aspecto y el volumen de las fibras utilizadas, cuando se incrementan estas dos propiedades, el resultado que se obtiene es una alta resistencia a tensión por flexión. Otros factores que influyen en la resistencia a tensión son la adherencia y la orientación de las fibras, y en

menor grado la resistencia de la matriz.

En este estudio el ensaye en flexión se realizó de acuerdo a la norma ASTM C78, en donde se establece que deben ensayarse vigas prismáticas de sección cuadrada sometidas a dos cargas concentradas aplicadas a los tercios del claro.

De cada una de las mezclas preparadas se ensayaron 10 vigas de 15 x 15 x 60 cm fig 4.8. Los resultados obtenidos de los ensayos se presentan en la tabla 4.6, el esfuerzo máximo en tensión se determinó mediante la fórmula de la escuadria.

### **Tenacidad**

La tenacidad es una de las propiedades que se mejora con la adición de fibras de acero; para medir la tenacidad se utiliza el parámetro "índice de tenacidad", fig 4.7

El índice de tenacidad es una medida de la ductilidad del concreto, después de que se presenta el primer agrietamiento. En el capítulo 3 se describe con detalle la forma de obtener este parámetro.

Diversos autores han mostrado que la tenacidad del concreto reforzado con fibra de acero se incrementa notablemente con respecto a la del concreto simple. Aparentemente los parámetros que influyen en la tenacidad son: El tipo, volumen relación de aspecto, tipo de ondulación y orientación de las fibras.

### **Resistencia a cortante**

La resistencia a cortante es una de las propiedades que se mejoran sustancialmente al incorporarle fibras de refuerzo. Para determinar en que medida se ve afectada esta propiedad se hicieron pruebas de cortante empleando especímenes como los mostrados en la

fig 4.9. Aunque este tipo de ensaye involucra, conjuntamente flexión y cortante, el efecto de la flexión es pequeño; esto lo demostraron los especimenes al momento de su falla.

La resistencia a cortante se calcula como el esfuerzo promedio obtenido al dividir la carga registrada entre el área que toma esta carga. Los resultados que se obtuvieron en todas las mezclas se muestran en la tabla 4.6.

### **Contracción por secado**

La presencia de partículas rígidas en morteros de cemento Portland ayudan a reducir la contracción que normalmente se presentan en este material, así las mezclas de concreto se contraen menos que las mezclas de mortero por la presencia de los agregados gruesos en las primeras. La incorporación de las fibras de acero en las mezclas de concreto ayuda a reducir aun más estas contracciones propiciando al mismo tiempo una disminución en el agrietamiento que se produce en el concreto por este efecto.

Para determinar la efectividad de los diferentes tipos y cantidad de fibras, se midió la contracción libre de barras prismáticas de concreto de 7.5 X 7.5 X 25 cm, al secarse gradualmente en un ambiente de temperatura y humedad controlada fig 4.10. El método empleado se describe en la norma ASTM C157; las observaciones se llevaron hasta un mínimo de 155 días, a partir de las cuales se estimaron la contracción máxima que se puede esperar a muy largo plazo (25 años) en las diferentes mezclas estudiadas. Los resultados obtenido los mostramos en la tabla 4.6.

## 5. EVALUACION DE LOS RESULTADOS DE ENSAYE

### 5.1 Concreto en estado fresco

La trabajabilidad del concreto se ve afectada en forma importante con la incorporación de fibras de acero, aunque los porcentajes incluidos sean bajos.

De las pruebas disponibles para obtener índices de trabajabilidad de los concretos con fibras, se hicieron determinaciones con los ensayos de revenimiento, como inverso y Ve Be.

La prueba de revenimiento, fig 5.1, indica poca sensibilidad para valores del parámetro WL/d, (volumen por relación de aspecto), cercanos a 80.

Las pruebas de cono inverso y Ve Be, figs. 5.2 y 5.3, respectivamente, son más sensibles a los cambios que sufre el parámetro WL/d, por lo que se pueden emplear satisfactoriamente para fines de control de calidad.

Por otra parte, en las figs. 5.4 a 5.6 se presentan correlaciones entre los resultados de ensaye de las diferentes pruebas realizadas para determinar índices de trabajabilidad de las mezclas. Aunque el número de resultados es pequeño, se puede apreciar que en las correlaciones como inverso y Ve Be con revenimiento existen tendencias, mas o menos definidas, para valores del parámetro WL/d menores que 80. La fig. 5.6 indica que las pruebas como inverso y Ve Be presentan una correlación única entre estos parámetros, por lo que, teniendo el mismo significado estas pruebas, no se justifica hacer ambas para efectos de control de calidad.

Por último, en la fig. 5.7 se presenta la correlación entre el peso volumétrico (fresco y seco), y el parámetro WL/d. Como es de esperarse, el peso volumétrico se incrementa linealmente con el consumo de fibras.

## **5.2 Concreto en estado endurecido.**

### **Resistencia a compresión**

La inclusión de fibras, cortas de acero en las mezclas de concreto no mostró, en general, un efecto benéfico en la resistencia a compresión. Para valores del parámetro WL/d inferiores a 150 la disminución en la resistencia fue menor al 5 por ciento.

En la fig. 5.8 se observa que los resultados muestran una tendencia definida y que la mayor parte de ellos acusan una reducción en la resistencia. Esta situación se debe, muy probablemente a la dificultad que se tiene en los concretos con fibras para lograr una compactación óptima.

### **Relaciones esfuerzo-deformación en compresión**

En la fig. 5.9 se presentan las gráficas esfuerzo-deformación de dos concretos, con y sin fibras, y como se puede observar el efecto de las fibras es aumentar la ductilidad del concreto con una ligera reducción en la resistencia y en la rigidez del mismo.

En cuanto al módulo de elasticidad, en la fig. 5.10 se puede ver la tendencia a obtener valores menores en los concretos con fibras que en los concretos simples, sin que se pueda apreciar alguna influencia del parámetro WL/d en los módulos de elasticidad alcanzados.

En promedio se puede estimar que el módulo de elasticidad se

redujo en 17 por ciento, independientemente del contenido de fibras.

La presencia de las fibras de acero en el concreto hace que cambie el tipo de falla, de frágil a dúctil, presentando deformaciones últimas mayores que las correspondientes al concreto simple. No obstante lo anterior, estas deformaciones últimas no se registraron ya que los valores alcanzados son muy sensibles a la forma de ejecutar el ensaye y al equipo empleado.

Para determinar de qué manera el tipo y contenido de fibras afecta a la deformación del concreto en compresión, se compararon las deformaciones correspondientes al esfuerzo máximo para cada mezcla. Como se puede ver en la fig. 5.11 para los consumos de fibras estudiadas, esas deformaciones se ven afectadas en forma sensible al incrementarse el parámetro WL/d alcanzando un valor máximo de 42 por ciento, superior al del concreto simple, para un valor de WL/d cercano a 150.

### **Resistencia a tensión**

El empleo de fibras cortas de acero en el concreto pretende mejorar una de las grandes limitaciones del concreto, su escasa resistencia a tensión. El incremento en la resistencia a tensión resulta proporcional a la cantidad de fibra empleada y depende en gran medida de la adherencia que se pueda lograr entre la fibra y el concreto.

En la fig. 5.12 se puede observar que para valores del parámetro WL/d inferiores a 30 las fibras no tienen ningún efecto en la resistencia a tensión, y que ésta se ve incrementada proporcionalmente al consumo de fibras a partir de ese valor.

## **Tenacidad**

El efecto de las fibras cortas en la tenacidad es notorio, así, en la fig. 5.13, se puede observar que aún para los valores más pequeños del parámetro WL/d considerados en el estudio, la tenacidad se incrementa cinco veces. Para valores del parámetro WL/d superiores a 120 la tenacidad disminuye nuevamente, pero en ningún caso el incremento de la tenacidad es inferior al 400 por ciento con respecto a la del concreto simple.

## **Resistencia a cortante**

La influencia de las fibras cortas de acero en la resistencia a cortante del concreto resulta definitiva, y como se observa en la fig. 5.14, aunque se utilicen pequeños porcentajes de fibras, se nota un incremento en esa resistencia. En la misma figura se puede observar que para valores del parámetro WL/d superiores a 120 los incrementos en resistencia son iguales al 37 por ciento, con respecto a la resistencia a cortante del concreto simple.

## **Contracción por secado**

A partir de la información alcanzada durante 120 días de observación se pudo estimar la contracción última que se puede esperar para cada uno de los concretos, mismas que se reportan en las figs. 5.15. En la figura 5.16, se puede observar que aún para valores pequeños del parámetro WL/d la contracción por secado disminuye considerablemente, presentando una tendencia lineal, también se aprecia que para un valor del parámetro WL/d igual a 180 el decremento en la contracción por secado es de 27 por ciento con respecto a la contracción del concreto simple.

## 6. Aplicaciones del concreto reforzado con fibra

Las aplicaciones del concreto reforzado con fibra, debido a las características de resistencia que presenta, son muy variadas. En el refuerzo con fibras, se han encontrado las mejores soluciones a problemas que se presentan en estructuras dañadas, así como también en construcción de obras nuevas.

### 6.1 Estructuras hidráulicas

Las principales fallas que se presentan en las estructuras hidráulicas, son por cavitación y erosión; tales efectos son ocasionados por las altas velocidades que puede alcanzar el agua. En los estudios hechos en laboratorio, se ha encontrado que el concreto reforzado con fibras de acero, tiene una muy buena resistencia a la abrasión, por lo cual, el empleo de concretos fibrosos puede reducir considerablemente los daños que sufren las estructuras hidráulicas.

La resistencia a la abrasión que puede alcanzar un concreto reforzado con fibra de acero, es hasta tres veces mayor que la del concreto simple, esto se comprobó cuando estos dos concretos estuvieron expuestos a flujos de agua con velocidades de 37 m/s. Lo anterior ha motivado que se incremente el empleo del concreto reforzado con fibra en la reparación de desfuegos, vertedores, embalses, así como otras partes de las presas que sufren daños por la cavitación y la erosión.

Una de las reparaciones más grandes que se ha llevado a cabo, es la del vaso de asentamientos de la presa Tarvela, en Pakistán, en 1977. Dicha reparación se realizó con aproximadamente 3000 m<sup>3</sup> de concreto reforzado con fibra, con este volumen se pudo reemplazar el concreto convencional, el cual falló cuando se puso en funcionamiento el vaso. La reparación fue de inmediato, ya que los



flujos de agua a la descarga alcanzaban una velocidad de 43 m/s, y era muy peligroso si no se reparaba el desperfecto.

La reparación consistió en un recubrimiento de 50 cm de espesor; en la elaboración de la mezcla se emplearon agregados de 19 mm, consumos de cemento de  $444 \text{ kg/m}^3$ , y  $73 \text{ kg/m}^3$  de fibra. La reparación fue todo un éxito y el problema se resolvió satisfactoriamente.

## 6.2 Pavimentos

La aplicación en donde más se ha usado el concreto reforzado con fibras, es en los pavimentos ya que no existe mucho riesgo de pérdidas humanas y económicas, y los resultados obtenidos hasta hoy han sido satisfactorios.

El uso del concreto reforzado con fibras de acero en pavimentos es muy variado, su aplicación abarca desde el recubrimiento de caminos ya existentes, cubiertas de puentes, y pavimentos de aeropuertos, hasta algunos proyectos de grandes dimensiones y de gran importancia.

Los principales problemas que se presentan en los pavimentos, son los agrietamientos, que se deben a las cargas de flexión e impacto.

La reparación de un pavimento, es por medio del tendido de una capa superior de concreto reforzado con fibra, la cual puede estar o no adherida al pavimento ya existente. Los proporcionamientos de los materiales y el espesor del recubrimiento de reparación se determinan de acuerdo a la resistencia que se requiere para reparar el daño.

El aeropuerto de las Vegas Nevada, es el proyecto más grande llevado a cabo en pavimentos, con un volumen de  $8460 \text{ m}^3$  de

concreto reforzado con fibra. La pista reparada tiene 288 m de longitud por 183 m de ancho y 15 cm de espesor; la capa de concreto reforzado se coló sobre el pavimento asfáltico ya existente, en este caso no existió adherencia entre el concreto y el asfalto. La mezcla contenía agregado de 10 mm,  $360 \text{ kg/m}^3$  de ceniza volante y  $96 \text{ kg/m}^3$  de fibras. Para este proyecto se usó un sistema automatizado alimentador de fibras, que produjo un concreto consistente y bien mezclado, el cuál se coló a razón de 460 a  $580 \text{ m}^3/\text{día}$ , usando una pavimentadora deslizante.

Después de 18 meses de servicio, se hizo un análisis de daños, y se encontró que el recubrimiento se encontraba en muy buenas condiciones, con solamente dos grietas. Esto indicó que el uso del concreto reforzado es una solución muy buena para estas estructuras, ya que la durabilidad es mucho mayor que la del asfalto y la del concreto simple; el costo también disminuye debido a que es más durable el pavimento.

### **6.3 Aplicaciones estructurales**

El concreto reforzado con fibras de acero presenta algunas características, que pueden mejorar la resistencia, durabilidad, y rigidez de una estructura, Estas características se describen a continuación.

La presencia de las fibras en el concreto ayuda a reducir considerablemente el agrietamiento, y es de esperarse que las estructuras construidas con este tipo de material tengan, bajo cargas de servicio, agrietamientos y deformaciones mas pequeñas que las que presentan las estructuras construidas con concreto convencional.

Como ya se mencionó anteriormente, los concretos reforzados con fibras, tienen una alta resistencia al esfuerzo cortante, por ello se han empleado para reforzar los uniones entre losas planas

y columnas, esto permite incrementar la resistencia a la penetración por cortante y la ductilidad en esa zona.

La adición de la fibra en elementos de concreto presforzado, reduce las pérdidas de presfuerzo debidas a la contracción y al flujo plástico, lo que permite mantener la capacidad de carga de estos elementos.

Otra característica, muy importante, y que en el concreto simple no es muy buena, es la resistencia al impacto, la cual se incrementa con la adición de las fibras, disminuyendo los daños locales y el desportillamiento de las estructuras. El refuerzo con fibra puede mejorar la estabilidad y la integridad de las estructuras, cuando se presentan sismos o explosiones.

A pesar de todas las ventajas mencionadas anteriormente, es muy difícil encontrar estructuras de concreto en donde las fibras de acero se empleen como único refuerzo. Un ejemplo muy notable del uso de concreto reforzado con fibra, es el estacionamiento desmontable en el aeropuerto de Londres, en el cual se emplearon losas prefabricadas cuadradas de 1.1 m por lado y 65 mm de espesor, apoyadas en una estructura espacial a base de tubos de acero. Para reforzar el concreto se emplearon fibras de acero de 0.25 mm de diámetro por 25 mm de longitud, el volumen porcentual de fibras fue igual a 3%.

#### **6.4 Concreto lanzado**

El concreto lanzado reforzado con fibra de acero, tiene un campo de aplicación muy variado, ya que se puede emplear en la estabilización de taludes de roca, recubrimiento de túneles, y en la reparación de puentes.

Los beneficios que se han logrado con la adición de fibra son los siguientes: Se mejora la resistencia a tensión, flexión, y

cortante, y se incrementa la capacidad de deformación y la tenacidad posterior al agrietamiento.

El procedimiento de colado del concreto lanzado, tiende a crear una orientación de las fibras en dos direcciones, lo cual mejora la resistencia paralela al plano de construcción. El concreto reforzado con fibra se puede colocar mediante vía seca o por vía húmeda, pero la que tiene mayor uso es la vía seca.

Las técnicas tradicionales que actualmente se usan para el lanzado del concreto convencional, se pueden modificar ligeramente para el caso del concreto reforzado con fibras, tanto en el proceso seco como el húmedo, y la mayoría del equipo convencional se puede emplear, con algunas modificaciones, en el lanzado del concreto con fibra. Se recomienda utilizar mangueras con diámetro de al menos, el doble de la longitud de la fibra, para evitar que los ductos se taponen y se formen grumos de fibra.

El uso del concreto lanzado con fibra, puede ser una opción más económica que la construcción tradicional, las diferencias son las siguientes:

Con la adición de la fibra se elimina el refuerzo convencional para superficies curvas e irregulares, evitando así la dificultad del corte, doblado y colocación del acero; también se reduce el tiempo requerido para aplicar un recubrimiento, esto es muy importante, ya que existen situaciones donde la superficie de la roca recién expuesta, requiere sellarse rápidamente. El material puede ser aplicado en secciones delgadas y seguir el contorno superficial, esto permite un gran ahorro de material.

Uno de los proyectos donde se ha utilizado el mayor volumen de concreto, es en la estabilización de una pendiente rocosa en el río Snake Idaho, en esta obra se utilizaron aproximadamente 460 m<sup>3</sup> de concreto lanzado, para estabilizar una sección de 470 m de longitud de una pendiente de basalto, saliente sobre una vía

férrea. Se aplicó una mezcla de concreto lanzado y el procedimiento de aplicación fue por vía seca, con agregado de 6 mm y 150 kg/m<sup>3</sup> de fibra, aplicado en capas con espesor de 6.2 a 7.5 cm, a razón de hasta 7 m<sup>3</sup> por hora. Después de dos años se observó que el concreto se mantenía en buenas condiciones. En este proyecto el ahorro económico se cuantificó en aproximadamente 50,000 dolares, ya que se utilizó concreto reforzado con fibra.

## 6.5 Concreto refractario

La durabilidad del concreto refractario con fibras es mayor que la de un concreto sin fibra, esto se verificó cuando los dos tipos de concreto estuvieron expuestos a altos esfuerzos térmicos, ciclos térmicos, choques térmicos y expuestos a las acciones mecánicas.

La mayor durabilidad del concreto refractario se debe quizá a la combinación de los efectos que se producen cuando se adiciona la fibra de acero. Tales efectos pueden ser los siguientes : evita la propagación de las grietas, incrementa la tenacidad, la resistencia al desportillamiento, y la resistencia a la abrasión.

## 7. CONCLUSIONES

1. La trabajabilidad del concreto se reduce en forma importante al incorporar fibras cortas de acero a las mezclas, aunque los porcentajes incluidos sean relativamente pequeños. La prueba de cono inverso resulta adecuada para controlar en campo la trabajabilidad de estas mezclas.

2. La inclusión de fibras cortas de acero no modifica en forma importante la resistencia a compresión del concreto, sin embargo el tipo de falla cambia de frágil a dúctil.

3. El módulo de elasticidad de los concretos con fibras se reduce ligeramente. Para las mezclas estudiadas se obtuvieron, en promedio, módulos de elasticidad 20 por ciento menores que los del concreto simple.

4. Para valores del parámetro  $WL/d$  iguales o menores que 30, la resistencia a tensión no se afecta en forma importante. A partir de ese valor la resistencia a tensión se incrementa proporcionalmente al incremento del parámetro  $WL/d$ . Para las mezclas estudiadas se alcanzó una resistencia máxima a tensión del doble de la del concreto simple para un valor del parámetro  $WL/d$  igual a 150.

5. La resistencia a cortante se incrementa en forma importante aun con porcentajes pequeños de fibras. La máxima resistencia a cortante alcanzada resulto ser 40 por ciento superior a la del concreto simple, para un valor del parámetro  $WL/d$  igual a 120.

6. La tenacidad es la propiedad que más se beneficia por la presencia de las fibras cortas de acero en el concreto. Los concretos reforzados con fibra alcanzaron, en promedio, una tenacidad seis veces más grande que la del concreto simple.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

7. La contracción por secado se redujo hasta un 27 por ciento para valores del parámetro WL/d igual a 180, en relación con la del concreto simple.

8. REFERENCIAS

1. Hannant, DJ "Fibre Cements and Fibre Concretes", John Wiley and sons, 1978, pages 61-80
2. Johnston, CD "Concreto reforzado con fibras", Revista IMCYC No 127, Volumen 19, Nov 1981, pages 35-63
3. ACI Committee 544 "State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete", Concrete International, May 1982
4. Johnston, CD, "Steel Fiber Reinforced Mortar and Concrete : Review of Mechanical Properties", ACI SP 44-7 fiber Reinforced concrete, pages 127-143
5. ACI Committee 544, "Measurements of Properties of fiber Reinforce Concrete, ACI Journal July 1978
6. Mangat, PS, Montamedi Azari, M, "Shrinkage of Steel Fibre Reinforced Cement Composites", Materials and Structures Vol 21, No 123, May 1988, pag 163-171
7. ASTM "Annual Book of ASTM Standards" section 4 Construction, Volume 0.4.02 Concrete and Mineral Aggregates, 1983.



**TABLA 2.1 PROPORCIONAMIENTOS TÍPICOS DE MORTEROS Y CONCRETOS DE PESO NORMAL REFORZADOS CON FIBRAS DE ACERO (RECOMENDADOS POR EL ACI)**

| Cemento           | Relación  | Arena     | Grava        | Grava       | V. V. | Fibra  |         |
|-------------------|-----------|-----------|--------------|-------------|-------|--------|---------|
| kg/m <sup>3</sup> | A/C       | Va/Vta    | Vg<9.5mm/Vta | Vg<19mm/Vta | %     | Tipo   | % Vol   |
| 400-750           | 0.30-0.45 | 1.0       |              |             | 7-10  | ondul. | 0.5-1.0 |
| 400-750           | 0.30-0.45 | 1.0       |              |             | 7-10  | lisa   | 1.0-2.0 |
| 350-600           | 0.35-0.45 | 0.45-0.60 | 0.40-0.55    |             | 4-7   | ondul. | 0.4-0.9 |
| 350-600           | 0.35-0.45 | 0.45-0.60 | 0.40-0.55    |             | 4-7   | lisa   | 0.9-1.8 |
| 300-550           | 0.40-0.50 | 0.45-0.55 |              | 0.45-0.55*  | 4-6   | ondul. | 0.3-0.8 |
| 300-550           | 0.40-0.50 | 0.45-0.55 |              | 0.45-0.55*  | 4-6   | lisa   | 0.8-1.6 |

Donde:

A/C Relación entre el peso del agua y el peso del cemento

Va Volumen de arena

Vg<9.5 mm Volumen de grava con tamaño menor o igual a 9.5 mm

Vg<19 mm Volumen de grava con tamaño menor o igual a 19 mm

Vta Volumen total de agregados

V.V Volumen de vacíos expresados en porcentaje

Las cantidades de fibras están expresadas en volumen porcentual

\* No se especifica que proporción corresponde a la grava menor de 9.5 mm pero se puede considerar que esta proporción es del 35 % del volumen total del agregado grueso

**TABLA 4.1 PROPIEDADES FISICAS DE LOS AGREGADOS**

| Propiedades                                   | Grava basáltica        |                       | Arena andesítica |
|---|------------------------|-----------------------|------------------|
|   | 1 - a<br>4.75 - 9.5 mm | 1 - b<br>9.5 - 19.0mm |                  |
| Peso específico                               | 1.92                   | 1.90                  | 2.39             |
| Absorción, %                                  | 7.95                   | 7.40                  | 4.25             |
| Peso volumétrico, kg/cm <sup>3</sup>          |                        |                       |                  |
| Suelto  | 981.20                 | 960.60                | 1430             |
| Compactado                                    | 1069.53                | 1023.50               | 1570             |
| Módulo de finura                              | ----                   | ----                  | 3.20             |
| Material más fino que<br>malla 200 (74 μm), % | ----                   | ----                  | 5.20             |

**TABLA 4.2 CARACTERISTICAS FISICAS DE LAS FIBRAS DE ACERO**

| Características     | Lisa de 5.08 cm |
|---------------------|-----------------|
| Diámetro            | 0.05            |
| Relación de aspecto | 100             |

**TABLA 4.3 PROPORCIONAMIENTO EMPLEADO EN EL ESTUDIO EXPERIMENTAL**

| Material  | Cantidad, kg/m <sup>3</sup> | Volumen, l |
|-----------|-----------------------------|------------|
| Cemento   | 420.00                      | 144.80     |
| Agua      | 210.00                      | 210.00     |
| Arena     | 747.00                      | 312.60     |
| Grava 1-a | 210.00                      | 109.40     |
| Grava 1-b | 386.00                      | 203.20     |
| Vacios    | 0.00                        | 20.00      |
| Totales   | 1973.00                     | 1000.00    |

**TABLA 4.4 CONTENIDO DE FIBRAS EN LA MEZCLA**

| Mezcla No | Fibras                     |            |         |        |
|-----------|----------------------------|------------|---------|--------|
|           | Consumo, kg/m <sup>3</sup> | Porcentaje |         | Wl/d * |
|           |                            | Peso       | Volumen |        |
| 1         | 0.00                       | 0.00       | 0.0     | 0      |
| 2         | 23.55                      | 1.20       | 0.3     | 30     |
| 3         | 47.10                      | 2.40       | 0.6     | 60     |
| 4         | 62.80                      | 3.20       | 0.8     | 80     |
| 5         | 78.50                      | 4.00       | 1.0     | 100    |
| 6         | 94.20                      | 4.80       | 1.2     | 120    |
| 7         | 117.75                     | 6.00       | 1.5     | 150    |
| 8         | 141.30                     | 7.20       | 1.8     | 180    |

\* Wl/d, volumen por relación de aspecto

**TABLA 4.5 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN ESTADO FRESCO DE  
LOS CONCRETOS CON FIBRAS**

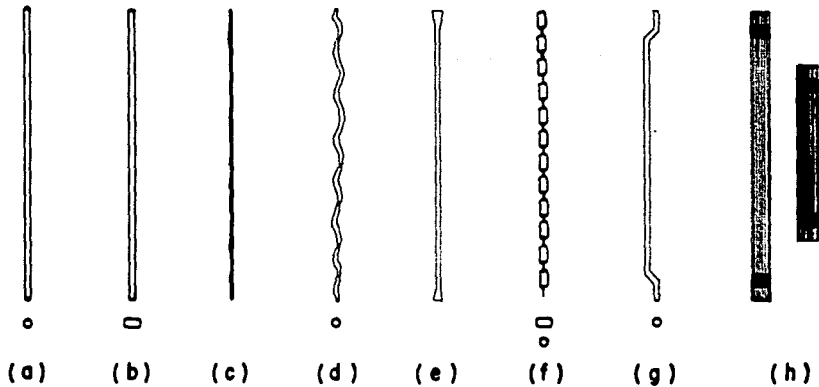
| Volumen de<br>fibras<br>( % ) | PRUEBAS              |                       |                              |   |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------------|---|
|                               | Revenimiento<br>(cm) | Tiempo Ve Be<br>(seg) | Tiempo cono<br>inverso (seg) | Peso volumé-<br>trico (kg/ m <sup>3</sup> ) |
| 0.0                           | 12.5                 | 4.0                   | 7.0                          | 1998  |
| 0.3                           | 10.0                 | 3.5                   | 7.0                          | 1995  |
| 0.6                           | 5.0                  | 12.0                  | 14.0                         | 2013  |
| 0.8                           | 0.0                  | 80.0                  | 19.0                         | 2076  |
| 1.0                           | 0.0                  | 120.0                 | 25.0                         | 2077  |
| 1.2                           | 0.0                  | 180.0                 | 30.0                         | 2100  |
| 1.5                           | 0.0                  | 250.0                 | 35.0                         | 2060  |
| 1.8                           | 0.0                  | 300.0                 | 42.0                         | 2024  |

**TABLA 4.6 PESO VOLUMETRICO EN Kg/m<sup>3</sup>, DE CONCRETOS EN  
ESTADO SECO, CON DIFERENTES PORCENTAJES DE FIBRAS**

| Volumen de fibras, por ciento | Peso volumétrico |
|-------------------------------|------------------|
| 0.0                           | 1980.42          |
| 0.3                           | 1985.95          |
| 0.6                           | 2006.36          |
| 0.8                           | 2065.36          |
| 1.0                           | 2049.68          |
| 1.2                           | 2127.80          |
| 1.5                           | 2135.49          |
| 1.8                           | 1991.99          |

**TABLA 4.7 PROPIEDADES MECANICAS DE CONCRETOS CON DIFERENTES PORCENTAJES DE FIBRAS DE ACERO**

| PRUEBA   | Volumen de fibra, por ciento |        |        |        |        |        |        |        |
|--|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|  | 0.0                          | 0.3    | 0.6    | 0.8    | 1.0    | 1.2    | 1.5    | 1.8    |
| Resistencia a compresión (Kg/cm <sup>2</sup> )                       | 382.78                       | 385.51 | 395.31 | 373.33 | 369.88 | 367.39 | 364.46 | 173.95 |
| Módulo de elasticidad (Kg/cm <sup>2</sup> )                          | 231115                       | 199813 | 196100 | 195974 | 185583 | 189433 | 154978 | -----  |
| Resistencia a tensión por flexión (Kg/cm <sup>2</sup> )              | 47.27                        | 48.54  | 66.94  | 76.05  | 82.64  | 97.51  | 98.27  | 89.74  |
| Resistencia a cortante (Kg/cm <sup>2</sup> )                         | 98.26                        | 100.01 | 126.50 | 105.69 | 115.98 | 137.65 | 137.17 | 113.42 |
| Tenacidad (%)  | 1.0                          | 5.43   | 4.47   | 10.71  | 10.72  | 6.21   | 5.90   | 4.03   |
| Deformación correspondiente al $\sigma_{max}$ . (X10 <sup>-5</sup> ) | 250                          | 255    | 266    | 267    | 298    | 300    | 355    | -----  |
| Contracción última (X10 <sup>-6</sup> )                              | 973                          | 912    | 904    | 859    | 897    | 767    | 745    | 714    |



- ( a ).— LISA DE SECCION CIRCULAR
- ( b ).— LISA DE SECCION RECTAGULAR
- ( c ).— ACERO AL CARBON
- ( d ).— ONDULADA DE SECCION CIRCULAR  
(PATENTADAS POR G. K. N. AND JOHNSON NEPHEW LTD)
- ( e ).— ALAMBRE CON EXTREMOS ENSANCHADOS
- ( f ).— DENTADAS DE SECCION CIRCULAR O RECTANGULAR  
(PATENTADAS POR DUOFORM NATIONAL STANDARD)
- ( g ).— FIBRA DE SECCION CIRCULAR CON GANCHOS EN LOS EXTREMOS  
(PATENTADA POR DRAMIX, Z. BEKAERTO LTD)
- ( h ).— HACES PEGADOS DE FIBRAS CON EXTREMOS CURVADOS

**FIG. 2. 1** DIVERSOS TIPOS DE FIBRAS DE ACERO

Fig 3.1 MODULO ELASTICO DEL CONCRETO

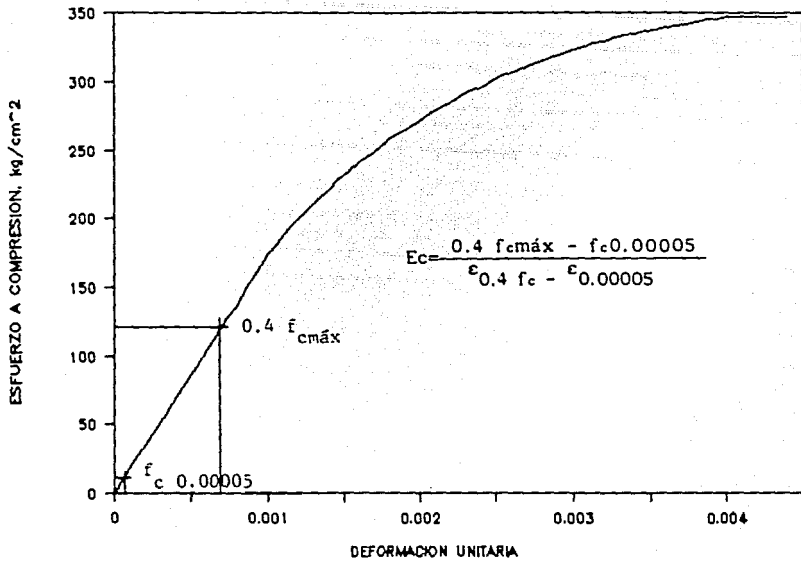
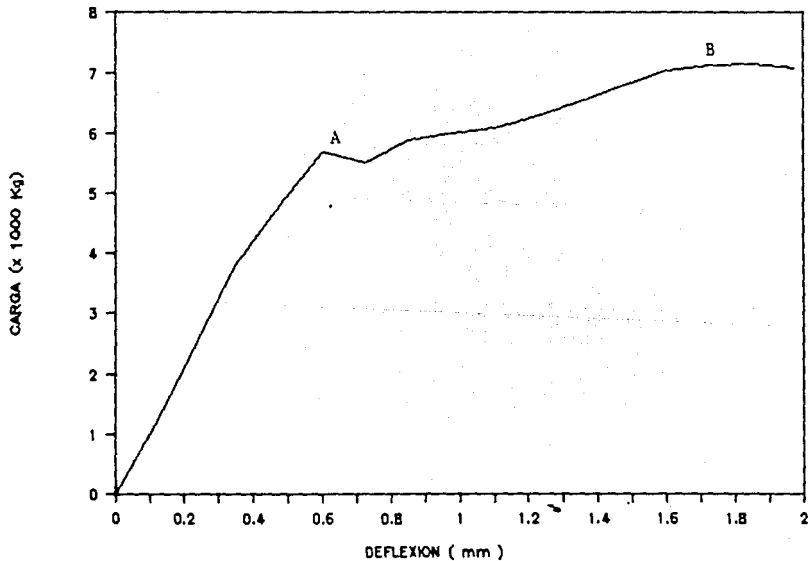
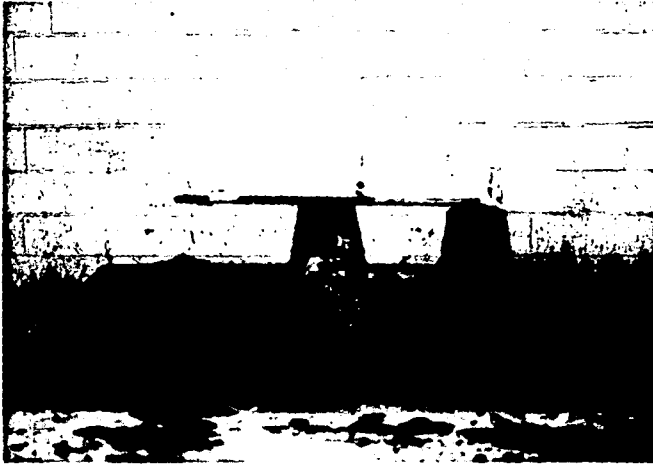


Fig 3.2 GRAFICA CARGA DEFLEXION TIPICA





**Fig 4.1 Prueba del revenimiento en concretos  
sin y con fibras**



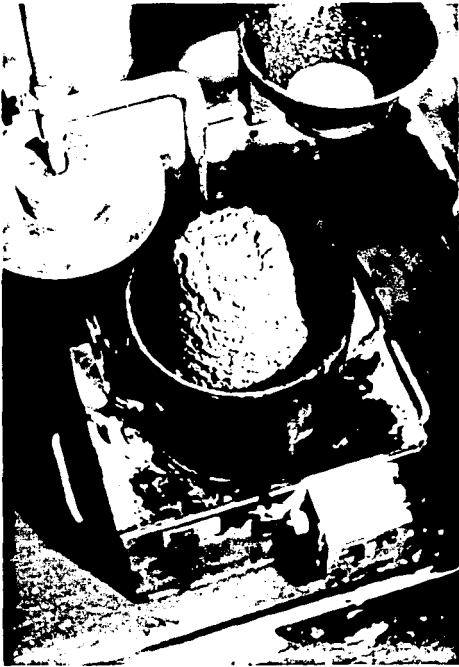


Fig 4.2 Prueba Ve be en el concreto con fibras



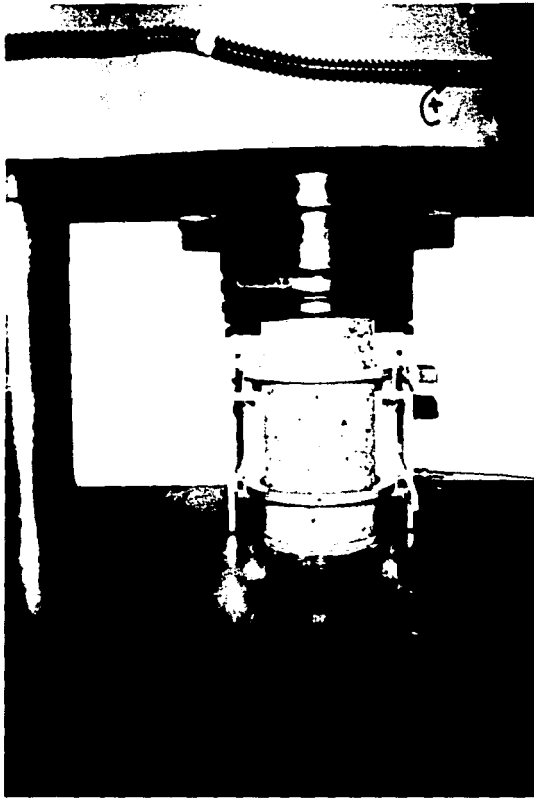
**Fig 4.3 prueba del cono de revenimiento inverso  
en concreto con fibra**



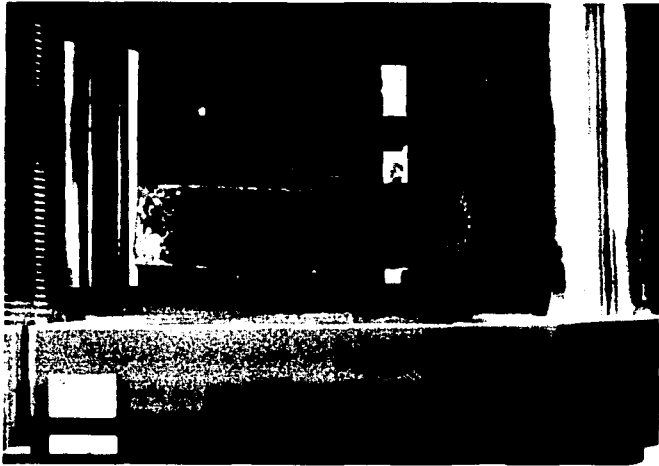
**Fig 4.4 Determinación del peso volumétrico en concretos con fibra**



**Fig 4.5 Determinación de la resistencia a compresión**



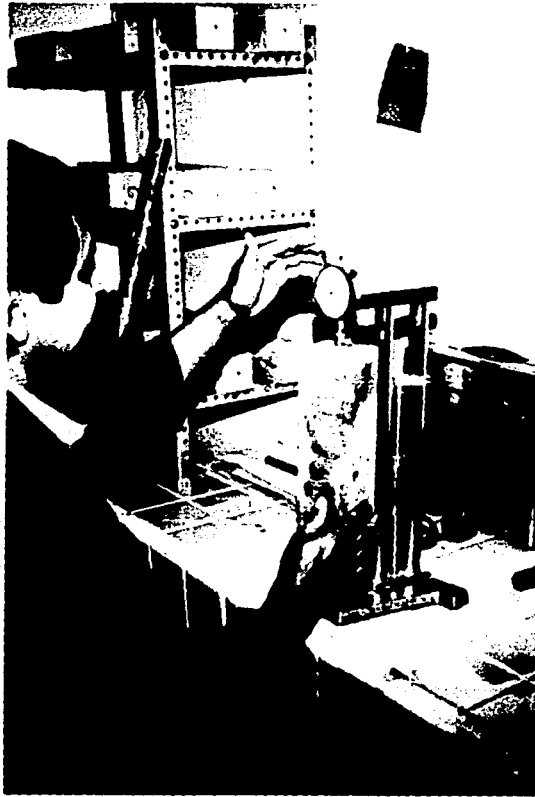
**Fig 4.6 Determinación del módulo de elasticidad**



**Fig 4.7 Determinación de la resistencia a tensión por flexión y la tenacidad**



**Fig. 4.8 Determinación de la resistencia a cortante**



**Fig. 4.9** Determinación de la contracción por secado del concreto.



Fig 5.1 REVENIMIENTO

INFLUENCIA DEL PARAMETRO  $w/d$

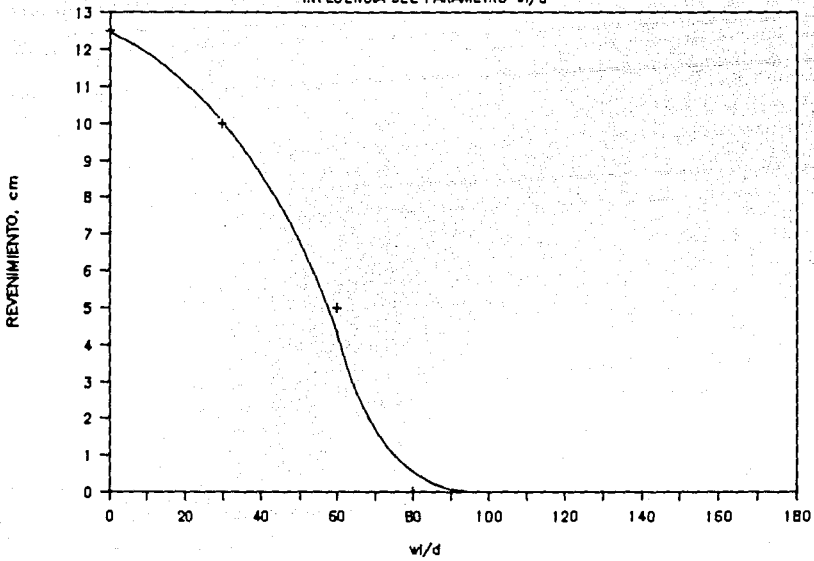


Fig 5.2 TIEMPO COMO INVERSO

INFLUENCIA DEL PARAMETRO  $w/d$

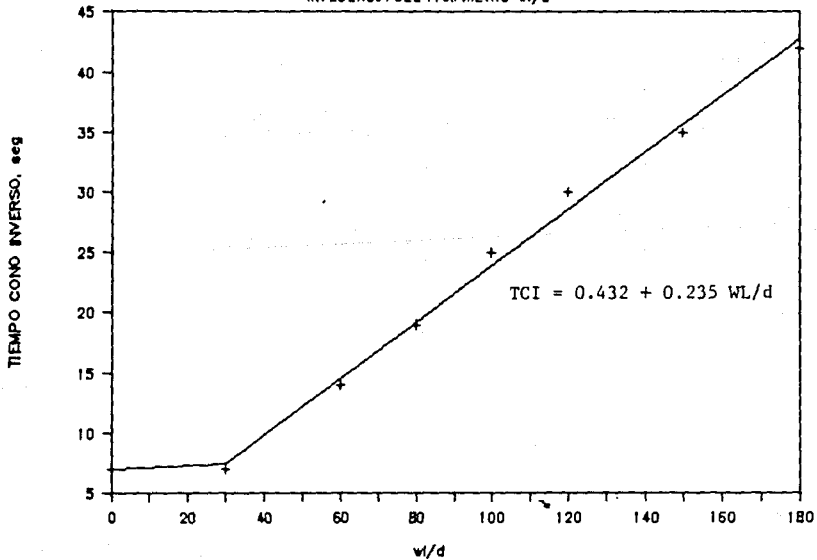


Fig 5.3 TIEMPO Ve Be

INFLUENCIA DEL PARAMETRO  $w/d$

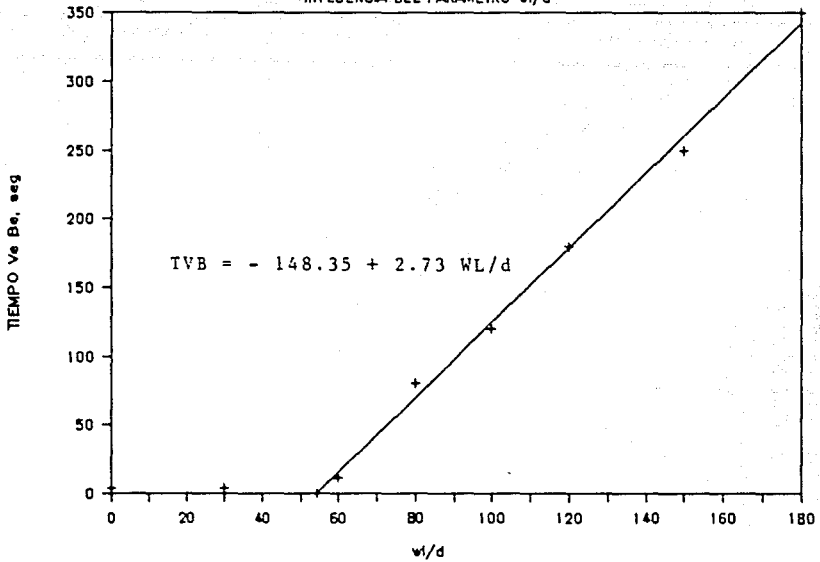


Fig 5.4 REVENIMIENTO – CONO INVERSO

RELACION ENTRE ESTOS PARAMETROS

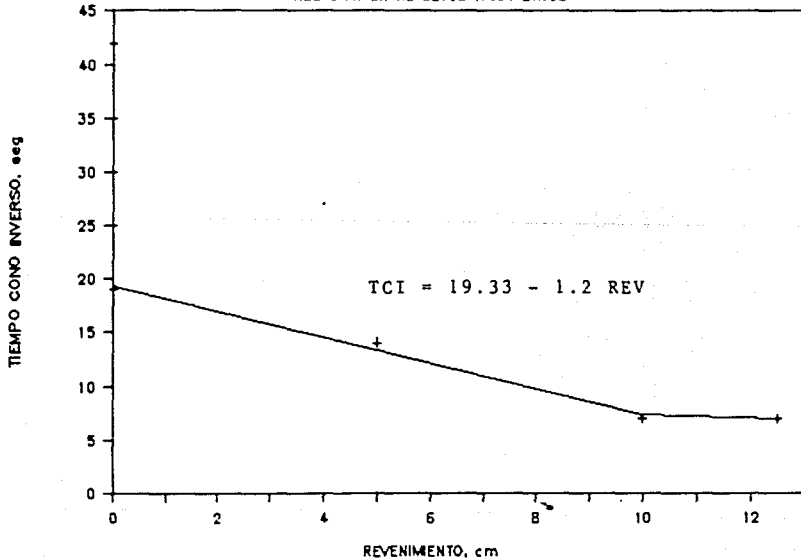


Fig 5.5 REVENIMIENTO – TIEMPO Ve Be

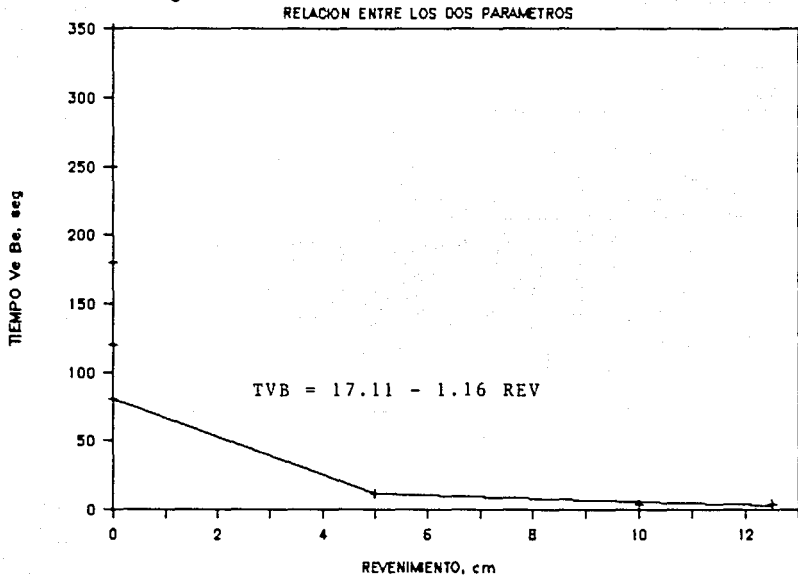


Fig 5.6 TIEMPO CONO INV.-TIEMPO Ve Be

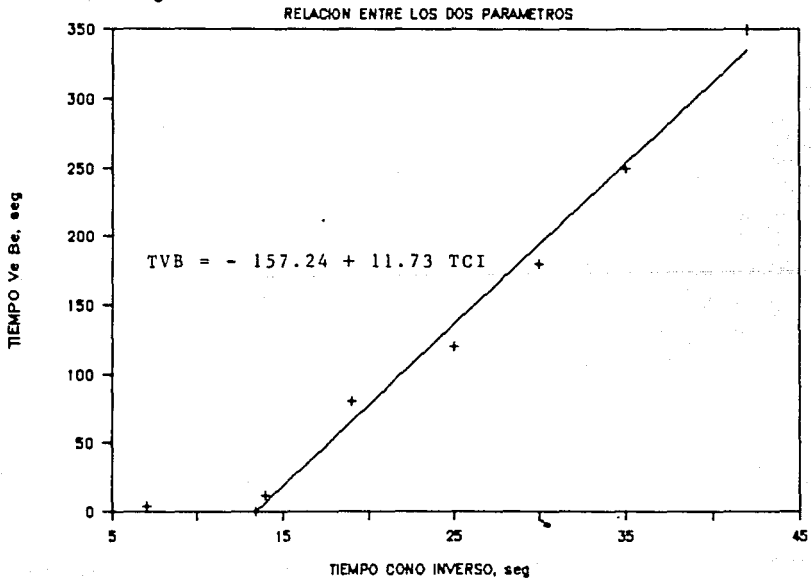


Fig 5.7 PESO VOLUMETRICO FRESCO

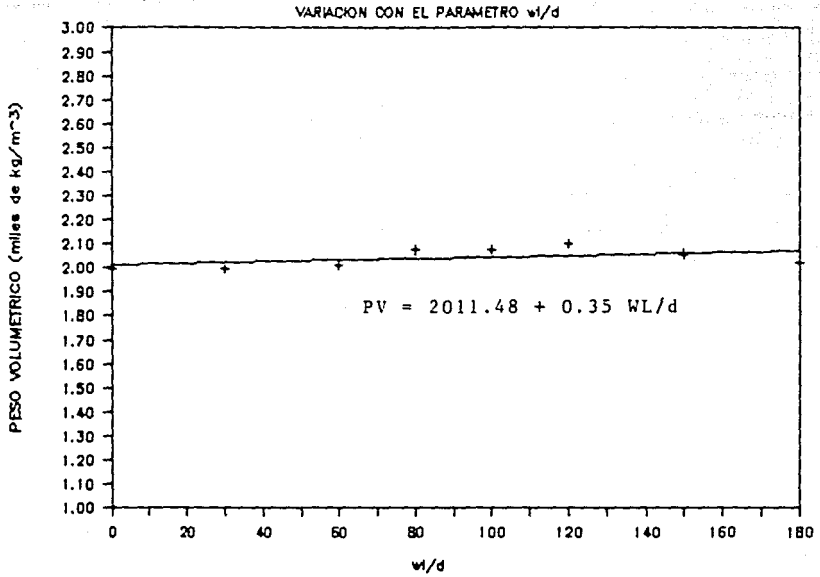


Fig 5.8 RESISTENCIA A COMPRESION

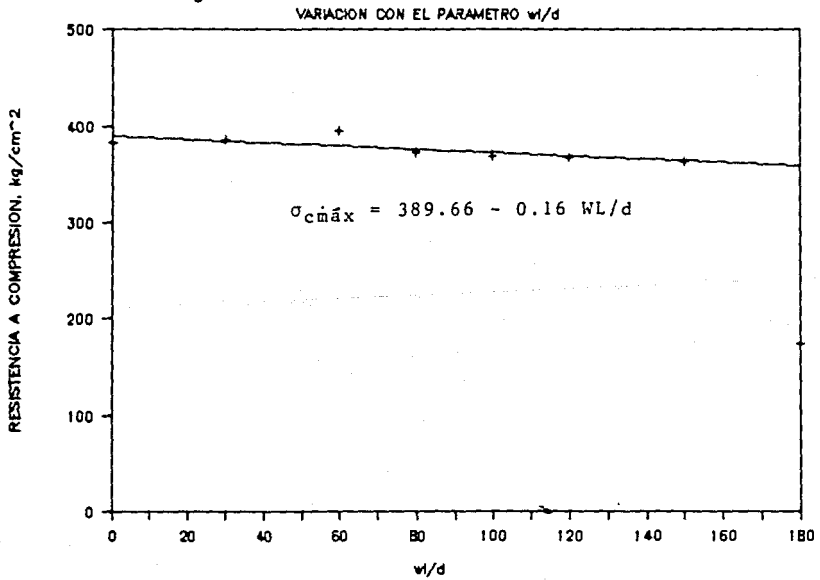


Fig 5.9 RELACION ESFUERZO-DEFORMACION

CONCRETO SIMPLE Y CONCRETO CON FIBRAS

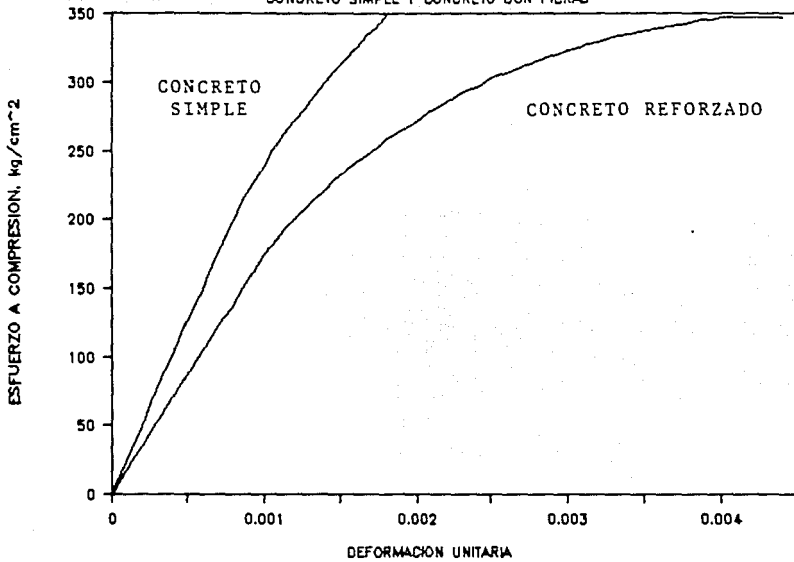


Fig 5.10 MODULO DE ELASTICIDAD

INFLUENCIA DEL PARAMETRO w/d

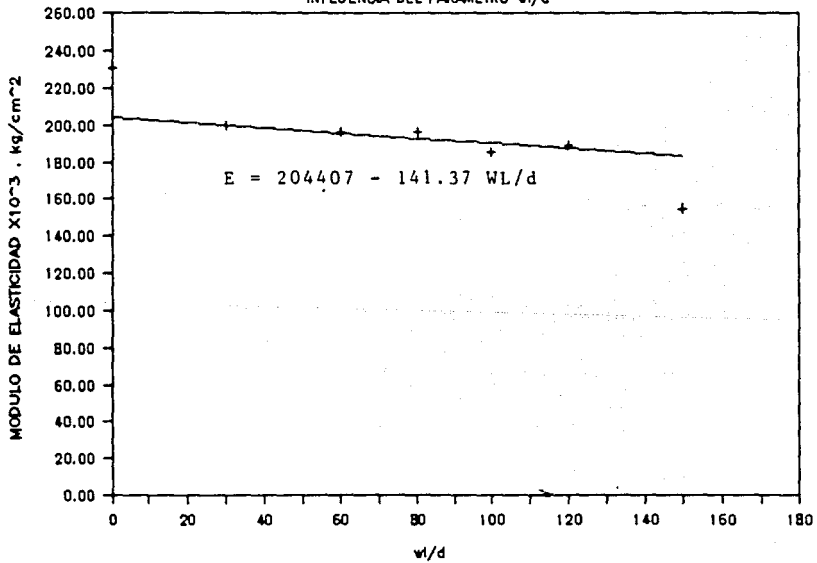


Fig 5.11 DEF. AL ESFUERZO MAXIMO

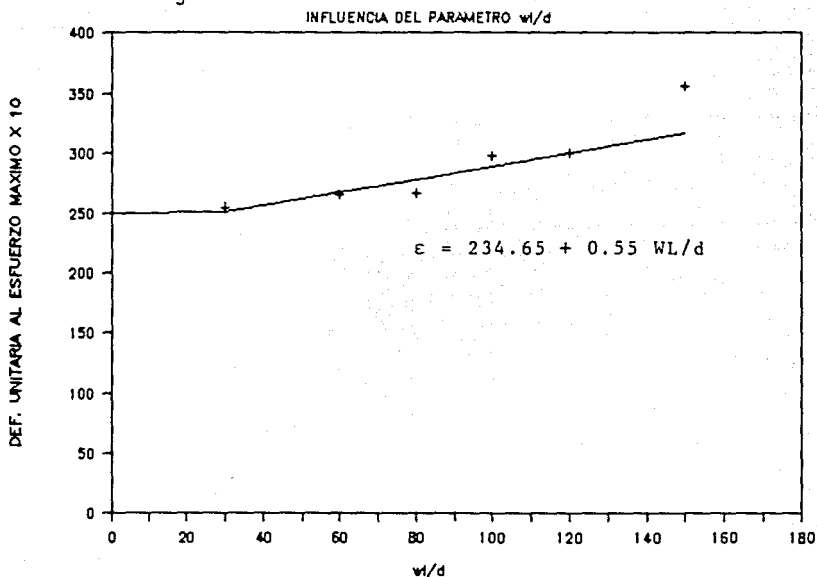
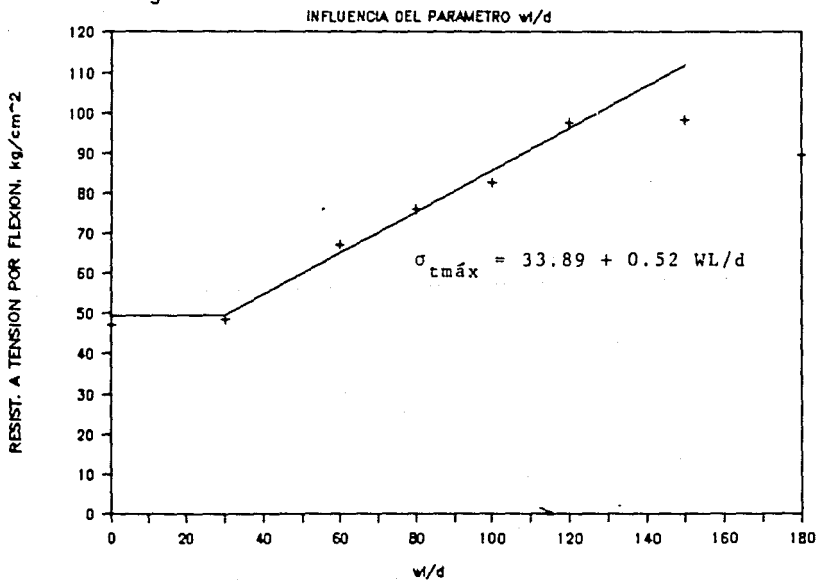
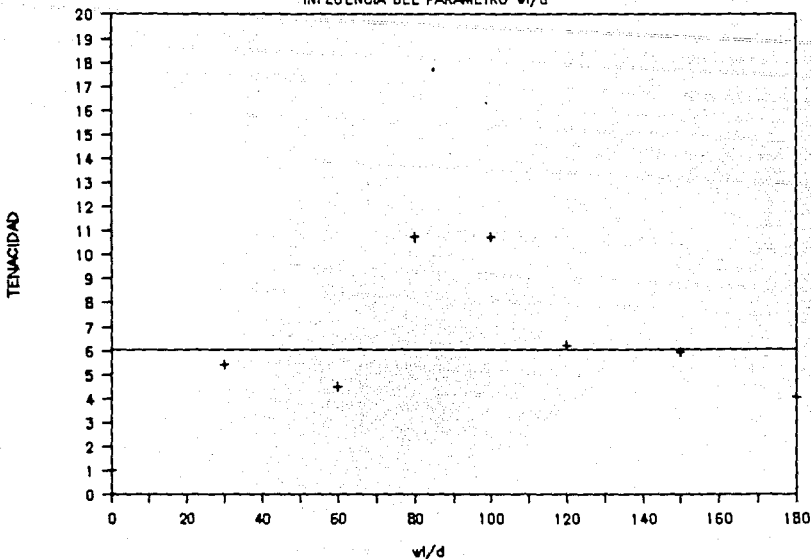


Fig 5.12 RESIST. A TENSION POR FLEXION



### Fig 5.13 TENACIDAD

INFLUENCIA DEL PARAMETRO  $w/d$



### Fig 5.14 RESISTENCIA A CORTANTE

INFLUENCIA DEL PARAMETRO  $w/d$

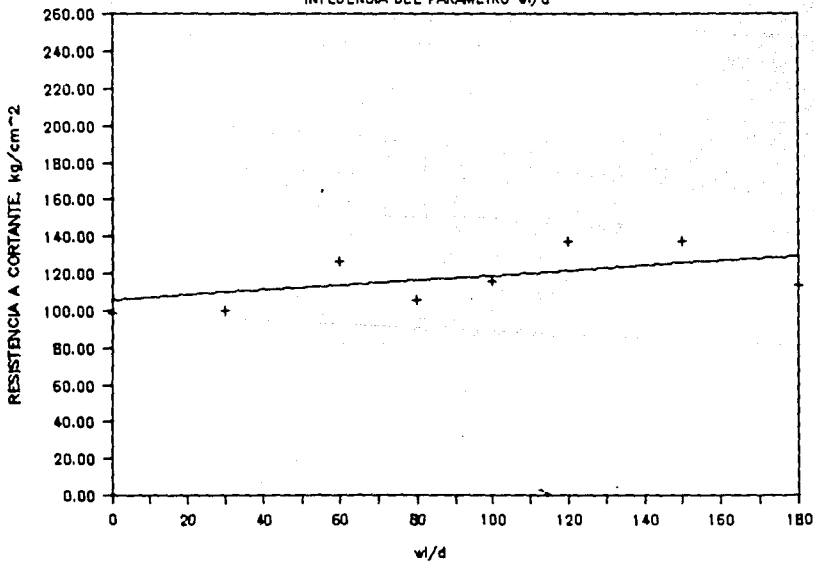


Fig 5.15.a CONTRACCION POR SECADO

(VOLUMEN DE FIBRA : 0.0 %)

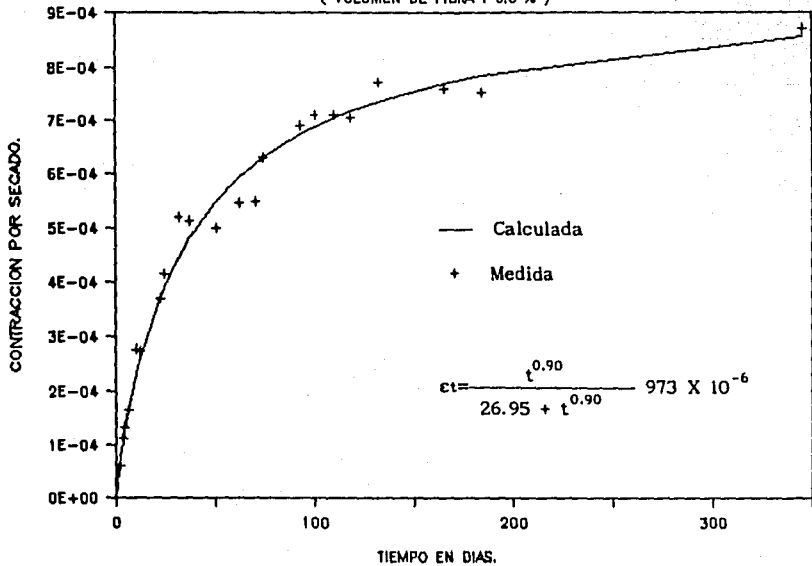


Fig 5.15.b CONTRACCION POR SECADO

(VOLUMEN DE FIBRA : 0.3 %)

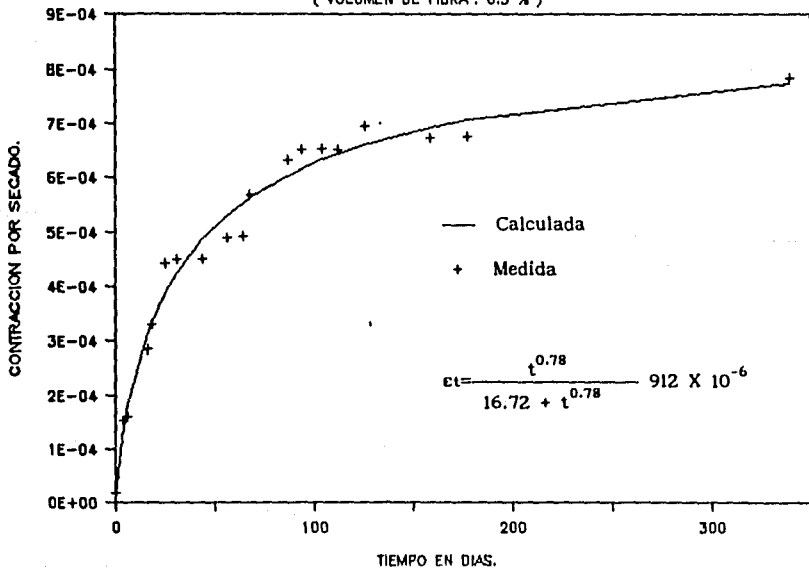




Fig 5.15.c CONTRACCION POR SECADO

( VOLUMEN DE FIBRA : 0.6 % )

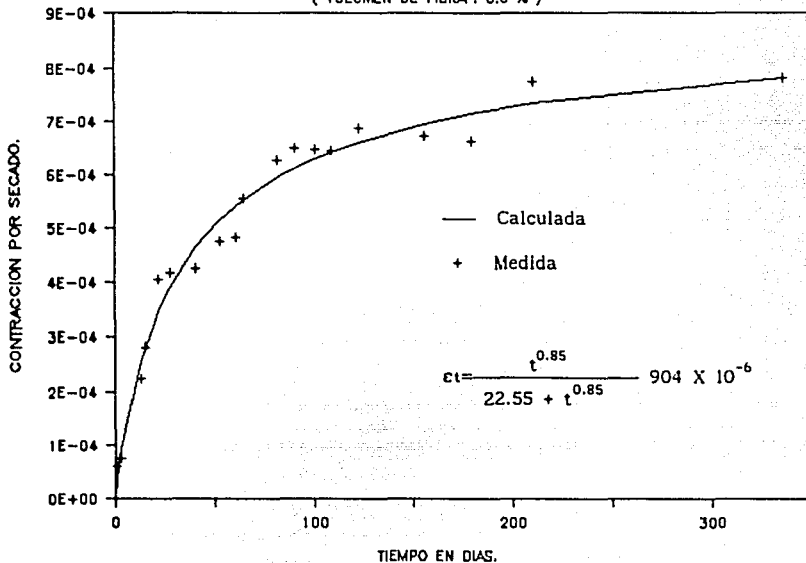


Fig 5.15.d CONTRACCION POR SECADO

( VOLUMEN DE FIBRA : 0.8 % )

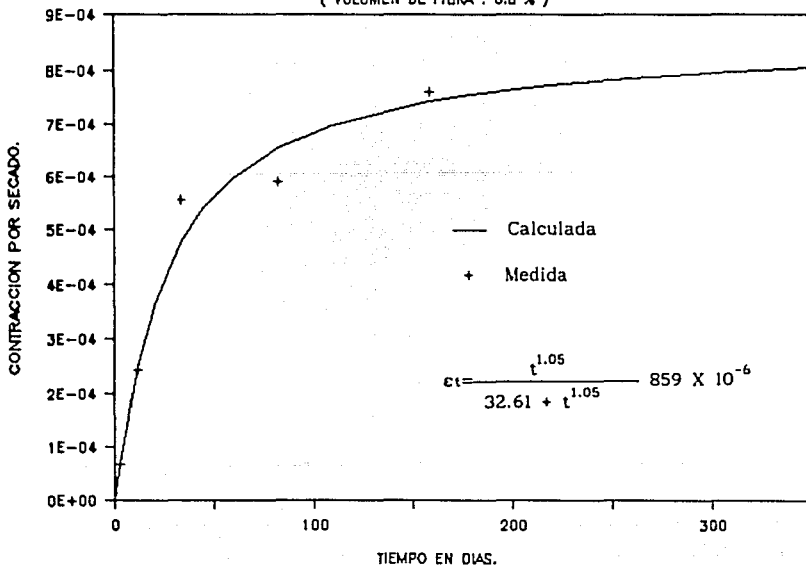


Fig 5.15.e CONTRACCION POR SECADO

( VOLUMEN DE FIBRA : 1.0 % )

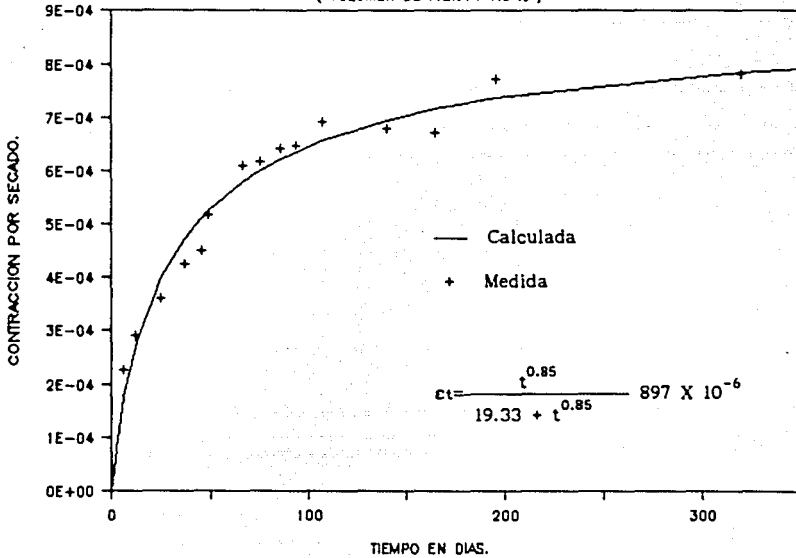


Fig 5.15.f CONTRACCION POR SECADO

( VOLUMEN DE FIBRA : 1.2 % )

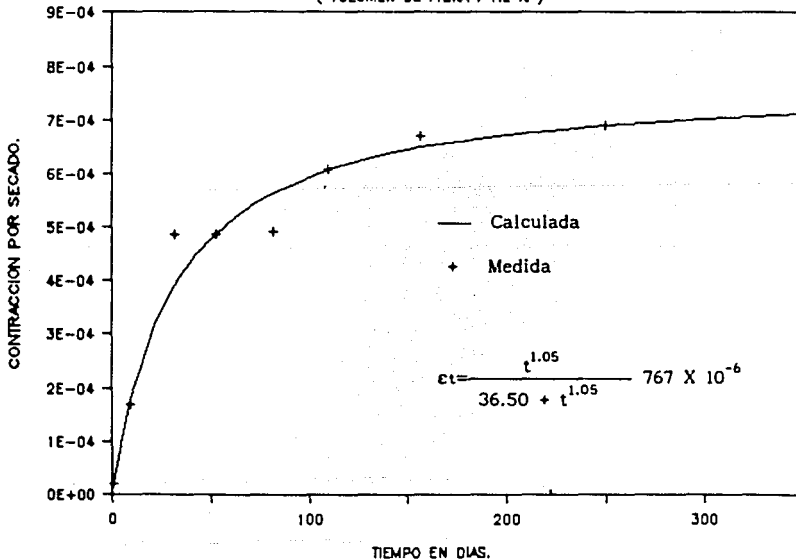


Fig 5.15.g CONTRACCION POR SECADO

( VOLUMEN DE FIBRA : 1.5 % )

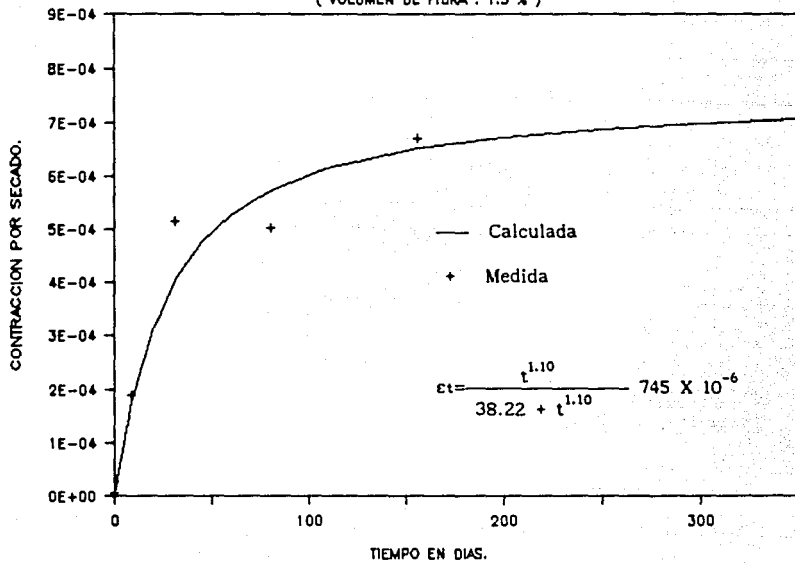


Fig 5.15.h CONTRACCION POR SECADO

( VOLUMEN DE FIBRA : 1.8 % )

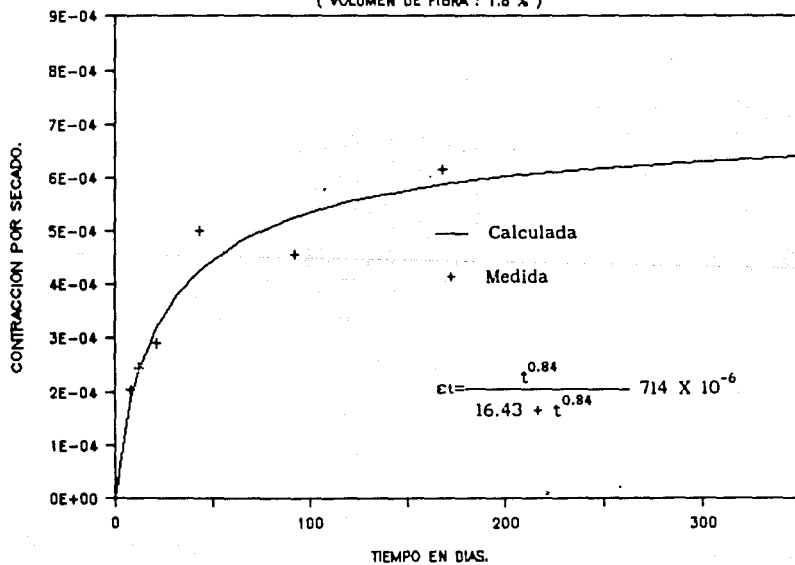


Fig 5.16 CONTRACCION POR SECADO

INFLUENCIA DEL PARAMETRO  $w/d$

