

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA.

1-1460

JOSE ENRIQUE HERAS DELGADILLO

4
2ej

T E S I S

PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA

FACULTAD DE INGENIERIA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER

EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERIA

DE CONSTRUCCION

CIUDAD UNIVERSITARIA, AGOSTO DE

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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.

CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO-USOS Y PROPIEDADES.

I N D I C E .

	Página.
1 INTRODUCCION	1
2 ANTECEDENTES HISTORICOS	4
2.1 Revisión Bibliográfica	5
2.1.2 Propiedades Físicas y Mecánicas del Concreto Reforzado con fibras.	6
2.1.3 Concepto de espaciamiento.	8
2.1.4 Concepto de Materiales compuestos.	8
2.2 Resistencia ultima y Tenacidad del Concreto Reforzado con Fibras.	10
2.3 Resistencia a la Fatiga	11
2.4 Corrosión de las fibras de acero.	12
2.5 Diseño, Mezclado y colocación de mezclas.	13
2.5.1 Efecto del Diámetro y longitud de las Fibras sobre la trabajabilidad de las mezclas.	14
2.5.2 Influencia del contenido y tamaño má- ximo del agregado sobre la trabajabi- lidad de las mezclas con fibras.	15
2.5.3 Métodos de mezclado	16
2.5.4 Colocación de mezclas de concreto con fibras.	18
2.6 Aplicaciones desarrolladas con concreto re- forzado con fibras de acero.	20
3 CONCEPTOS GENERALES SOBRE CONCRETO LANZADO	22
3.1 Definición	23
3.1.2 Propiedades del concreto lanzado	25
3.2 Mezclas de Concreto lanzado reforzado con Fibras	25
3.3 Factores que afectan el rebote de fibras.	28

4	COMPORTAMIENTO TEORICO DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO.	30
4.1	Tensión Uniaxial	32
4.2	Tensión por Flexión	41
4.3	Análisis Teórico flexión Post- Agrietamiento	43
5	ESTUDIO EXPERIMENTAL EN UN TUNEL DE LA LINEA 7 DEL METRO.	54
5.1	Hipótesis de Trabajo	55
5.2	Metodología	56
5.3	Materiales	59
5.4	Pruebas de Mezclado en Laboratorio y campo	60
5.5	Colado de Especímenes de Laboratorio	60
5.6	Pruebas de Lanzado en campo	61
5.7	Curado estandar y acelerado	62
5.8	Ensayes a compresión y flexión.	62
5.9	Pruebas especiales.	62
6	RESULTADOS EXPERIMENTALES	64
6.1	Mezclado y colado	65
6.2	Lanzabilidad de Mezclas	67
6.3	Propiedades Mecánicas	67
6.4	Comparativa de resultados con los obtenidos en pruebas realizadas en el extranjero.	70
7	CONCLUSIONES	72
ANEXO 1	Figuras 1 a 77	77
ANEXO 2	Tablas 1 a 89	156
	Referencias Bibliográficas	183

I N T R O D U C C I O N .

1 INTRODUCCION

Durante la concepción y diseño de las obras de Ingeniería, una de las decisiones más importantes que deben tomarse, es la relacionada con la selección de los materiales de construcción. Se espera que, además de reunir una serie de características físicas, químicas y mecánicas que los hagan idóneos para una aplicación particular, se comporten adecuadamente durante el proceso constructivo y a lo largo de la vida útil de la estructura.

Actualmente, el ingeniero dispone de la información científica relacionada con el comportamiento de los materiales, en forma de propiedades o valores índice, los cuales se encuentran tabulados en los libros sobre resistencia de materiales. En estos se describe el equipo y procedimientos de ensaye necesarios para obtener, entre otras características mecánicas, el esfuerzo de fluencia del acero, módulos elásticos, capacidad del concreto a compresión y resistencia al cortante.

A pesar de la existencia de conceptos teóricos, requerirá un conjunto de coeficientes que defina el material al cual se trata de aplicar, razón por la que la mayoría de las propiedades o valores índice se definen experimentalmente y el ensaye de materiales adquiere su papel preponderante en el diseño y selección de materiales que formarán una estructura determinada.

Consiente de lo anterior y de la necesidad de abatir costos y acelerar la construcción de las nuevas instalaciones del Metro de la Ciudad de México, la dependencia encargada, de su construcción COVITUR, solicitó se estudiara la factibilidad teórica de emplear el concreto reforzado con fibras metálicas, en la construcción del revestimiento primario y definitivo de los túneles del Metro.

Antes de elaborar una propuesta de investigación, se realizó una búsqueda bibliográfica a fin de conocer el estado del arte sobre concreto reforzado con fibras con aplicación cada vez más frecuente en países tales como E.U.A., Australia, Noruega, Suecia, etc.

En el presente trabajo se dan a conocer los resultados de un estudio experimental desarrollado para conocer y evaluar las propiedades físicas y mecánicas del concreto hidráulico reforzado con fibras metálicas y factible de producirse con el cemento y agregados pétreos de uso común en las obras del Metro de la Ciudad de México.

El capítulo 2 describe a través de una revisión bibliográfica los antecedentes históricos del concreto reforzado con fibras.

Los conceptos generales sobre el concreto lanzado se describen en el capítulo 3.

El capítulo 4 trata sobre el comportamiento teórico del concreto reforzado con fibras de acero.

Así mismo en el capítulo 5 se detalla el procedimiento para obtener especímenes de ensayo a partir de muestras de concreto lanzado en túnel, procedimiento de prueba y medición de deformaciones.

Los resultados experimentales son presentados en el capítulo 6 los cuales justifican el empleo de fibras metálicas de producción nacional.

Finalmente se presentan una serie de conclusiones a dicho trabajo.

2 ANTECEDENTES HISTORICOS.

2. ANTECEDENTES HISTORICOS.

3.1 Revisión Bibliográfica.

Definición.

El nombre "concreto" se le da a un material compuesto que consiste de una matriz aglomerante y de un aglomerado, generalmente partículas o fragmentos de roca relativamente inertes.

En el caso del concreto de cemento tipo Portland, el aglomerante o matriz, tanto en estado plástico como endurecido, es una combinación de agua y cemento hidráulico tipo Portland, que en la práctica se conoce como pasta de cemento.

Al aglomerado se le llama agregado, como característica principal se puede mencionar que sus partículas se gradúan por tamaño, desde arena fina hasta fragmentos de roca que en algunos tipos de concreto pueden alcanzar varios centímetros de diámetro.

Una desventaja de las matrices de cementos hidráulicos es la naturaleza frágil de falla, la que puede ocurrir bajo un sistema de esfuerzos de tensión o cargas de impacto. Esta desventaja se ha resuelto con el uso de "refuerzo", constituido por materiales que tienen capacidad para resistir esfuerzos de tensión como el acero, el cual se emplea desde hace varios años, en forma de barras con diferente diámetro y en función de los requisitos de resistencia.

Alrededor de los años 50 se inició una serie de estudios con objeto de establecer el comportamiento del concreto de cemento tipo Portland reforzado con fibras cortas de acero.

Historicamente, la idea de reforzar materiales frágiles mediante el uso de fibras proviene desde hace unos 2000 años y existe evidencia arqueológica de adobes reforzados con paja, así como de estucos y frescos en los que se emplearon crines de caballo para impedir agrietamiento y mejorar su resistencia mecánica.

El advenimiento de las fibras plásticas como el poliéster, rayón, nylon, pvc, polietileno y polipropileno, promovió alrededor de los años 60, varias investigaciones en las que se emplearon como refuerzo, combinadas o no con barras y mallas electrosoldadas (ref.26). De igual manera se procedió en las fibras de vidrio a principios de los 50 tanto en Estados Unidos como Inglaterra y la Unión Soviética (refs. 18, 20, 23, y 27.)

2.1.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS.

De la tecnología de materiales compuestos se conoce que el comportamiento del compuesto depende esencialmente de las propiedades físicas de las fibras y matriz, así como de los esfuerzos de adherencia que se desarrollen en la interfase. Las fuerzas de adherencia pueden estar en función de reacciones químicas entre la superficie de la fibra y matriz aglomerante o regidas por fricción debida a dobleces y rugosidades propias del tipo de fibra (figura 1).

Cuando el concreto reforzado con fibras se somete a esfuerzos de tensión por flexión muestra un comportamiento diferente al concreto simple y se pueden identificar en su curva carga-deflexión dos estados como se muestra en la figura 2; en el primero existe una relación aproximadamente lineal entre cargas y deflexiones. Después de un punto en el que se alcanza el límite de proporcionalidad, a partir del cual, la curva deja de ser significativamente no lineal hasta que alcanza un punto, generalmente superior al límite de proporcionalidad, en el que el material pierde capacidad para absorber esfuerzo y la curva de comportamiento de flexión muestra un claro descenso.

Las curvas carga-deflexión que se pueden obtener del ensayo de especímenes reforzados con fibras, difieren en geometría y valores de carga y deflexión ya que su comportamiento a tensión por flexión lo determina el tipo, longitud, orientación, y cantidad de fibras por volumen unitario de concreto.

Para una mezcla en particular, el contenido geometría y distribución de fibras es tan importante para el material compuesto como la relación agua-cemento, contenido de aire, densidad y trabajabilidad lo es para el concreto simple. No debe olvidarse que todas estas variables influyen en el comportamiento del concreto reforzado con fibras ya que cualquier deficiencia altera la adherencia entre matriz y refuerzo.

Desde que se iniciaron los estudios para caracterizar el concreto reforzado con fibras, se han propuesto dos mecanismos para predecir la resistencia al agrietamiento, o hasta el límite de proporcionalidad (figura 2). El primero relaciona la primera grieta con el concepto de espaciamiento entre centroides de fibras, el otro, relaciona el límite de proporcionalidad con el volumen, orientación y relación aspecto de las fibras. El concepto de espaciamiento se basa en la capacidad que tienen las fibras para detener el avance de una grieta y en los conceptos de la mecánica elástica de fractura. El otro mecanismo de falla se basa en la ley de las mezclas para materiales compuestos.

Se considera importante mencionar que la mayoría de los autores consultados coinciden en afirmar que la resistencia última del concreto reforzado con fibras es relativamente insensible al espaciamiento entre centroides de fibras y que, depende fundamentalmente del contenido, relación, aspecto y adherencia entre matriz y fibras.

Como se mencionó en los años 50 Romualdi y Batson ref. 11 y Romualdi y Mondel ref. 14 estudiaron el comportamiento del concreto reforzado con segmentos cortos de alambre, poco espaciados y distribuidos aleatoriamente en la matriz de concreto. Sus estudios produjeron a principios de los años 60 una patente basada en el concepto de espaciamiento de fibras. A fines de los 50 la Portland Cement Association (PSA) estudió el comportamiento del concreto reforzado con fibras de diámetro y longitud diferentes. Los resultados de sus estudios le permitieron obtener a principios de los años 60, una patente basada en los conceptos de adherencia y la relación aspecto. Esta última se define como la relación entre la longitud de la fibra y el diámetro de la misma.

A partir de estos primeros estudios se definió el concreto reforzado con fibras como el material compuesto de una matriz heterogénea de concreto o mortero de cemento tipo Portland y fibras cortas distribuidas aleatoriamente en su masa.

El objeto de la presencia de estas fibras en la matriz es para mejorar la resistencia a tensión, flexión e impacto, así como para controlar el agrietamiento y modo de falla, impartiendo ductilidad post-agrietamiento.

La fibra se define por su relación aspecto, antes descrita la cual varía entre 30 y 150 para longitudes entre 6.4 y 76 mm. Existen fibras metálicas, plásticas, de vidrio, asbesto y de celulosa.

Las fibras de acero se producen por corte de alambres cuyo diámetro típico varía entre 0.25 y 0.8 mm., o a partir de alambre aplanado con secciones transversales de 0.15 a 0.4 mm. de espesor y anchos de 0.25 a 0.9 mm., en la tabla 1 se indican las propiedades de las fibras comúnmente empleadas como refuerzo del concreto y en la fig. 1 se muestran las geometrías típicas de las fibras de acero que se producen actualmente en diversos países.

2.1.3 CONCEPTO DE ESPACIAMIENTO.

La resistencia mecánica de materiales como el concreto y mortero de cemento tipo Portland, que presentan una microestructura fisurada inherente a su naturaleza química, puede incrementarse mejorando su tenacidad a la fractura al disminuirse el tamaño de fisuras y reducir el factor de intensidad de esfuerzo en la punta de las microfisuras internas.

El enfoque básico de los estudios de Romualdi y Batson (-ref. 12-) fué el de incrementar la resistencia de los morteros de cemento tipo Portland, disminuyendo el factor de intensidad de esfuerzo mediante el empleo de alambres, poco espaciados entre centros como inhibidores de la propagación de grietas. En la figura 3 se muestra la correlación teórica entre los valores calculados del esfuerzo de agrietamiento y el espaciamiento de fibras en la matriz de mortero, para varios contenidos de fibras y valores de intensidad de esfuerzo.

Posteriormente Romualdi y Mandel (-ref. 14-) demostraron que los valores teóricos se pueden alcanzar mezclando fibras cortas directamente en el mortero. En la figura 4 se muestran los resultados experimentales comparados con valores teóricos de resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras metálicas, en función del espaciamiento entre fibras.

En la figura 5 se ilustra el comportamiento a flexión, en función del espaciamiento.

Si se hace un exámen crítico del concepto de espaciamiento y de los resultados experimentales reportados en la literatura, queda claro que la resistencia del concreto reforzado con fibras metálicas no es tan sensible a la separación entre alambres sino a la relación aspecto y volumen de refuerzo.

2.1.4 CONCEPTO DE MATERIALES COMPUESTOS.

Cuando una viga de concreto o mortero simple se somete a incrementos de carga, se presentará la falla en el momento en que la zona de tensión se agriete. Normalmente se considera a este tipo de falla como frágil, sin embargo debe notarse que el agrietamiento del concreto o mortero de cemento tipo Portland,

no es un fenómeno discreto como lo demuestran los experimentos con película de alta velocidad y mediciones cuidadosas, las cuales revelan que la falla se debe a un proceso de microagrietamiento cuyo proceso y desarrollo genera la grieta principal.

En el caso del concreto reforzado con fibras sometido a incrementos de carga, se observa que tiene un comportamiento casi lineal - hasta un punto conocido como límite de proporcionalidad. Del estudio de las curvas carga-deflexión puede asumirse que la matriz y el refuerzo se comportan elásticamente hasta este punto, el cual también se conoce como resistencia a la primera grieta.

Debido a que el acero de refuerzo tiene un módulo elástico del orden de 10 veces mayor que el del concreto simple, el módulo elástico del concreto reforzado con fibras se incrementa o disminuye en función del contenido de fibras. Sin embargo debe considerarse que existe una diferencia, entre reforzar con barras continuas orientadas y hacerlo con fibras cortas discontinuas y distribuidas aleatoriamente. Normalmente se aprecia que para volúmenes iguales de refuerzo con fibras el módulo elástico del compuesto es menor que cuando se emplean barras.

La siguiente ecuación proporciona una idea aproximada de la influencia de las fibras sobre las propiedades elásticas del material compuesto.

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m$$

En esta ecuación E_c , E_f , y E_m representan el módulo elástico del material compuesto, fibras y matriz respectivamente, V_m y V_f son los volúmenes unitarios de la matriz y fibras. La ecuación se puede considerar estrictamente válida en el caso de compuestos reforzados con fibras continuas, comportamiento elástico de los materiales integrantes y que no exista falla de adherencia entre matriz y refuerzo.

Debido a que las fibras, comunmente empleadas para reforzar al concreto, son cortas, se puede presentar microagrietamientos antes de alcanzar el límite de proporcionalidad teórica, esto mismo sucede si el refuerzo falla por adherencia y desliza. Por lo que la ecuación propuesta solo representa el valor superior que puede alcanzar el concreto reforzado con fibras. En el capítulo 4, de este trabajo se expondrán algunos procedimientos teóricos que pueden predecir la influencia de la orientación, contenido y relación aspecto sobre las propiedades mecánicas de los materiales compuestos.

1.2 RESISTENCIA ULTIMA Y TENACIDAD DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS.

En la figura 2, se puede observar que la curva carga-deflexión deja de ser lineal, después de que se alcanza el valor de la carga que produce la primera grieta, el material es capaz de soportar mayor esfuerzo hasta un máximo, marcado con la letra B. Este valor recibe el nombre de resistencia última y, a diferencia del concreto convencional, está en función de la fricción desarrollada entre fibras y matriz mientras se van extrayendo. Generalmente el refuerzo no alcanza el esfuerzo de fluencia o de falla, debido a que los esfuerzos de adherencia y fricción son menores que estos valores.

Una vez que se alcanzó la resistencia última, la velocidad con que crece la capacidad de carga de una viga de concreto reforzado con fibras, está en función de la rapidez con que deslizan las fibras. Como resultado de esto, la energía de deformación que el elemento puede absorber quedará determinada por el área bajo la curva carga-deflexión.

Según los autores consultados ref. 35, 37, y 42 la energía de deformación puede incrementarse entre 10 y 40 veces más que el concreto sin refuerzo.

La energía generalmente, se absorbe en los mecanismos de alargamiento, deslizamiento y pérdida de adherencia de las fibras. La magnitud relativa de cada uno de estos aspectos depende de la curva esfuerzo-deformación unitaria de las fibras. Aunque la mayoría de los artículos consultados reportan resultados de pruebas de flexión, existe evidencia experimental de la influencia de las fibras en el comportamiento del concreto sujeto a esfuerzos de tensión uniaxial (refs. 15, 21) y 48 que demuestra la ductilidad e incremento en tenacidad que adquiere el material reforzado.

Existen dos parámetros, cuya influencia en las propiedades mecánicas determinan la carga última en flexión, uno es el volumen de refuerzo en por ciento y el otro la relación aspecto de las fibras. Se ha demostrado experimentalmente que cuando el volumen de fibras se incrementa, también la resistencia aumenta en proporción casi lineal, siempre y cuando se evite la segregación de fibras. De manera similar se ha demostrado que a relaciones aspecto crecientes, hasta un valor cercano a 150, mayor resistencia última del material compuesto. Con base a estas observaciones se propuso la siguiente ecuación:

$$S_c = A S_n (1 - V_f) + B V_f L/D$$

S_c y S_m son los valores del esfuerzo último del material compuesto y de la matriz, respectivamente, L/D es la relación aspecto, V_f es el volumen unitario de fibras, A y B son constantes que se obtuvieron experimentalmente. En la figura 6 se muestra el tipo de gráficas que posibilitan la determinación de las constantes A y B . Las investigaciones realizadas en la Universidad de Sheffield establecen los valores de estas constantes en 0.97 y 3.41 respectivamente para la resistencia última del concreto reforzado con fibras sujeto a flexión y de 0.843 y 2.93 para la primera grieta o resistencia al agrietamiento.

En esta ecuación, el primer término del lado derecho representa la contribución de la matriz a la resistencia última y el valor máximo que la constante A puede alcanzar es 1.00. La constante B depende del esfuerzo de adherencia entre fibras y matriz, así como la aleatoriedad de la distribución del refuerzo en el concreto. Debe mencionarse que esta ecuación es válida cuando la falla ocurre por adherencia.

2.3 RESISTENCIA A LA FATIGA.

Con objeto de establecer la resistencia del concreto reforzado con fibras metálicas a la fatiga por flexión se han realizado varios estudios experimentales. Las pruebas consistieron en someter a vigas de concreto y mortero de cemento tipo Portland a varios miles de ciclos de aplicación de carga refs. 38, 41, 47 y 50

Es notorio el hecho de que para un tipo de fibra cualquiera se logran incrementos significativos en la resistencia por fatiga, conforme aumenta el contenido de fibras en la matriz de concreto.

La literatura reporta (ref. 38 y 45) que al añadir fibras al concreto reforzado con barras de acero (vigas), incrementa la resistencia por fatiga de los elementos y reduce el ancho de grieta. Así mismo se ha demostrado que al incrementar la resistencia por fatiga de la vigas de concreto reforzado se disminuyen las deflexiones causadas por el sistema de esfuerzos.

2.4 CORROSION DE LAS FIBRAS DE ACERO.

Con objeto de conocer la susceptibilidad de las fibras de acero a la corrosión, se han ejecutado varios estudios consistentes en sumergir especímenes de concreto reforzado con fibras en soluciones acuosas de cloruro de sodio. En estas investigaciones se ha observado que, después de 90 días de exposición a ciclos de humedecimiento y secado, los especímenes no se atacaron y la resistencia a flexión permaneció prácticamente sin cambio, aún en probetas con 2% de volumen de refuerzo.

En las pruebas a largo plazo ejecutadas en los laboratorios Bettelle, en Columbus, Ohio, se observó que después de 7 años de exposición al efecto de sales de cloruro de sodio y calcio, sólo causó corrosión en las fibras superficiales y/o expuestas en los especímenes, de ensayo, sin detrimento de la resistencia a flexión. Resultados similares se obtuvieron en pruebas de intemperismo, realizadas a lo largo de 10 años de exposición a un ambiente industrial. Las propiedades mecánicas permanecieron casi sin variación. El deterioro de fibras sólo ocurrió en las superficiales o en las francamente expuestas.

En otro estudio, se determinó que la resistencia a compresión de morteros y concretos reforzados con fibras metálicas, disminuyó en 15% después de 10 años de exposición al agua marina.

2.5 DISEÑO, MEZCLADO Y COLOCACION DE MEZCLAS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS.

Conforme se desarrolla el campo de la tecnología del concreto reforzado con fibras, se acerca el momento en que el ingeniero deberá contar con los criterios y parámetros de diseño de mezclas, simples y rápidas de aplicar, de manera que pueda aprovechar al máximo las propiedades físicas y mecánicas que hacen atractivo el uso del material en la construcción de obras de ingeniería o en la fabricación de elementos de concreto.

Una de las primeras dificultades que encuentra el técnico que trata de incorporar fibras a una mezcla de concreto, proporcionada de manera convencional y con agregados de tamaño máximo superior a 10 mm. es la falta de uniformidad en el mezclado y compactación deficiente, esto tiene por consecuencia que el concreto reforzado con fibras se desechó por dificultades de producción. Afortunadamente la experiencia ganada en este campo ha permitido desarrollar varios métodos de diseño de mezclas que aceptarán fácilmente una cantidad suficiente de fibras, del tipo apropiado, como para lograr una comparación aceptable y que en estado endurecido exhibirán las propiedades mecánicas que hacen al concreto reforzado con fibras, el material atractivo para resolver ciertos problemas constructivos.

La mayoría de los métodos de diseño está relacionada con las propiedades de trabajabilidad, facilidad de mezclado y compactación que deben reunir las mezclas de concreto reforzado con fibras para satisfacer las necesidades de una aplicación en particular. Esto implica que los procedimientos de diseño de mezclas en realidad son recomendaciones y que para cada caso será necesario realizar una serie de mezclas de prueba, que irán ajustándose a los requisitos de la obra, equipo y procedimiento constructivo que se empleen.

Se dice que los métodos de diseño son en realidad recomendaciones porque diseñar en función de la trabajabilidad implica que este parámetro es perfectamente determinable para mezclas de concreto con fibras, sin embargo las tres pruebas de laboratorio, que comúnmente se emplean para medir la trabajabilidad del concreto, tales como revenimiento, factor de compactación y la prueba de re-moldeo o Ve Be no son tan precisas en el caso de concreto con fibras.

La prueba de revenimiento tiene posibilidades de ser un control sólo en el caso de que la mezcla de concreto tenga una medida de revenimiento superior a 10 cm. antes de colocar las fibras o en el caso de que se empleen aditivos inclusores de aire y/o reductores de agua. Pero en el caso de concretos de alta resistencia, tienden a tener una medida de revenimiento próximo a cero, y esto no significa que la mezcla de concreto con fibras se pueda colocar y compactar adecuadamente.

La prueba Ve Be, que consisten en medir el tiempo de remoldeo del concreto, desde la geometría de cono de revenimiento hasta un cilindro mediante vibración externa es, probablemente, una de las pruebas que se ajustan mejor a las características reológicas de las mezclas de concreto reforzado con fibras, porque simula en cierta medida la energía de compactación que requiere el material. Asimismo, identifica con certeza el volumen crítico de refuerzo según el tipo de fibra que se vaya a emplear.

En el caso de concreto con fibras como en el del normal, la mejor manera de lograr la trabajabilidad adecuada a las necesidades particulares de una obra, es mediante la ejecución de mezclas de prueba que permitan llegar al diseño óptimo.

2.5.1 EFECTO DEL DIAMETRO Y LONGITUD DE LAS FIBRAS SOBRE LA TRABAJABILIDAD DE LAS MEZCLAS.

Existe una serie de observaciones sobre el comportamiento de un grupo de fibras cuando se agitan, por ejemplo, si varias fibras largas y delgadas con una relación aspecto (diámetro/longitud) mayor de 100 se sacuden, muestran una tendencia a entrelazarse y formar un tejido o un nudo en forma de nido de pájaro el cual resulta difícil de desbaratar mediante vibración.

Cuando las fibras se dispersan en matrices de mortero o concreto de cemento, se observa un efecto similar y la facilidad con que las fibras se pueden mover dentro de la masa de la matriz al aplicar vibración se muestran en la fig. 7, la cual se elaboró con las medidas obtenidas de pruebas realizadas con el equipo Ve Be y morteros con tamaño de partículas inferior a 5 mm. De esta figura se pueden deducir que la relación L/d determina el volumen de fibras máximo factible de adicionar a una mezcla para que se compacte adecuadamente.

2.5.2. INFLUENCIA DEL CONTENIDO Y TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO SOBRE LA TRABAJABILIDAD DE MEZCLAS DE CONCRETO CON FIBRAS.

El problema del entrelazamiento de fibras se complica cuando se mezcla con una matriz de concreto y la dificultad para desbaratar los "nidos" es mayor que en el caso de una matriz de mortero, debido al tamaño de partícula de agregado grueso, que en la mayoría de los casos excede el espaciamiento promedio entre fibras, si éstas estuvieran uniformemente distribuidas.

Por lo general, el agregado grueso cuyo tamaño de partícula es superior a los 5 mm., promueve el entrelazamiento por rebote y el efecto se acentúa conforme el contenido de agregado grueso se incrementa en la mezcla.

La figura 8 muestra en forma esquemática que la dispersión uniforme de fibras en la matriz de concreto se dificulta conforme el tamaño de partículas de agregado aumenta desde 5 hasta 20 mm. debe tomarse en cuenta que ésta es una representación simplificada de lo que ocurre en realidad, pues en una matriz de concreto la distribución de fibras y agregado es tridimensional, por lo que resulta muy probable encontrar hasta 200 fibras en un cubo de mortero cuya dimensión lateral sea igual a la longitud de las fibras. De esta figura puede deducirse que conforme se incrementa el tamaño y volumen del agregado grueso mayor será la tendencia al entrelazamiento de fibras.

En una mezcla de concreto simple, las partículas menores de 5 mm. ocupan un volumen aproximado de 34%, las de 10 mm., el 20% y las de 20 mm. cerca del 15%, por lo que solo el 54% del volumen total de la matriz está disponible para permitir el movimiento de las fibras durante las operaciones de compactación.

En la figura 9, se muestra el efecto del tamaño y contenido de agregado grueso sobre los tiempos de compactación medidos con el equipo Be Ve, para un valor de relación aspecto igual a 100. De esta figura se puede deducir que para un tiempo Be Ve de 20 segundos, el concreto con agregado grueso de 10 mm. acepta la mitad de fibras, que el mortero y que el contenido de refuerzo se reduce, aún más, cuando se emplea agregado grueso de 20 mm. Estos resultados se deben al efecto combinado del tamaño y contenido de agregado grueso.

2.5.3 METODOS DE MECLADO.

El meclado del concreto reforzado con fibras se puede lograr de varias maneras, la elección del procesamiento dependerá de las necesidades de la obra, y de los recursos técnicos disponibles, es decir, se pueden emplear revolventadoras de campo, plantas de concreto, premezcladoras y/o meclado a mano. Lo importante es obtener una mezcla uniforme donde las fibras se encuentren totalmente dispersas y se evite la segregación o entrelazado de fibras durante el meclado. La segregación o entrelazado de fibras se relaciona con varios factores, entre los más importantes está la relación aspecto, el tamaño máximo de agregado grueso, el contenido de fibras, relación agua-cemento y procedimiento de mezcla.

La mayoría de los problemas de entrelazado y formación de nidos - ocurre durante la dosificación de fibras, lo cual se puede evitar si se tiene cuidado en la secuencia y velocidad con que se agregan las fibras. El entrelazado que ocurre después de que se agregaron las fibras a la mezcla, generalmente se debe a exceso de meclado o a un proporcionamiento deficiente de la mezcla, por ejemplo, demasiado agregado grueso o un volumen de fibras superior al permitido para una relación aspecto determinada.

Con objeto de lograr un meclado uniforme, se recomienda para fibras metálicas redondas o planas, que la relación aspecto no sea superior a 100.

Así mismo que el contenido no exceda el 2% del volumen de la mezcla, se puede emplear proporcionamientos convencionales de concreto, pero se recomienda dosificar agregados cuyo tamaño máximo sea de 10 mm; a fin de proporcionar a las fibras el espacio adecuado y obtener la trabajabilidad adecuada.

La mayoría de los métodos de meclado que se reportan en la literatura publicada hasta 1986, se aplican al concreto reforzado con fibras metálicas, aunque existen algunos que se refieren exclusivamente a morteros y pastas de cemento tipo Portland.

En todos ellos se enfatizó la importancia de lograr una disposición adecuada de las fibras en las matrices, lo cual se puede hacer durante la dosificación y antes de agregar el agua de mezclado. Para mezclas de laboratorio, se recomienda agregar las fibras a través de una malla metálica que debe agitarse mientras dure la operación. Para mezclas de mayor volumen se hace en camiones revolvedora o plantas dosificadoras apegándose a sus recomendaciones generales.

En el caso de dosificar grandes volúmenes de concreto se recomienda que las fibras se dispersen a través de mallas vibratorias cuya abertura varíe entre 10 y 2.5 cm., también se pueden emplear dosificadores vibratorios que descarguen las fibras a bandas transportadoras, sin importar el método de dispersión y dosificación de fibras deberá probarse en campo y ajustarlo hasta que no exista duda de que funciona.

2.5.4. COLOCACION DE MEZCLAS DE CONCRETO CON FIBRAS.

Debido a que el trabajo está enfocado al concreto reforzado con fibras metálicas, sólo se mencionarán las recomendaciones existentes para este tipo de fibras, aunque muchas de estas son aplicables a mezclas con fibras de plásticos y vidrio.

En general, las fibras producen una pérdida considerable de trabajabilidad, por lo que las mezclas requieren más vibración para hacerlas fluir y consolidarlas adecuadamente dentro de las cimbras.

El uso de vibradores de inmersión es aceptable cuando se controla de manera que prevenga la segregación de fibras, sin embargo debe preferirse la vibración externa y la superficial. La naturaleza fibrosa de la mezcla dificulta el uso de palas y azadones por lo que el manejo para extender o repartir las mezclas conviene hacerlo mediante rastrillos. El reglado de superficies se puede hacer con reglas de madera, aunque es preferible que lleven un vibrador montado.

El pulido de superficies puede hacerse manualmente con llanas metálicas o tubos, pero es más recomendable el empleo de llanas motorizadas y rotatorias que prevengan el desprendimiento de las fibras superficiales.

El curado de este tipo de concreto debe hacerse de manera similar al del concreto normal a fin de evitar agrietamientos prematuros por contracción o secado brusco que disminuya la eficiencia de las fibras como refuerzo.

El concreto con fibras adquiere resistencia en función del tiempo como sucede con el concreto normal, por lo mismo tiene poca resistencia a edades tempranas y puede presentar agrietamiento que interrumpe la continuidad del material y disminuye la eficiencia de las fibras por pérdida de adherencia, por lo tanto deben prevenirse las causas de agrietamiento brusco y/o temprano, choque térmico por descimbrado, curado deficiente y secado rápido de superficies.

Las pruebas estandar de control de calidad para concreto normal tales como revenimiento, contenido de aire y peso volumétrico - también se emplean como índice de calidad del concreto reforzado con fibras, sin embargo, debido a la naturaleza de este material y a la diferencia de propiedades reológicas no son igualmente aplicables, por lo que las medidas que se obtienen pueden conducir a errores.

La colocación del concreto reforzado con fibras dentro de cimbras o moldes no difiere mucho de los procedimientos normalmente empleados para colocar mezclas de concreto simple. Cuando se emplea equipo de bombeo, se recomienda que la tubería tenga un diámetro de 15.5 a 15 cm, y que el volumen de fibras no exceda el 1.5% del volumen total de la mezcla.

Se ha probado la colocación de mezclas de concreto con fibras - mediante técnicas de tiro directo, extrusión y lanzado, empleando mezclas con y sin aditivos fluidificantes. Hasta el momento no se han encontrado dificultades insalvables que impidan la correcta aplicación del material pero debe enfatizarse que cada caso reúne características propias y diferentes por lo que se recomienda hacer una serie de pruebas de mezclado, colocación - y consolidación en laboratorio y campo antes de intentar la construcción formal de algún elemento.

2.6 APLICACIONES DESARROLLADAS CON CONCRETO REFORZIADO CON FIBRAS.

En general, se puede mencionar que la aplicación del concreto reforzado con fibras depende principalmente del ingenio de los técnicos, es decir, su utilidad en la solución de los problemas constructivos de ingeniería es prácticamente ilimitada.

A continuación se expondrán algunas aplicaciones desarrolladas satisfactoriamente en algunos países en los que esta técnica ha sido aplicada.

- 1) En 1976 se pavimentó el estacionamiento del Aeropuerto Internacional de Mc Carran de 52,700 m² con una capa de 15 cm. de espesor de concreto con fibras, que comparado con el espesor requerido de concreto simple (40 cm.) resultó más económico.
- 2) En 1950 se autorizó la construcción de una pista para el acceso de taxis al Aeropuerto Internacional de Reno en Nevada U.S.A, esta pista tiene una longitud de 853 m. ancho de 23 m, y espesor de 16 cm.
- 3) En 1973 y 1975 se recubrieron dos vertedores de la Presa Lower, estado de Washington, con concreto reforzado con fibras metálicas a fin de reducir los efectos de la cavitación.
- 4) En 1976 se hizo lo mismo con el vertedor de la Presa Little Goose sobre el Río Snake.
- 5) En 1974 se estabilizaron las laderas del Río Snake próximas a la desembocadura de la Presa Little Goose.

- 6) En 1980 se estabilizaron 4,500 m² de taludes rocosos cerca de la Refinería de Brofjorden Suecia, para proteger las instalaciones de posibles deslizamientos y caídos.
- 7) Entre 1981 y 1982 se revistieron varios túneles exploratorios de la Presa de Tierra Peacer River.
- 8) En 1983 las autoridades del Metro de Atlanta autorizaron un revestimiento de prueba con concreto reforzado con fibras en una sección de túnel de 61 m. de largo, las observaciones después de 18 meses de uso mostraron que el revestimiento está en buenas condiciones.
- 9) En Inglaterra se revistió un túnel de ferrocarril, dañado con concreto reforzado con fibras metálicas, las ventajas económicas y velocidad de reconstrucción hizo que en 1984 este País adoptara el procedimiento de lanzado de concreto con fibras para trabajos de reparación de puentes y túneles ferroviarios.
- 10) En Suecia el concreto reforzado con fibras, lanzado con el proceso en seco, se ha empleado para la construcción del túnel de refrigeración de emergencia de la planta termo-nuclear de Ringhals.
- 11) Japón ha construido recientemente el revestimiento de 3 túneles ferroviarios en Hokkaido, el túnel de Miyayoshita y el de Itaya con concreto reforzado con fibras y mediante el proceso de lanzado húmedo.
- 12) Últimamente la técnica de lanzado en seco de concreto con fibras se emplea en la construcción de cascarones, paneles tipo sandwich, paraboloides hiperbólicos y otras geometrías atractivas desde el punto de vista arquitectónico.

Como se mencionó en la literatura que describe el uso y aplicaciones del concreto reforzado con fibras, se reportan más de 2000 aplicaciones exitosas del material, ya sea colado en el lugar o colado mediante técnicas de lanzado.

3 CONCEPTOS GENERALES SOBRE CONCRETO LANZADO

3 CONCEPTOS GENERALES SOBRE CONCRETO LANZADO.

3.1 DEFINICION

Se define al concreto o mortero lanzado como la mezcla de materiales pétreos y cemento tipo Portland transportados a través de una manguera al final de la cual se humedecen y proyectan neumáticamente a gran velocidad sobre una superficie.

El uso de esta técnica constructiva tiene 50 años, la experiencia ganada a través de este lapso permite que la variedad de aplicaciones continúe aumentando al igual que su difusión.

Existen dos procedimientos para el lanzado de mezclas de concreto: uno se conoce como "lanzado en seco" y el otro como "lanzado húmedo". Por los resultados de calidad, versatilidad, facilidad de uso, y costo el lanzado en seco es el procedimiento de empleo más generalizado en nuestras Obras del Metro de la Ciudad de México en el revestimiento de túneles.

A continuación se dará una descripción de ambos procedimientos.

1) Procedimiento de lanzado en seco.

El procedimiento de lanzado en seco básicamente consiste en:

- a) Se mezclan los agregados pétreos con el cemento tipo Portland ya sea por medios mecánicos o manuales y se agrega una cantidad adecuada de aditivo acelerador de fraguado inicial de concreto.
- b) Se almacena la mezcla en la tolva del equipo de lanzado.
- c) La mezcla se introduce en una manguera de descarga mediante una rueda alimentadora, revolver o distribuidor que se encuentra en el interior del equipo de lanzado.

- d) Los materiales se conducen a través de la manguera de descarga por medio de una corriente de aire a presión. La manguera termina en una boquilla especial, a la cual se ajusta un múltiple perforado que sirve para atomizar agua a presión. Esto permite humedecer la mezcla de materiales secos y darles la consistencia que requieren para que se adhieran a la superficie de lanzamiento.
- e) El concreto humedecido sale por la boquilla a gran velocidad y se proyecta sobre la superficie donde se trata de colocar el concreto.

Las máquinas de lanzamiento en seco también se pueden clasificar en dos categorías; unas para lanzados a baja velocidad y otras para lanzamiento a alta velocidad. Los concretos lanzados a alta velocidad se producen empleando una boquilla de diámetro pequeño y presión elevada de aire. En este caso las partículas salen de la boquilla con una velocidad que varía entre 90 y 120 m/seg., lo que permite lograr concreto bien compactado y con poca variabilidad en cuanto a densidad.

El concreto lanzado a baja velocidad no alcanza el mismo grado de compactación que el de alta velocidad, pero sí tiene las características generales de concreto lanzado, como baja relación agua-cemento, compactación aceptable en el lugar de aplicación y alto contenido de cemento.

2) Procedimiento de lanzamiento húmedo.

Este procedimiento de lanzamiento húmedo ha cedido terreno al lanzamiento en seco debido a las propiedades físicas y mecánicas que se solicitan al material lanzado y que, hasta el momento se obtienen con el procedimiento en seco. El problema del equipo existente para lanzamiento húmedo es que producen un concreto esparcido frecuentemente en grandes cantidades, con lo que se asemeja a un concreto bombeado a alta velocidad a través de mangueras cortas conectadas a una boquilla que acelera a la expulsión de la mezcla mediante un chorro de aire comprimido, esto da por resultado un chorro sin la compactación excepcional que normalmente se obtiene con el procedimiento de lanzamiento en seco y a alta velocidad.

3.1.2 PROPIEDADES DEL CONCRETO LANZADO.

Con la técnica de lanzado en seco se logran relaciones agua-cemento entre 0.35 y 0.5 que resultan menores que la mayoría de los valores para concretos mezclados y colocados de manera convencional.

Desde el punto de vista resistencia a compresión, una mezcla colocada por lanzado exhibirá una capacidad mayor hasta en un 30% más capacidad que una de características similares pero colocada y compactada por métodos tradicionales.

3.2 MEZCLAS DE CONCRETO LANZADO REFORZADO CON FIBRAS.

La inclusión de fibras a una mezcla de concreto lanzado mejora las propiedades del material; le proporciona ductilidad, tenacidad, mayor resistencia a esfuerzos de flexión, compresión impacto y fatiga.

El empleo de fibras de acero como refuerzo del concreto lanzado es el que tiene mayor difusión a nivel mundial debido a las propiedades mecánicas que se logran y a la facilidad relativa de colocación sobre otro tipo de fibras. Entre las principales aplicaciones de este material se puede mencionar el revestimiento de túneles, estabilización de taludes, construcción de cascarones, reparación de superficies dañadas, protección de estructuras contra el fuego y recubrimientos refractarios.

3.2.1 ANTECEDENTES HISTORICOS Y GENERALIDADES.

El concreto lanzado con fibras se empleó por primera vez en los Estados Unidos, a principios de 1917. Los trabajos experimentales estuvieron a cargo del Dr. Lankard, ref. 48. Posteriormente en una investigación dirigida M.E. postd. ref. 39 y patrocinada por el Departamento de minas de los Estados Unidos, se mejoró el método de lanzado a fin de utilizar el concreto reforzado con fibras como adene en los túneles.

R. A. Kaden ref. 40, miembro del cuerpo de Ingenieros Militares de los Estados Unidos, se encargó de supervisar la primera aplicación del concreto lanzado con fibras para revestir el túnel de la presa Ririe en 1973. Desde entonces el concreto lanzado reforzado con fibras metálicas se ha empleado en Alemania, Suecia, Inglaterra, Noruega, Finlandia, Suiza, Polonia, Australia, Canadá y Japón.

El concreto lanzado con fibras se puede colocar con el mismo equipo de mezclado y lanzado que se utiliza para el lanzado de mezclas de concreto sin fibras, aunque se han desarrollado boquillas y aditamentos especiales que contribuyen a asegurar una dosificación con mayor grado de precisión, sin embargo se ha demostrado que no se requiere equipo especial para el lanzado de este material, ya sea mediante el proceso en seco o húmedo.

La mejoría que se obtiene en la tenacidad, se hace evidente en las deformaciones que el material es capaz de aceptar cuando se le somete a esfuerzos de flexión; esta capacidad resulta de gran utilidad cuando el concreto lanzado con fibras se emplea para revestir túneles, donde por condiciones del subsuelo se requiere que el material tenga una resistencia adicional al agrietamiento que le permita soportar la carga y las deformaciones que pueden presentarse.

Una desventaja que podría disminuir el uso del concreto lanzado con fibras, para el revestimiento de túneles es la corrosión del refuerzo, sin embargo las observaciones realizadas sobre revestimientos lanzados a lo largo de 10 años demuestran que el deterioro de las fibras por efecto de la corrosión es despreciable y que la corrosión que llegó a presentarse se concentró en las fibras superficiales y/o expuestas; esto no deterioró la resistencia a flexión del material.

Las aplicaciones más recientes usan una mezcla de agregado fino y cemento en relación 15:1 en peso generalmente el consumo de cemento es del orden de 550 Kg/m³. También se han empleado agregados gruesos con tamaño máximo de 9 y 19 mm, que requieren un menor contenido de cemento por m³, el uso de estos agregados ha contribuido a reducir las contracciones por secado.

La longitud de las fibras que se han empleado para lanzado varía entre 13 y 38 mm y el diámetro de las mismas entre 0.25 y 0.51 mm. El contenido de fibras por m³ se encuentra en el intervalo de 40 a 160 Kg.

La selección de fibras es, tal vez, la parte medular del éxito o fracaso de un lanzado de concreto con fibras. La mayoría de los autores consultados coincide en que la longitud más adecuada es de 25 mm, desde el punto de vista colocación, resistencia y mezclado. Las fibras cortas son más fáciles de mezclar, lanzar, y rebotan menos, pero las propiedades del material lanzado en particular la resistencia al agrietamiento y tenacidad se ven disminuidas.

3.3 FACTORES QUE AFECTAN EL REBOTE DE LAS FIBRAS.

Algunos investigadores y técnicos han reportado que en los trabajos de lanzado que han supervisado, el concreto lanzado con fibras tiene una cantidad menor de material de rebote comparado con el concreto lanzado sin fibras. Uno de estos ejemplos constituye la prueba de lanzado ejecutada por la empresa Fenix And Scisson.

En esta prueba se lanzaron 3m³ de concreto con fibras, dosificado con 317 Kg/m³ de cemento 1225 Kg/m³ de arena y 70 Kg/m³ de fibras de 13 X 0.25 mm. El espesor de lanzado fue de 15 cm. Al comparar los resultados de las medidas de material de rebote se encontró que el concreto con fibras tuvo un 10% mientras que el concreto sin fibras tuvo un desperdicio por rebote del 31%. La prueba se ejecuto en el interior de un túnel e incluyo lanzados en la clave y paredes verticales.

Parker reporta un rebote promedio de 18.3 % para concreto sin fibras y el 17.7% para concreto con fibras y concluye, de los resultados de sus pruebas y de los reportes de otros investigadores que la presencia de fibras no afecta de manera importante los porcentajes de rebote.

Existe un estudio (ref. 16) en el que se publica información cuantitativa sobre el rebote del concreto lanzado reforzado con fibras metálicas, mediante el proceso en seco. En este reporte se estudió de manera sistemática las variables que afectan el rebote, una por una, con ayuda de la fotografía de alta velocidad que permitió observar los movimientos de las fibras en el trayecto entre la boquilla de lanzado y la pared, así como el comportamiento de las fibras dentro de la corriente de aire.

Las películas mostraron que muchas de las fibras tienden a moverse en la periferia del chorro y que muchas otras salen despedidas por la corriente de aire de manera radial y lejos del supuesto punto de impacto poco antes o después de tocar la pared. Asimismo se observó que algunas fibras vuelan en el aire por efecto de corrientes secundarias y posteriormente caen al suelo sin tocar la pared de lanzado. De la observación de las películas quedó claro que las fibras vuelan lejos del objetivo debido a corrientes secundarias y no que reboten fuera de la superficie de contacto.

De los estudios anteriores se obtuvo como conclusión y recomendación general, que puede reducirse el rebote si se reduce la presión de aire de lanzado, velocidad y calidad de aire empleado.

También es recomendable emplear una cantidad mayor de finos en la mezcla, fibras cortas y pesadas y lanzar con la mayor consistencia húmeda posible y estable.

4 COMPORTAMIENTO TEORICO DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO

4 COMPORTAMIENTO TEORICO DEL CONCRETO REFORZIADO CON FIBRAS -
DE ACERO.

Los concretos, morteros y pastas de cemento tipo Portland tienen ciertas limitaciones con respecto al volumen de refuerzo o cantidad de fibras que aceptan. Este hecho al igual que las limitaciones del material deben comprenderse claramente antes de establecer un enfoque teórico racional que pretenda describir el comportamiento de refuerzo.

Las limitaciones principales son:

- a) Poca deformación unitaria a la falla por tensión (menor de - 0.005).
- b) Las matrices con módulo elástico relativamente elevado, del orden de 250 000 Kg./cm², que resulta útil cuando se trata de limitar las deflexiones de elementos estructurales, contribuye poco a la capacidad de carga de las fibras hasta antes de la primera grieta.
- c) Las matrices aceptan volúmenes de refuerzo reducidos; 10% para pastas de cemento, 3 a 4% para morteros y 2% para concretos.
- d) Adherencia relativamente baja entre matrices y fibras.

Entre los factores que previenen la predicción precisa de las propiedades de materiales compuestos a base de cemento tipo Portland, se pueden mencionar las variables que dependen del tiempo como son la adherencia y fricción entre fibras y matrices, el microagrietamiento, la resistencia al cortante, la contracción por secado y las reacciones de hidratación.

Sin embargo existen teorías simplificadas que permiten establecer el orden de magnitud de las mejoras factibles de obtener cuando se añaden fibras al concreto. Una de las mayores dificultades que deben salvarse antes de poder aplicar cualquier procedimiento teórico de análisis es el de establecer el significado del término " primera grieta".

Estrictamente el término de "primera grieta" debería aplicarse al estado en que partes microscópicas de la pasta o de la pasta y agregado se separan, pero estas microgrietas pueden ser establecidas en presencia de un sistema de esfuerzos de tensión directa y sin refuerzo. Para fines prácticos, el agrietamiento se considera como un estado intermedio en que las grietas comienzan a propagarse justo antes de que una fisura se haga visible. Este estado se conoce desde el punto de vista del análisis teórico como resistencia última de la matriz.

4.1 TENSION UNIAxIAL.

En este trabajo se hará referencia a aquellas fórmulas o expresiones matemáticas que empleen los mismos principios de la teoría de concreto reforzado, con base en las consideraciones siguientes:

- A) Las fibras del material compuesto están alineadas en la dirección del esfuerzo.
- B) Antes de que se agriete la matriz, existe adherencia perfecta con las fibras.
- C) Las deformaciones unitarias son iguales en la matriz y en las fibras.
- D) La relación de Poisson es igual a "cero" para la matriz y fibras.

Debe tomarse en cuenta que los puntos anteriores se refieren a condiciones ideales que posibilitan el análisis teórico del concreto reforzado con fibras y sujeto a esfuerzos de tensión uniaxial, y que ninguna de estas consideraciones es necesariamente cierta en la práctica.

Si las deformaciones unitarias son iguales, se puede expresar que:

$$\epsilon_c = \epsilon_f = \epsilon_m = \frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{\sigma_m}{E_m}$$

Si la adherencia entre fibras y matriz es perfecta, el esfuerzo en el material compuesto sujeto a tensión uniaxial se puede expresar de la manera siguiente:

$$\frac{F}{A_c} = \frac{F}{A_f} + \frac{F}{A_m} = \sigma_c = \sigma_f + \sigma_m$$

La sección transversal de un espécimen de material compuesto (concreto reforzado con fibras) puede definirse de la manera siguiente:

$$A_c = A_m + A_f = 1$$

Y el volumen de material compuesto como:

$$V_c = V_m + V_f = 1$$

Por lo tanto el área y el volumen de la matriz se puede expresar:

$$A_m = (1 - A_f); \text{ y } V_m = (1 - V_f)$$

De esta manera, el esfuerzo promedio $\bar{\sigma}_c$ que soporta un área unitaria $A_c = 1$ del material compuesto, a una deformación unitaria ϵ_c , antes de agrietarse puede expresarse como:

$$\bar{\sigma}_c = \bar{\sigma}_f A_f + \bar{\sigma}_m (1 - A_f)$$

Normalmente, en tecnología de materiales compuestos se usan fracciones volumétricas y longitudes unitarias: $A_c = V_c = 1$ y $V_f = A_f$, por lo tanto la ecuación anterior se puede expresar como:

$$\bar{\sigma}_c = \bar{\sigma}_f V_f + \bar{\sigma}_m (1 - V_f)$$

También es costumbre utilizar la relación modular o relación de módulos elásticos. Esto porque en el caso específico de las fibras de acero el módulo elástico es del orden de 15 veces mayor que el de matriz de concreto, o mortero de cemento tipo Portland y resulta más cómodo trabajar con cifras pequeñas.

La mayoría de los autores conviene en emplear, en las ecuaciones que definen el comportamiento de los materiales compuestos, el término "relación módulo" (M), el cual se define como:

$$\frac{E_f}{E_m} = M$$

Por lo tanto, la relación de esfuerzo puede expresarse de la manera siguiente:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_m} = 1 + V_f (M - 1)$$

De lo anterior, el esfuerzo promedio σ_c del material compuesto se puede expresar:

$$\sigma_c = \sigma_m [1 + V_f (M - 1)]$$

Si la relación de esfuerzos es igual a la relación de módulos elásticos:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_m} = \frac{E_c}{E_m} = 1 + V_f (M - 1)$$

Entonces el módulo elástico del material compuesto se expresará:

$$E_c = E_m + E_m V_f (M-1)$$

Las expresiones anteriores consideran que las fibras se orientan en la dirección del esfuerzo. Sin embargo, esto no sucede de manera normal en el caso de materiales compuestos a base de matrices de concreto o mortero, de cemento tipo Portland, en los que el esfuerzo está constituido por fibras cortas que pueden distribuirse de manera bi o tridimensional, la orientación de las fibras dentro de la matriz es un factor que debe tomarse en cuenta, si se deseara que las expresiones matemáticas, produzcan valores próximos a los que se obtienen cuando se miden directamente las propiedades mecánicas de los materiales compuestos, mediante pruebas de resistencia.

Es evidente que se necesita afectar las ecuaciones por factores -- que tomen en cuenta la eficiencia de las fibras como refuerzo. Estos factores, como la mayoría de los empleados en resistencia de materiales provienen de análisis probabilísticos o de análisis estadísticos de resultados de pruebas de laboratorio. Así, el volumen de refuerzo se afecta por un factor (ni) que toma en consideración la orientación de las fibras dentro de la matriz de concreto o mortero de cemento tipo Portland.

El valor numérico del factor ni dependerá de la orientación de las fibras que se estime como más probable, según el procedimiento que se emplee para colocar el concreto o mortero reforzado con fibras; si el método de colado permite construir un elemento estructural con este material, de manera que todas las fibras que integran el volumen de refuerzo, se orienten en la dirección del esfuerzo, entonces la eficiencia del refuerzo se maximizará y el factor valdrá 1 y significa que todas las fibras contribuyen a la resistencia del material compuesto.

Si el procedimiento constructivo permite que las fibras se orienten de manera bidimensional aleatoria o tridimensional aleatoria el factor tendrá un valor igual a 1/3, en el primer caso. Este valor representa la probabilidad de que una tercera parte del volumen de refuerzo esté disponible para resistir los esfuerzos que pueden presentarse en 3 direcciones dentro de un mismo plano (bidimensional). En el segundo caso el factor n valdrá 1/5, que representa la probabilidad de encontrar fibras orientadas en la dirección del esfuerzo después de que se han distribuido aleatoriamente y de manera tridimensional dentro de la matriz de concreto o mortero de cemento tipo Portland.

Cuando un elemento de concreto o mortero reforzado con fibras cortas metálicas se somete a esfuerzos de tensión uniaxial, su capacidad para resistirlos no sólo estará en función del volumen de refuerzo y orientación de las fibras, sino de la adherencia entre estas y la matriz. En tecnología de materiales compuestos se usa el término "longitud crítica", la cual se define como el doble de la longitud de anclaje necesario para lograr la falla por tensión de una fibra mediante una prueba de extracción.

Existen varias expresiones matemáticas que permiten determinar el valor de la longitud crítica (L_c), así la L_c puede expresarse como:

$$L_c = 0.11 \frac{d f_s}{\sqrt{f'_c}}$$

La letra "d" representa el diámetro de una fibra con sección transversal circular o el diámetro equivalente si la fibra tiene una sección de geometría diferente, "f_s" representa el esfuerzo de tensión máximo del acero que constituye a la fibra y f'_c es la resistencia nominal de la matriz de concreto o mortero de cemento tipo Portland a compresión.

En la región donde se presenta la deformación unitaria de falla y momentos antes de que ocurra, se puede considerar que el factor de eficiencia, con el que se afecta la longitud de la fibra, tiene un valor próximo a 1. Generalmente se emplea 0.9, como valor de n^2 , sin embargo, en la mayoría de los casos este valor depende de la relación que existe entre la longitud de la fibra y la L_c .

Así el valor de n_2 se puede calcular de la manera siguiente:

Para: $L \leq L_c$, $n_2 = \frac{L}{L_c}$ y para $L > L_c$, $n_2 = 1 - \frac{L_c}{2L}$

Debe aclararse que el factor n_2 , desde un punto de vista --- práctico, tiene poca influencia en las determinaciones teóricas de los esfuerzos de agrietamiento de los materiales compuestos a base de matrices de concreto, ya que la adherencia varía con la edad del concreto y porque el esfuerzo de agrietamiento como el módulo elástico del material compuesto tiene valores próximos a los de la matriz, así que los efectos teóricos de segundo orden pueden absorberse dentro de la variabilidad de propiedades que exhibe el concreto reforzado con fibras.

Finalmente, el esfuerzo promedio del material compuesto $\bar{\sigma}_c$ y el módulo elástico E_c , se pueden expresar en función de parámetros conocidos como: el volumen de refuerzo V_f , el esfuerzo máximo de las fibras a tensión σ_f y el esfuerzo de agrietamiento de la matriz de concreto o mortero de cemento tipo Portland σ_m y afectarlas expresiones por los factores de eficiencia n_1 y n_2 .

$$\bar{\sigma}_c = n_1 n_2 \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f)$$

$$E_c = n_1 n_2 E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

Existe un valor, en tecnología de materiales compuestos que debe conocerse a fin de posibilitar el diseño de un material compuesto. Este valor se conoce como "volumen crítico de refuerzo", y se define como el contenido de fibras capaz de sostener la carga o el esfuerzo que soporta el material compuesto antes de la aparición de la primera grieta.

El cálculo de este valor (V_f crit.), requiere que se conozcan - las deformaciones unitarias de fractura de la matriz, el esfuerzo último del acero de las fibras, el módulo elástico de las fibras metálicas y el esfuerzo último de la matriz. Así, el volumen crítico de refuerzo para el concreto reforzado con fibras metálicas, sujeto a esfuerzos de tensión uniaxial puede expresarse de la manera siguiente:

$$V_f \text{ crit.} = \frac{V_{m_u}}{V_{f_u} - f_{m_u} E_f = V_{m_u}}$$

Lo anterior implica que, cualquier contenido de fibras superior al valor del contenido crítico incrementará la capacidad de carga del concreto reforzado con fibras metálicas.

Una vez que se alcanza el esfuerzo de agrietamiento de la matriz la eficiencia de las fibras quedará determinada por el número de fibras que cruza una grieta y la capacidad del material para soportar el mismo esfuerzo de adherencia que se desarrolle entre fibras y matriz. Si la falla del material compuesto ocurre por deslizamiento de las fibras, se puede demostrar que la fibra se extrae cuando la longitud de anclaje es $\frac{1}{2}$ de la longitud de la fibra. Por lo tanto se puede calcular la capacidad de carga del material agrietado si se multiplica el esfuerzo de adherencia por el número de fibras que cruza una grieta.

Lo anterior es factible si se conoce el número de fibras por área unitaria tanto como el esfuerzo de adherencia. Una manera de calcular el número de fibras, probable que refuerza un área unitaria es mediante la expresión siguiente, la cual, además - considera una distribución tridimensional aleatoria.

$$N = \frac{1}{\pi r^2} \frac{V_f}{L}$$

Por lo tanto si se conoce el valor probable de N el esfuerzo -
último del material compuesto se puede estimar mediante la si-
guiente expresión:

$$f_{cu} = \frac{N \bar{\sigma} d_l}{4}$$

Si el valor de N se sustituye en la ecuación anterior se obtie-
ne:

$$f_{cu} = \frac{1}{2} V_f \bar{\sigma}_f$$

Esta expresión implica que el esfuerzo máximo que puede soportar
un espécimen de concreto reforzado con fibras metálicas, distri-
buídas de manera tridimensional aleatoria, sujeto a esfuerzos de
tensión uniaxial, es aproximadamente $\frac{1}{2}$ del esfuerzo de agrieta-
miento.

4.2 TENSION POR FLEXION.

Debido a que una de las características más atractivas para el uso del concreto o mortero de cemento tipo Portland reforzado con fibras metálicas, en la solución de problemas de ingeniería, es su resistencia a esfuerzos de tensión por flexión, se requiere entender los mecanismos de refuerzo en flexión.

Experimentalmente se ha observado que existen grandes diferencias, entre los resultados de pruebas a tensión directa y a tensión por flexión, a pesar de que nominalmente debería ser hace un mismo valor, según la teoría de elasticidad. Esto necesario contar con una teoría especial que permita analizar y predecir, con cierto nivel de confianza el comportamiento del concreto reforzado con fibras, sujeto a esfuerzos de tensión por flexión.

Una de las razones principales para que existan estas discrepancias en los materiales compuestos a base de cementos hidráulicos es que el comportamiento de la zona de tensión difiere considerablemente del que se registra en la zona de compresión como sucede en una viga de concreto reforzado con fibras metálicas sujeta a flexión. Esto hace que la teoría para el análisis de vigas de concreto reforzado sea inaplicable a elementos estructurales contruidos con materiales reforzados con fibras. El mecanismo de refuerzo está en función del deslizamiento de las fibras y/o de la deformación elástica de las mismas. Este mecanismo es el responsable del comportamiento casi plástico que exhiben los materiales compuestos a base de cementantes hidráulicos, después de que se agrieta la matriz.

Si se estudia una viga de concreto reforzado con fibras metálicas, sujeta a un estado de esfuerzo por flexión crecientes fig. 10, se observará que conforme se incrementan las deformaciones se registra la formación de grietas, las cuales no progresan de la misma manera que en una viga de concreto simple, debido a que los esfuerzos se transmiten a través de las fibras que cruzan las grietas e impiden la falla frágil, típica del concreto sin refuerzo.

La formación de grietas incrementa el valor de las medidas de la deformación unitaria y de la distancia (d_n), del eje neutro de la sección a la zona donde se registra el esfuerzo máximo de tensión.

Conforme se incrementa el valor de la carga las deformaciones unitarias en la zona de tensión crecen a un ritmo mayor del que se registra en la zona de compresión, hasta que deja de existir una relación directa entre las medidas de deformación directa y el esfuerzo aparente que sostiene las fibras a través de las grietas.

Así es muy probable que el bloque de esfuerzos de la sección transversal, adquiera la geometría de cualquiera de las figs. 10 (c), (d) ó (e), en función del material compuesto que se esté estudiando y del mayor o menor esfuerzo que se transfiera a las fibras que cruzan las grietas, comparado con el esfuerzo que sostenía el material antes de agrietarse.

Las figs. 10 (b) y (c) representan el bloque de esfuerzos de una sección reforzada con fibras menor del volúmen crítico - (V_f crit.) requerido en tensión directa. Las figs. 10 (d) y (e) se pueden considerar apropiadas para ilustrar el comportamiento de la sección reforzada con fibras de vidrio, donde el contenido puede ser ligeramente inferior o superior al volúmen crítico respectivamente.

Puede considerarse que a pesar de que el contenido de fibras en la matriz no alcance el valor suficiente para reforzar en tensión por flexión, es posible que la capacidad de carga se incremente debido al aumento de área en el bloque de esfuerzos generada por la pseudo-ductilidad del material y al corrimiento del eje neutro hacia la parte superior de la sección.

Por lo tanto, aunque es común que los valores del módulo de rotura se calculen con base en criterios elásticos, los valores que se obtienen no son reales ni representativos de la resistencia a tensión. Tampoco se puede considerar que la medida precisa del área y determinación de la geometría que adquiere el bloque de esfuerzos de la sección proporcionará valores reales, porque no lo son. Este se debe a que los valores reales son fuerzas que sostienen las fibras individuales que cruzan las grietas.

4.3 ANALISIS TEORICO FLEXION POST-AGRIETAMIENTO

Uno de los problemas que enfrenta el Ingeniero de materiales cuando trata de predecir el comportamiento a flexión del concreto reforzado con fibras, en base a los principios de resistencia a flexión, es que tiene que fundamentar su producción en una serie de conceptos poco precisos, entre los que se incluye - el efecto que tiene el esfuerzo de adherencia sobre el gabinetede deformaciones unitarias, la interacción fibra-fibra y fibra - agregado y la influencia de los factores, de eficiencia, relacionados con la longitud, orientación y dispersión de fibras en la matriz. A pesar de estas dificultades, Aveston, Mercer y Sillwood desarrollaron una teoría con la que pretenden establecer, de manera precisa el comportamiento a flexión del concreto reforzado con fibras. Esta teoría emplea la curva teórica esfuerzo-deformación unitaria a tensión e implica que el módulo de rotura puede alcanzar un valor de hasta 3 veces mayor, que el de la resistencia última a tensión por flexión, suponiendo que la falla no se presenta por compresión.

Hannant, elaboró un procedimiento de análisis teórico aproximado que se asemeja en algunos conceptos al que desarrollaron Aveston et. al . El procedimiento Hannant será el que se emplee en este trabajo para establecer el orden de magnitud con que se incrementa el momento resistente de la sección agrietada, debido a la ductibilidad que proporciona el deslizamiento y/o alargamiento de las fibras que cruzan una grieta.

La teoría de Hannat se fundamenta en una simplificación de la geometría del bloque de esfuerzos de la sección, en la zona donde se presentan los esfuerzos de tensión y después de que se presenta el agrietamiento. Debe mencionarse que tomar como base lo anterior es relativamente incorrecto para cada tipo de material compuesto. El grado de error está en función de la geometría que adquiere el bloque de esfuerzos, según el tipo, longitud y contenido de fibras, así como de la relación agua-cemento, edad, condiciones de curado y ancho de grieta. Sin embargo, se considera válido para la mayoría de los materiales compuestos; variaciones pequeñas en la geometría del bloque de esfuerzos no afectan de manera importante los resultados teóricos.

En la figura 11 (a), se muestra el bloque de esfuerzos de un material elástico, cuyo eje neutro se encuentra al centro de la sección y su resistencia al agrietamiento (V_f) es igual al módulo de rotura (MR). La figura 11 (b) muestra el bloque de esfuerzos típicos del concreto reforzado con fibras después del agrietamiento, donde las fibras se alargan y/o se extraen por efecto del incremento constante de carga transmitida a través de las grietas y a lo largo de la zona de tensión. El valor de la resistencia última, post-agrietamiento a tensión del material compuesto (V_{cu}) se calcula con la expresión $V_{cu} = V_f n$ y el valor V_{cu} es la resistencia a compresión de la matriz de concreto.

La figura 11 (b) se aproxima a la geometría factible, que adquiere el bloque de esfuerzos de concreto reforzado con fibras metálicas cuando las grietas son pequeñas (menos de 0.3 mm) en comparación con la longitud de las fibras.

Edgington demostro que, para el concreto reforzado con fibras metálicas sujeto a flexión, el eje neutro de la sección se localiza a 0.2 D a partir de la superficie de la zona sujeta a compresión, sin embargo, se puede utilizar como parámetro estimado el valor de D/4, el cual se usa en la mayoría de los problemas prácticos asociados con la resistencia post-agrietamiento del concreto reforzado con fibras metálicas sujetas a flexión.

De la figura 11 (a) se deriva que para el equilibrio de fuerzas $T = C$, T se expresará de la manera siguiente:

$$T = \frac{V_f}{2} \frac{D}{2} = V_f \frac{D}{4}$$

El brazo de palanca (z)

$$z = \frac{2}{3} D$$

Por lo tanto el momento resistente se expresará:

$$M_r = V_f \frac{D}{4} \frac{2}{3} D = \frac{V_f D^2}{6}$$

De la figura 11 (b), V_{cu} representa la fuerza por área unitaria de la sección que soportan las fibras, la cual es equivalente a la resistencia post-agrietamiento en una prueba de tensión directa, de esto, la fuerza de tensión (T) se puede expresar como:

$$T = V_{cu} \frac{3D}{4} = 1$$

$$\text{Y el brazo de palanca } (z) = \bar{z} = \frac{1}{2} \left(\frac{3D}{4} + \frac{2}{3} \frac{D}{4} \right) = \frac{13D}{24}$$

Por lo tanto el momento resistente se expresará mediante la ecuación:

$$M_r = V_{cu} \frac{3D}{4} \frac{13D}{24} = V_{cu} \frac{13}{32} D^2$$

A fin de lograr de que las vigas representadas en la figura 11 alcancen la misma resistencia, se requiere que los momentos resistentes sean iguales. De las ecuaciones anteriores se puede expresar que:

$$\frac{V_f D^2}{6} = V_{cu} \frac{13}{32} D^2$$

Por lo tanto el esfuerzo último del material compuesto puede expresarse:

$$V_{cu} = \frac{16}{39} V_f = 0.41 V_f$$

Lo anterior implica que, para deformaciones unitarias grandes, la resistencia post-agrietamiento debe exceder 0.41 la resistencia a tensión, para que exista reforzamiento por flexión.

En la figura 12 (a) y (b) se muestran las curvas esfuerzo-deformación para el concreto reforzado con fibras metálicas. En la figura (a) se representa el comportamiento del material sujeto a esfuerzos de tensión directa y en la (b) el mismo material pero sujeto a esfuerzos de tensión flexión. El significado de estas figuras es que si la resistencia a tensión directa, después de que se agrietó la matriz supera el 41% del valor máximo que tenía antes de agrietarse, su módulo de rotura no cambia, y por lo tanto el material si se reforzó para resistir esfuerzos de tensión por flexión.

Si se conoce la distancia (d_n) del eje neutro de la sección a la fibra más alejada cuando ocurre la falla, se puede emplear un procedimiento de análisis similar al expuesto para determinar el valor de V_{cu} , así como el valor del volumen crítico de refuerzo para que exista reforzamiento por flexión. Normalmente el volumen crítico requerido en flexión es menor del que necesita en tensión directa.

También se puede demostrar que el módulo de rotura (MR) alcanza valores mucho mayores que los que se obtienen en tensión directa, mediante un análisis elástico similar al recomendado por las normas británicas. De esta manera, si se considera que el material tiene un comportamiento como el que se muestra en la figura 12 (b) y que el bloque de esfuerzos de la sección transversal tiene la geometría de las figuras 11 (a) y 11 (b), aunque no son totalmente reales, permiten calcular el valor de MR, con base en las ecuaciones anteriores, de la manera siguiente:

$$V_{Rk} = \frac{39}{16} V_{cu} = 2.44 V_{cu}$$

Lo que significa que, una viga de concreto reforzado con fibras puede soportar una carga del orden de 2.4 veces mayor que la carga de agrietamiento medida de una prueba de tensión directa. Desde el punto de vista del análisis elástico se puede demostrar que la relación máxima entre el módulo de rotura y la resistencia a tensión directa tiene un valor de 3. Esto se verifica en la condición límite cuando el eje neutro de la sección transversal coincide con la superficie superior del espécimen sujeto a flexión y que está en la zona de compresión, además se alcanzó el esfuerzo máximo post-agrietamiento el cual se mantiene a lo largo de la sección.

$$\sqrt{c_u} \frac{D}{P} = \frac{MRD^2}{6} \text{ de donde } \frac{V_{mr}}{V_{ca}} = 3$$

En realidad, rara vez se presenta este caso ya que la falla por compresión se inicia en la superficie de la viga antes de alcanzar la condición límite Aveston, Mercer y Sillwood propusieron una relación precisa entre el módulo de rotura y la resistencia última a tensión directa, para materiales frágiles reforzados con fibras en términos de:

$$\alpha = \frac{E_m V_m}{E_f V_f}$$

Y de la relación de deformaciones unitarias de las fibras y matrices:

$$\frac{\epsilon_f}{\epsilon_m}$$

En la figura 13 se muestran los valores típicos para el parámetro α . Debe hacerse notar que, las ecuaciones anteriores se basan en el supuesto de que la falla no es por aplastamiento en la zona de compresión y que se logró que la viga sujeta a flexión tuviera la ductilidad post-agrietamiento, adecuada para los cálculos que se pueden ejecutar con estas ecuaciones. Sin embargo debe considerarse que si el eje neutro de la sección se acerca a la superficie superior de una viga sujeta a flexión, puede ocurrir la falla por compresión, por lo que siempre es conveniente revisar el esfuerzo, este esfuerzo mediante las expresiones siguientes:

$$\frac{1}{4} \sqrt{c_{comp}} \frac{D}{4} = \sqrt{c_u} \frac{3D}{4} \frac{\sqrt{c_{comp}}}{\sqrt{c_u}} \neq 6$$

Los valores que se obtienen con estas ecuaciones, son los que normalmente se presentan en los materiales compuestos, a base de matrices de concreto o mortero reforzado con fibras. Sin embargo, cuando el volumen de refuerzo es elevado puede ocurrir la falla por compresión ya que las fibras prácticamente no contribuyen de la misma manera que en el caso de tensión.

Aunque existen muchos factores además de la resistencia a flexión, que pueden controlar el desempeño de una viga sujeta a flexión, es importante desde el punto de vista económico que posibilite el cálculo del valor mínimo de refuerzo (V_f min) necesario para reforzar en flexión; para esto, se supone que las fibras deslizan y que el eje neutro de la sección se encuentra a una distancia igual a $3D/4$ a partir de la superficie inferior de la viga. En la zona de tensión sólo se expondrá la expresión que permite calcular el volumen mínimo de refuerzo, para el caso de una distribución uniforme aleatoria tridimensional de fibras en la matriz de concreto de cemento tipo Portland.

$$V_f \text{ min.} = \frac{32}{29} \frac{V_t}{\delta} \frac{1}{L/d} = 0.82 \frac{V_t}{\delta} \frac{1}{L/d}$$

En la mayoría de los casos, V_f alcanza el mismo valor que δ esto implica que la relación entre el esfuerzo a tensión de la matriz y el esfuerzo de adherencia vale uno y por lo tanto, para fines prácticos se puede expresar que el volumen mínimo de fibras tiene un valor igual al que obtienen con la siguiente ecuación:

$$V_f \text{ min.} = 0.82 \frac{1}{L/d}$$

El módulo de rotura aparente (MR), después de que la matriz alcanzó el esfuerzo de agrietamiento, se puede calcular mediante la ecuación siguiente, que es válida para el caso de refuerzo tridimensional aleatorio:

$$MR = V_f \delta \frac{1}{d} \frac{39}{32} = 1.22 V_f \delta \frac{1}{d}$$

Lo más significativo de las ecuaciones anteriores es lo siguiente:

- A) El valor del módulo de rotura, después de que se agrietó la matriz, depende solamente del volumen, geometría y orientación de las fibras, así como del esfuerzo de adherencia que se desarrolle. La resistencia de la matriz, influye sobre la adherencia y formación de nuevas grietas.
- B) El valor del módulo de rotura aparente, se incrementa de manera proporcional al contenido de fibras y a la relación aspecto (L/d).
- C) La orientación de las fibras con relación a la dirección del esfuerzo, es el parámetro determinante del comportamiento del concreto reforzado con fibras metálicas, así se puede esperar que un espécimen reforzado en una dirección resista un esfuerzo dos veces mayor que el que soporta cuando las fibras se distribuyen de manera aleatoria tridimensional para volúmenes de refuerzo y resistencia de la matriz iguales.

Un factor importante, cuando se diseña por flexión, que debe considerarse en los cálculos es que las deformaciones unitarias decrecen notablemente con la edad de ensayo, lo cual se debe a las reacciones químicas de hidratación que tienen lugar en función del tiempo. Conforme la reacción de hidratación progresa, la adherencia entre matriz y fibras se incrementa, por lo tanto la deformación unitaria de agrietamiento será menor. El incremento de los esfuerzos de adherencia afectan la resistencia del material compuesto de las siguientes maneras:

- 1) Una fibra bien adherida que cruza una grieta en la matriz de concreto recibirá una mayor transferencia de esfuerzo que una fibra mal adherida debido a que la deformación unitaria en la grieta es infinita y la transferencia de carga se logra sobre una longitud de fibra menor.

Esto permite que la redistribución de esfuerzos sea menor en una matriz de características variables y por lo tanto la deformación unitaria de falla del material compuesto se reducirá.

- 2) Las fibras que cruzan una grieta, con una distribución angular aleatoria con relación al plano de la grieta, estarán sujetas a esfuerzos elevados de flexión conforme al ancho de la fisura, debido a la mayor resistencia y densidad de la matriz en el punto donde la fibra se flexiona.
- 3) La reducción de la deformación unitaria de falla del material compuesto puede conducir a una menor resistencia a flexión, aunque la resistencia a tensión directa permanezca igual.

El punto más importante que debe considerarse cuando se diseña es que si se desea obtener el bloque de esfuerzos de la figura 11, la distribución de deformaciones unitarias en flexión debe aproximarse a la que se ilustra en la figura 16 (a). El material representado en esta gráfica cumple con el requisito de que la deformación unitaria en flexión, sea igual a 18 ϵ_x la de tensión directa, además de sostener la carga máxima. Por lo tanto el momento resistente $M_r = 0.41 V_c m D^3$

Sin embargo, la capacidad de deformación unitaria del material representado en la figura 16 (b), es insuficiente para permitir, que la sección transversal alcance la condición del bloque de esfuerzos de la figura 11, que corresponde a un comportamiento dúctil, porque las fibras más alejadas comenzarán a deslizarse o romperse a una deformación del orden de ϵ_x de la de tensión directa, lo que significa que el bloque de esfuerzos de la sección transversal tendrá la geometría del que se representa en la figura 16 (b) y que la capacidad de carga decrecerá a partir de este punto, porque el material sujeto a tensión y con el brazo de palanca mayor no será capaz de soportar carga.

El momento resistente correspondiente a una sección con el bloque de esfuerzos representado por la figura 16 (b), es aproximadamente igual a $0.35 V_{cu} D^2$ y como los valores de V_{cu} son iguales para los dos materiales, significa que la capacidad de carga se redujo en un 15%. Sin embargo, aunque se puede demostrar que un incremento en el esfuerzo de adherencia entre fibras y matriz de concreto de cemento tipo Portland que conduce a reducir la deformación unitaria de falla puede, bajo ciertas circunstancias generar un incremento en el módulo de rotura, esto es poco factible que ocurra.

Con lo expuesto hasta el momento es posible estimar el comportamiento del material compuesto a base de fibras de acero y matrices de concreto o mortero de cemento tipo Portland. Sin embargo la precisión de los cálculos es limitada por la falta de conocimiento de la curva esfuerzo-deformación unitaria adecuada para hacerla intervenir en las ecuaciones. Esto significa que, debido a que las medidas para construir una curva esfuerzo-deformación unitaria se obtiene a partir de transductores extensométricos con longitudes de medida entre 1.0 y 10.0 in., sólo se cuenta con deformaciones unitarias promedio.

Para que estas medidas pudieran intervenir en los cálculos apropiadamente, se requiere que las deformaciones unitarias promedio se obtengan a partir de una longitud de medida inferior a 2 mm. y que, además, dicha longitud cruzara una grieta. De esta manera será posible determinar la posición del eje neutro de la sección transversal de una viga de concreto o mortero, reforzado con fibras metálicas, sujeta a flexión, con mayor precisión. Por lo tanto, las curvas esfuerzo-deformación unitaria que se han publicado y, que consideran esfuerzos de adherencia óptimos generalmente conducen a subestimar el valor del módulo de rotura, cuando se usa el criterio de análisis expuesto.

Un enfoque más acertado, que muestra los efectos generales de la geometría de la curva esfuerzo-deformación unitaria y de la capacidad de deformación por tensión sobre la capacidad de carga de los materiales compuestos a base de cementantes hidráulicos, lo plantearon Laes y Ali. En la figura 17 se ilustra el concepto de estos investigadores, se ilustran las curvas de esfuerzo por flexión, las cuales se pueden considerar como la representación gráfica de los módulos de rotura calculados a partir del momento flexionante de una viga linealmente elástica sujeta a flexión pura.

En esta figura, la línea OAB' representa las deformaciones unitarias para módulo de rotura aparente, calculado a partir del comportamiento relativamente pobre en tensión de la curva esfuerzo-deformación unitaria, OAB. Esto implica que el valor de la carga máxima por flexión se alcanzará después de que el esfuerzo máximo por tensión se alcanzó en la zona de tensión, según el bloque de esfuerzos de la sección transversal, siempre y cuando la capacidad de deformación unitaria a tensión sea adecuada. De la misma figura, se puede apreciar que el módulo de rotura aparente OAC' calculado a partir de la curva OAC, se incrementa conforme el material fluye hasta que la relación entre el módulo de rotura y el esfuerzo de tensión directa alcanza un valor de 3.

En el caso de flexión, es difícil concebir la razón fundamental por la que el espaciamiento entre fibras está relacionado con la resistencia post-agrietamiento, debido a que la matriz agregada no es capaz de resistir esfuerzo alguno a través de una grieta. Sin embargo, debe mencionarse que varios autores insisten en asegurar que el espaciamiento sí tiene influencia en el comportamiento de un elemento, después de que se presentó la primera grieta. Pero cuando se emplean las ecuaciones anteriores y se hace intervenir el parámetro de espaciamiento según Drenchel, se puede observar que no existe relación entre éste y el momento resistente último, porque otros factores tales como la longitud de las fibras, adherencia y orientación del refuerzo tienen mayor influencia que la separación entre centroides de fibras.

Como se explicó anteriormente, el volumen de refuerzo mínimo depende de la relación entre el esfuerzo de tensión y el de adherencia. En la práctica esta relación se puede considerar un valor igual a uno. En la figura 18 se puede observar que para que la sección quede reforzada a flexión, los volúmenes de refuerzo deberán estar comprendidos entre 0.3 y 1.34 según la relación de aspecto L/d y la orientación de fibras.

Lo interesante de esta figura y de las ecuaciones expuestas en este capítulo es que, para un valor de la resistencia a tensión- V_f y uno de adherencia ϕ , el producto de la relación de aspecto- L/d y el volumen mínimo de fibras V_f mínimo necesario para que la sección quede reforzada a flexión, será un valor constante para una orientación de fibras en particular, dentro de la matriz de concreto de cemento tipo Portland. Esta observación pretende confirmar las conclusiones de Johnston, quien asevera a partir de resultados experimentales, que el producto de contenido de fibras y la relación de aspecto es el parámetro con mayor influencia en el comportamiento del concreto reforzado con fibras metálicas.

Para el concreto con densidad normal, el peso de las fibras (w) es relativamente proporcional al volumen y , como el peso de fibras por m^3 de concreto puede tener mayor significado para el ingeniero que el volumen de refuerzo, el parámetro $w l/d$ se incorporó en las figuras 18 y 13 donde (w) es igual al porcentaje de fibras por peso del concreto.

El efecto de reducir o incrementar la resistencia al agrietamiento de la matriz de concreto, con relación al esfuerzo de adherencia se muestra en la figura 19, en la que se puede observar que un material débil tal como el concreto fresco se puede reforzar a flexión con un contenido de fibras menor al 0.5%, si las fibras tienen una relación de aspecto igual a 100.

En la figura 20, se muestra la gráfica de la relación entre el módulo de rotura aparente y el volumen mínimo de refuerzo.

De esta figura, que concuerda con los resultados experimentales de varios autores, se puede observar que para un esfuerzo de adherencia fijo e igual a 35 Kg/cm² así como para una relación de aspecto igual a 100, se requiere para reforzar una sección con distribución aleatoria tridimensional más del doble de fibras que las necesarias para reforzar la misma sección cuando las fibras se orientan en la misma dirección que el esfuerzo.

El factor que según la teoría expuesta a lo largo de este capítulo, controla el cálculo del módulo de rotura, M_R , es el valor del esfuerzo de adherencia τ . La geometría de la fibra que puede incrementar el valor del esfuerzo de adherencia por anclarse en la matriz, pero que desliza ligeramente o se estira para dar cierta ductilidad al material compuesto, mientras sostiene o incrementa el valor del módulo de rotura, es un ideal difícil de lograr en la práctica, ya que cuando se logra incrementar el anclaje, la matriz comienza a fracturarse lateralmente a lo largo de la interfase, rompiendo la adherencia e incrementando el desplazamiento de las fibras. El efecto de variar el esfuerzo de adherencia τ , sobre el módulo de rotura se muestra en la figura 21.

5. ESTUDIO EXPERIMENTAL EN UN TUNEL DE LA LINEA 7 DEL METRO

5. ESTUDIO EXPERIMENTAL EN UN TUNEL DE LA LINEA 7 DEL METRO.

5.1 Hipótesis de Trabajo.

Las fibras "Dramix", que se han empleado en algunas aplicaciones en el Extranjero, los métodos de mezclado, dosificación y colado que siguieron para lograr que las mezclas de concreto reforzado con fibras fueran homogéneas y alcanzaran la trabajabilidad adecuada para posibilitar su colocación y compactación difieren de los procedimientos usuales en las obras del Metro.

Una de las primeras acciones que se ejecutaron, para la realización de la investigación que a COVITUR le interesó, fué la de localizar en el mercado el tipo o tipos de fibras metálicas que por sus características físicas y geométricas se adaptaran a las necesidades del estudio y equipo de construcción, que tiene la constructora que realiza las obras del Metro.

Dentro de los objetivos generales del estudio, se estableció que para satisfacer los requisitos estructurales, el concreto lanzado con fibras debería alcanzar una resistencia a tensión por flexión a 28 días de edad, del orden de 70 Kg/cm², medida en una prueba de flexión efectuada sobre especímenes estandar cargados a los tercios del claro, además, el material debería exhibir un comportamiento dúctil después de alcanzar el esfuerzo de agrietamiento y - ser capaz de sostener cuando menos el 40 por ciento de la carga de agrietamiento.

Entre los objetivos del estudio, se contempló la posibilidad de - localizar en el mercado nacional un sustituto de las fibras de - procedencia extranjera o bien un fabricante de productos de alambre que se interesara en producirlos en el país, así como diseñar una fibra con la geometría y características físicas y mecánicas adecuadas a las necesidades constructivas de COVITUR.

Después de analizar el mercado internacional de fibras metálicas, los objetivos de ensayo se enfocaron a conocer el comportamiento del concreto reforzado con fibras de Australia, Suiza, Estados Unidos y México. La selección se hizo con base en sus propiedades mecánicas y características físicas; éstas últimas se consideraron más importantes porque determinan la facilidad o dificultad de mezclado, colocación y compactación.

Las hipótesis de trabajo planteadas fueron las siguientes:

- 1) Las dificultades de Mezclado y compactación del concreto reforzado con fibras, están en función de las características geométricas de las fibras y puede minimizarse seleccionando el tipo adecuado de fibra y diseñando las mezclas de acuerdo a las propiedades de las fibras seleccionadas.

- 2) El equipo de lanzado en seco "Aliva", puede emplearse para lanzar concreto reforzado con fibras si las propiedades geométricas de las fibras, se ajustan a las características mecánicas y de operación del equipo.
- 3) La resistencia mecánica del material compuesto a base de fibras metálicas y matriz de concreto tipo Portland, se puede estimar mediante el empleo de las ecuaciones, y conceptos teóricos expuestos en el capítulo anterior, pero se requiere introducir en estas expresiones, los parámetros que consideren las características mecánicas de la matriz que se puede fabricar con los materiales disponibles y las variaciones de compactación que se presentan normalmente con el equipo Aliva.
- 4) Si se comparan los resultados de pruebas mecánicas entre especímenes colados en campo y fabricados en laboratorio, los valores de resistencia a tensión por flexión de los especímenes de campo deben ser mayores, porque la compactación que proporciona el equipo de lanzado es mejor que la que se obtiene en condiciones de laboratorio.
- 5) La resistencia a tensión por flexión medida en especímenes de campo debe ser mayor que la de los especímenes colados en laboratorio, porque el equipo de lanzado propicia que las fibras se orienten de manera preferencial en dos direcciones paralelas a la superficie del túnel.
- 6) La resistencia a flexión que, por necesidades estructurales, debe tener el concreto lanzado con fibras está en función del diseño de mezclas y colocación del concreto. De estos dos parámetros, el segundo tiene mayor influencia sobre las propiedades mecánicas del material.
- 7) Es factible diseñar una fibra cuyas características físicas-geométricas y mecánicas mejoren el comportamiento del concreto reforzado con fibras extranjeras, sometido a esfuerzos de tensión por flexión.

5.2 METODOLOGIA

En el Mercado Internacional se localizaron 3 proveedores de fibras metálicas, uno de los Estados Unidos, representado en México por el grupo Peñoles, un proveedor Suizo representante del equipo para lanzado marca Aliva y un proveedor Australiano de la Empresa Fibresteel Inc.

El Proveedor Norteamericano ofrece 2 tipos de fibra distintas: fibras lisas de sección rectangular y fibras deformadas también de sección rectangular. El primer tipo de fibras se puede adquirir en 3 tamaños; 18, 24, y 28 mm. de longitud y el segundo sólo en 24 mm. de longitud.

Las fibras Suizas, (ALIVA) son alambres muy delgados de sección irregular con diámetro aproximado a 0.1 mm. y longitudes entre 6 y 10 mm. estas fibras son semejantes a un producto nacional que se comercializa como artículo de limpieza. Las fibras Australianas son de sección rectangular, 18 mm. de longitud y tienen los extremos ensanchados.

En las fibras de construcción de la línea 7 Norte del Metro se emplearon agregados andesíticos con una relación grava-arena del orden de 30/70 y tamaño máximo de agregado grueso de 19 mm. Con objeto de variar lo menos posible las relaciones grava-arena de uso común en las obras el Metro, se determinó que una serie de pruebas se haría utilizando los agregados sin hacer ajustes de granulometría.

Sin embargo, para los objetivos del Estudio, se consideró conveniente modificar las relaciones grava-arena para conocer la influencia de la variación de granulometría sobre el comportamiento a flexión del concreto reforzado con fibras metálicas tanto en pruebas de laboratorio como de campo. Por lo que dentro del grupo de variables se estudiaría el comportamiento de mezclas con relaciones grava-arena de 30/70, 40/60 y 50/50.

Las mezclas para lanzado utilizadas en la línea 7 Norte, tienen una dosificación de cemento próxima a 470 Kg/m³, una relación agua-cemento estimada entre 0.4 y 0.5 y una relación cemento agregado entre 3 y 3.5, así que se determinó que la dosificación similar sería 480 Kg/m³ de cemento 1440 Kg/m³ de agregados pétreos cuyo tamaño máximo de agregado grueso, fuera 19 mm; relación agua-cemento 0.45 y se estimaría un contenido de aire atrapado en la mezcla igual a 0.025 m³.

Durante la planeación del estudio, se definieron las variables cuya influencia en el comportamiento físico y mecánico del concreto reforzado con fibras convenía investigar. Así se estableció que las variables independientes serían: El tamaño máximo de agregado grueso, relaciones agua-cemento y grava-arena, edad de ensaye, tipo de colado y contenido, longitud y geometría de fibras.

Lo anterior implicaba que debían diseñarse varias mezclas, en las que intervinieran 2 tamaños máximos de agregados gruesos, los cuales fueron 13 y 19 mm. 3 relaciones agua-cemento, las seleccionadas fueron 0.45, 0.55 y 0.62, 3 relaciones grava-arena; 30/70, 40/60, y 50/50, 7 dosificaciones de fibras metálicas 80, 110, 120, 130, 140, 150 y 160 Kg/m³, 5 longitudes de fibras-18, 24 y 28 mm, 5 tipos de fibra; lisa, onduladas, suizas, mexicanas y Australianas, y 3 edades de ensaye; 7, 28 y 90 días de edad, por cada combinación de variables se colarían dos especímenes de prueba, lo cual daría un total de 11540 vigas para pruebas a flexión.

Lo anterior, no resultó factible, por lo que hubo necesidad de limitar la cantidad de especímenes al mínimo indispensable.

Este número de piezas debería ser suficiente para conocer el comportamiento del concreto reforzado con fibras, y permitir los ajustes necesarios que posibilitaran el diseño de las mezclas adecuadas para el lanzamiento del revestimiento primario y definitivo del túnel de prueba.

Se decidió que se usaría un solo tipo de fibra y una longitud para hacer las pruebas en función del tiempo. Se seleccionaron las fibras lisas de 24 mm. para este grupo de pruebas; así, se harían pruebas con 7 dosificaciones de fibras, 3 edades de ensaye, 2 tamaños de agregados grueso, 3 relaciones agua-cemento y 3 grava-arena. Por cada variable se ensayarían dos especímenes a flexión.

Al final de la prueba de flexión de cada viga se cortaría un cubo, con lo que se contaría con el mismo número de especímenes para compresión; en total se tendrían 756 vigas por colado y 756 tubos por corte.

Con las fibras lisas de 18 y 28 mm. de longitud se harían las pruebas comparativas, necesarias para conocer la influencia de la relación aspecto sobre el comportamiento del concreto reforzado con fibras metálicas sujeto a esfuerzos de flexión, a 28 días de edad solamente por lo que en esta serie se tendrían como variables a 2 longitudes, 3 relaciones grava-arena y 3 agua-cemento, 2 tamaños máximo de agregado grueso, 7 dosificaciones de fibras y 2 especímenes por variable para pruebas de flexión y 2 cubos cortados por viga. En total serían 504 vigas y 504 cubos.

Con las fibras Australianas y onduladas se trataría de establecer la influencia de la geometría sobre la resistencia a flexión del concreto a 28 días de edad, así como su capacidad, de carga a compresión. Las variables serían un tamaño máximo de agregado grueso: (13 mm.) 2 geometrías, 7 dosificaciones, 3 relaciones agua-cemento y 3 grava-arena. También se colarían 2 vigas por variable y se contaría un cubo por viga; en total se tendrían 252 vigas y 252 cubos.

Cuando se tuvo la posibilidad de estudiar el comportamiento del concreto reforzado con fibras suizas, se tomó la decisión de diseñar únicamente seis mezclas, las cuales tendrían como variables el tamaño máximo de agregado grueso y la dosificación de fibras; la decisión, se fundamentó en el hecho de que estas fibras tenían demasiada superficie por corrosión, por lo que el contenido de fibras se limitó a 40,50 y 70 Kg/m³. Con estas mezclas se colaron 24 vigas, para ensayos de tensión por flexión a 28 días y de cada una se cortaría un cubo.

Uno de los objetivos del estudio era el de conocer el comportamiento del concreto lanzado con fibras. Para determinarlo se necesitaba conocer los problemas de mezclado y resistencia que se obtenían con dosificaciones estudiadas en laboratorio y a partir de los resultados diseñar y ajustar mediante pruebas de campo -- las mezclas que tuvieran mayores posibilidades.

Como parte de la metodología de estudio, se necesitaba conocer la variación de resistencias a compresión del concreto lanzado en túneles de Metro, por lo que se solicitó al laboratorio de materiales los resultados de un mes de muestreo. Adicionalmente se prepararon en el laboratorio dos dosificaciones de grava - arena que se llevaron a obra y se solicitó que se lanzaran, permitiendo que el equipo de mezclado y lanzado dosificara el cemento y el agua. Con estas mezclas se obtuvieron las muestras necesarias para cortar 3 vigas por mezcla y ensayarlas a flexión para establecer la resistencia testigo.

Posteriormente, en función de los resultados de ensayo se diseñaron 12 mezclas para lanzado. Las variables fueron: el tamaño máximo de agregado grueso, la dosificación de fibras (80, 110 y 130 - Kg/m³) y el tipo de fibras, (lisas y onduladas, ambas de 24 mm. de longitud.) Por cada lanzado se cortaron 3 vigas y 3 corazones para pruebas de tensión por flexión y compresión.

En las tablas 2 a 25, se muestran las dosificaciones de las mezclas de concreto reforzado con fibras que se emplearon durante la fase experimental, para estudiar los problemas de mezclado, compactación y resistencia con relación a las variables antes mencionadas.

5.3 MATERIALES

En el estudio del comportamiento de concreto reforzado -- con fibras, metálicas se emplearon los agregados pétreos de la lumbrera 7 y de la estación Refinería de línea 7 norte del Metro. Estos agregados se muestreaban cada tercer día, con objeto de contar, durante el tiempo que duraron las pruebas, con material representativo de las variaciones de contenido de polvos y granulometría, que normalmente se presentan en la construcción.

Después del muestreo, se tomaba una cantidad suficiente de agregados para colar dos series de mezclas de prueba. Las muestras servían para determinar la granulometría, peso volumétrico suelto -- y compacto, densidad, absorción y humedad. Las porciones mayores se transportaban al laboratorio, donde se secaban al horno durante 24 horas a $150 \pm 5^\circ\text{C}$ y después del secado se procedía a separar la grava de la arena mediante un cribado.

Cuando se contaba con una cantidad suficiente de grava y arena, secas al horno, se procedía a renecliarlas de acuerdo a la relación grava - arena correspondiente a un grupo de mezclas. La razón de secar los materiales al horno, cribarlos y renecliarlos, se debe a la necesidad de tener un control adecuado a los consumos de agua de mezclado y mantener las relaciones agua - cemento dentro de límites aceptables, así como asegurar que las granulometrías de los agregados correspondían a las establecidas en las dosificaciones de las tablas 2 a 25. En las figura 22 se muestran algunas actividades de la rutina de caracterización física de las muestras de gravas y arenas obtenidas cada tercer día de las obras del Metro de la línea 7 norte.

5.4 PRUEBAS DE MEZCLADO EN LABORATORIO Y CAMPO.

En el caso de las fibras de 24 y 28 mm, se hizo necesario utilizar una malla de 38 mm, de abertura para separar los grupos de fibras entrelazadas y propiciar una distribución uniforme dentro de la masa de concreto fresco.

Con las fibras lisas de 18 mm, onduladas de 24 mm, y Australianas de 18 mm, no se requirió de la malla, porque debido a relación aspecto, relativamente baja, no se presentaron problemas de incorporación, mezclado y uniformización.

Se observó que convenía, en el caso de fibras de 24 y 28 mm, incorporar los agregados petreos primero, en segundo término el agua de absorción y la mitad de las fibras, agregar una parte del agua de mezclado y el cemento, mezclar por 2 minutos y agregar el resto del agua de mezclado junto con la segunda parte de las fibras. Este procedimiento se siguió con las mezclas que contenían agregados de tamaño máximo 19 mm y relación grava- arena 50/50. En todos los demás casos, las fibras se podían incorporar al final y después de un mezclado previo de 1 minuto.

Para hacer las pruebas de mezclado en campo, se preparaban dos mezclas de 60 lts. cantidad suficiente para llenar 3 artesas con las dimensiones adecuadas para el corte de 3 vigas y 3 corazones.

Con las mezclas de agregados y fibras, dosificadas de manera que se ajustaran a los proporcionamientos de las tablas 24 y 25, empacadas en sacos de plástico se procedía a transportarlas al frente de trabajo, en la línea 7, donde se había autorizado el lanzamiento de prueba.

4.6 Colado de Especímenes de Laboratorio.

Después de haber establecido la secuencia de colocación de ingredientes en la revoladora y de haber determinado, que solo en el caso de fibras lisas de 24 y 28 mm, éstas debían colocarse en dos etapas, cuando los agregados fueran de 19 mm. y la relación grava - arena fuera 50/50 se determinó que el procedimiento de colado de especímenes debía ser el siguiente:

Preparar la mezcla testigo con un volumen suficiente para colarseis vigas, mezclar y medir el revenimiento antes de agregar las fibras, así como el peso volumétrico, colar especímenes testigo, agregar la primera dosificación de fibras; empezando por la correspondiente de 80 kg/m³, mezclar y colar los especímenes correspondientes, posteriormente agregar la segunda dosificación de fibras, por ejemplo la equivalente a 110 kg/m³.

De esta manera se posibilitó el colado de varias alternativas de dosificación de fibras con un solo mezclado. Además presentó la ventaja, que los especímenes testigo pertenecían a la misma mezcla, colada y dosificada de igual manera que las mezclas de concreto reforzado con fibras.

Los especímenes de ensaye, que se emplearon para las pruebas fueron piezas de concreto rectangulares de sección cuadrada de 10 X 10 cm. y longitud de 25 cm. Debido a que las dimensiones de las vigas no se ajustan a las dimensiones estandar, según las normas ASTM, se hicieron dos series paralelas con especímenes de 15 X 15 X 60 cm, que son los recomendados, se hizo una comparación de resultados y se observó que los especímenes más chicos resisten un 5 por ciento más que los estandar, este incremento se usó como factor de corrección para ajustar las resistencias a flexión a los especímenes estandar.

Todas las compactaciones se hicieron por vibración externa, aplicada mediante una mesa vibradora de laboratorio que proporciona 6,000 vibraciones por minuto.

5.6 PRUEBAS DE LANZADO EN CAMPO.

Todas las pruebas de lanzado se hicieron con el equipo Aliva operando con el mismo personal que labora en las obras de la línea 7 Norte del Metro. Uno de los objetivos de estas pruebas fué el de comprobar que las mezclas de concreto reforzado con fibras, además de lanzables, pueden absorber las fallas de mano de obra y equipo, es decir, que a pesar de las condiciones poco favorables para el lanzado del concreto con fibras, las mezclas se diseñaron de manera que se minimizaran los problemas de lanzado.

Cada lanzado se hizo colocando en el camión mezclador, fig. 23 - los agregados previamente mezclados con las fibras metálicas. Antes de vaciar la mezcla de prueba en la tolva del camión, se hizo una limpieza que incluyó el gusano. Las mangueras y lanzado ra también se limpiaron y revisó el estado general de los equipos de la Aliva.

Cada una de las mezclas que se probaron en campo, se lanzaron sobre artesas como las mostradas en la figura 24.

5.7 CURADO ESTANDAR Y ACELERADO

Debido al número elevado de pruebas por ejecutar y a la necesidad de contar con resultados de laboratorio en lapsos cortos, se hizo una serie de pruebas de curado acelerado. Las cuales consistieron en colar unos especímenes para flexión en moldes metálicos, colocarles una tapadera, también metálica. Después del colado e introducirlos a la cámara de curado húmedo, donde permanecieron 24 horas; transcurrido este tiempo se sumergieron en agua hirviendo con moldes donde permanecieron 3 horas, al final de las cuales se extrajeron del agua hirviendo y se permitió que enfriaran por una hora. En total, este procedimiento dura 28 horas desde el colado hasta el ensaye.

Paralelamente se siguió otro procedimiento que consistió en sumergir también en agua hirviendo, pero saturada con hidróxido de calcio, las vigas que servirían para el ensaye a flexión.

5.8 ENSAYES A COMPRESION Y FLEXION.

Los ensayos de compresión y flexión se hicieron en una máquina universal de pruebas marca Baldwin Tate Emery, con capacidad máxima de carga igual a 200 ton. Este equipo cuenta con un graficador carga - deformación, con el que se puede obtener directamente del ensaye una gráfica carga - deflexión de los especímenes para tensión por flexión.

Como se mencionó anteriormente, se fabricó una serie de cilindros de concreto reforzado con fibras metálicas. Estos cilindros fueron los de uso común para pruebas a compresion, los cuales tienen 15 cm. de diámetro y 30 cm. de altura. Los especímenes cilíndricos de esta serie sirvieron como referencia para las pruebas de compresión sobre cubos.

Todas las muestras para ensayo se midieron, pesaron y secaron superficialmente durante 30 minutos antes de romperlas. En la fig. 26 se muestra uno de los cubos en el momento de fracturarse por efecto de la carga; estos cubos provienen de los especímenes rectangulares de 10 X 10 X 25 cm. que se emplearon para las pruebas de flexión.

5.9 PRUEBAS ESPECIALES.

Dentro del grupo de pruebas especiales, se plantearon dos series de pruebas de resistencia al ataque por corrosión de las fibras metálicas. Para la ejecución de estas, se usaron dos tipos de especímenes rectangulares y cilíndricos; los rectangulares se colaron en laboratorio y los cilíndricos fueron coraciones de las artesas llenadas por lanzado durante las pruebas de campo.

Las pruebas consistieron en sumergir los especímenes de ensayo en soluciones de NaCl al 0.8 N y HCl al 0.1 N a temperatura ambiente del laboratorio por períodos de 12 hrs. y secarlas al horno, también durante 12 hrs. Cada ciclo de prueba, entre humedecimiento y secado fue de 24 hrs; al final de cada ciclo se registraba el peso de los especímenes y hacían anotaciones sobre el estado general de las piezas de concreto, en lo referente a manchas de óxido.

Después de 15 días de prueba, se ensayó una serie de especímenes a compresión y flexión, con objeto de establecer si hubo pérdida de resistencia, así como para examinar la selección de falla y determinar el grado de penetración de las soluciones agresiva y el deterioro de las fibras.

Dos series más se conservaron a fin de continuar la prueba de ataque por corrosión. Una de estas series, terminó su período de ensayo a los 30 días, momento en el que se procedió con las pruebas de flexión y compresión.

6 RESULTADOS EXPERIMENTALES.

6. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Con objeto de facilitar la interpretación de los resultados de las pruebas, los valores de resistencia a compresión y flexión se ordenaron en forma tabular. Con los datos ordenados en tablas, se construyeron varias gráficas, de las cuales se presentan las más importantes.

6.1 Mezclado y colado.

Durante la ejecución de pruebas de mezclado, se hicieron varios tipos de observaciones, entre los que se pueden mencionar las siguientes.

- A) Dificultad para la incorporación de fibras a la mezcla. Este punto se refiere al hecho de que algunas de las fibras empleadas mostraron diferente grado de dificultad para romper o desbaratar los nidos, que se forman por el entrelazamiento de las mismas.

Normalmente, las fibras lisas planas, se entrelazan por la forma en que vienen empacadas, por lo que antes de emplearlas se cribaron con una malla de 38 mm. de abertura y se pesaron para clasificarlas. En el caso de las fibras de 18 mm, el primer cribado fue suficiente para dejar las fibras, en condiciones de mezclado, lo cual no sucedió con las de 24 mm, que requirieron un cribado ligero y rápido para incorporarlas a la revoladora. Las de 28 mm. se entrelazaron nuevamente y se necesitó de separarlas y colocarlas en la mezcladora a través de una criba.

El mezclado de las fibras lisas de 18 mm. de longitud fue rápido y sencillo de lograr una distribución uniforme en la masa de concreto, aún para dosificaciones de 130 Kg/m³.

Con las fibras planas de 24 mm de longitud, no se presenta gran dificultad para uniformizar una mezcla dosificada hasta con 130 Kg/m³. Debe mencionarse que la manera de añadir las fibras cuenta mucho en la uniformidad y formación de nidos; cuando la cantidad, de fibras excedió los 130 Kg/m³, resultó conveniente utilizar el límite superior del revenimiento fijado para la mezcla antes de añadir las fibras y el cual fue de 12 cm.

Las fibras de 28 mm presentan dificultades de mezclado si la dosificación excede de 110 Kg/m³. Estas dificultades se superaron utilizando un revenimiento de 12 cm. en la mezcla antes de añadir las fibras. Para dosificaciones mayores de 130 Kg/m³, fue necesario colocar las fibras en dos partes; una con los agregados en seco y la segunda parte al final del mezclado. En este caso, el tiempo de mezclado total no debió exceder los 3 minutos, pues un mezclado excesivo propicia la formación de nidos.

Las fibras onduladas y australianas no mostraron dificultad para el mezclado y se logra uniformizar una mezcla en el tiempo normal. Las pruebas de mezclado con estas fibras se llevan a dosificaciones tan altas como 110 kg/m³ sin problema de mezclado ni uniformización de mezclas.

Los comentarios anteriores son válidos para mezclas con relación agua-cemento 0.45, tamaño máximo de agregado grueso de 19 mm. relaciones grava-arena 30/70 y 50/50. Cuando se usa mayor relación agua-cemento o disminuye el tamaño máximo de agregado grueso, las dificultades de mezclado también disminuyen.

Para el colado y compactación de especímenes se empleó una mesa vibratoria de laboratorio. Para establecer el tiempo mínimo de vibrado y alcanzar el peso volumétrico máximo, se hicieron varias pruebas de compactación sobre la misma mesa y con el molde de peso volumétrico. El procedimiento consistió en llenar el molde con la mezcla testigo y compactarlo a varios tiempos de vibrado, después de cada ciclo de vibrado se enrasaba y pesaba, hasta el momento en que se obtenía el peso máximo se fijaba el tiempo de vibrado de moldes. El mismo Procedimiento, se siguió en el caso de las mezclas con fibras.

Si se emplea el tiempo de vibrado para obtener un peso volumétrico máximo, como parámetro de juicio sobre la mayor ó menor dificultad de colado que ofrece un tipo de fibra cualquiera, se puede mencionar que las fibras de 28 mm. requieren mayor tiempo de vibrado en general. Sin embargo, deben considerarse las características de la mezcla, tales como; tipo y tamaño de agregado, relación agua-cemento y dosificación de fibras.

En relación con la mezcla testigo: Las fibras de 18 mm. requieren un 20 por ciento más vibración para dosificaciones hasta de 120 kg/m³ de fibras, del 30 por ciento para contenidos de fibra hasta 150 kg/m³ y del 42 por ciento para 160 kg/m³, si las mezclas tienen una relación agua-cemento de 0.45. Cuando la relación aumenta el tiempo de vibrado disminuye.

Las fibras de 24 mm. requieren de un 30 por ciento más de vibración para contenidos hasta de 110 kg/m³ de fibras, de 50 por ciento cuando el contenido de fibras alcanza el valor de 140 kg/m³, de 80 por ciento para 140 kg/m³ y de 100 por ciento para 160 kg/m³.

Las fibras de 28 mm requirieron de tiempo de vibrado del orden de 300 por ciento más que las mezclas sin fibras. También en este caso, se notó una disminución en el tiempo de vibrado si la relación agua-cemento aumentaba y el tamaño máximo de agregado grueso disminuía. Asimismo, debe mencionarse que cuando la relación grava-arena fué de 40/60 las dificultades de colado se minimizaron.

6.2 Lanzabilidad de las mezclas.

Debido a que el procedimiento de construcción del revestimiento primario y definitivo de túneles de metro en la línea 7 -- norte, se hace por el método de concreto lanzado en seco, se hicieron pruebas de lanzabilidad de mezclas con dosificaciones más parecidas a las de uso común en estas obras.

Las mezclas de agregados y fibras preparadas en el laboratorio se llevaron al frente de trabajo y se hicieron algunas observaciones sobre la mayor o menor dificultad que ofrecían las mezclas para lanzarse. Las fibras seleccionadas para estas pruebas fueron las lisas de 24 mm. y las onduladas de 24 mm.

Para los volúmenes del lanzado de prueba se puede comentar que no se presentó ningún problema, sin embargo al hacer los ensayos para conocer el grado de compactación de los concretos lanzados, -- con fibras se observó que la dosificación con el tamaño máximo de agregado grueso de 13 mm. se compactó mejor. de esto se puede concluir que las mezclas con este tamaño de agregado se lanzan con -- más facilidad.

6.3 Propiedades Mecánicas.

El estudio de propiedades mecánicas se limitó, en la mayoría de los casos, a determinar el esfuerzo máximo a flexión y compresión a 28 días de edad, porque el número de especímenes resultó muy grande debido a que se estudiaron muchas variables al mismo tiempo. Los resultados más importantes se encuentran ordenados en las tablas 26 a 80, para facilitar la comprensión de estos resultados las tablas se dividieron en 4 grupos: el primero de la 26 a la 34, en este grupo de tablas contiene los resultados de -- ensayos a flexión de los concretos reforzados con fibras americanas planas, lisas de 18, 24, y 28 mm de longitud, probados a 28 -- días de edad.

Las variables que se estudiaron con el primer grupo de tablas son: longitud de fibras y dosificación de fibras, relación agua - cemento y grava - arena, para un tamaño máximo de agregado grueso - 19 mm. Con los valores de las tablas 26 a 34 se construyeron las -- gráficas de las figuras 27 a 41.

Al observar los valores de las tablas 26 a 34, se puede apreciar de manera general, que conforme se incrementa el contenido de fibras aumenta la resistencia a flexión, que es lo esperado. Sin -- embargo, es notorio que sin importar la relación grava - arena o -- agua - cemento, los valores comparados entre fibras de 18, 24 o -- 28 mm, son similares, cuando era de esperarse que la resistencia aumentara proporcionalmente con la longitud de las fibras.

Las tendencias generales de comportamiento se aprecian en las figs. 27 a 41; de la observación de estas figuras, queda claro que con relaciones grava-arena 30/70, la dispersión de resultados es menor y que la longitud de las fibras prácticamente no influye en los resultados a flexión. En estas mismas figuras se puede corroborar que con las fibras de 28 mm. se obtienen valores de resistencia a flexión menores que los logrados con fibras de 18 a 24 mm.

Un hecho relevante respecto a las figs. 27 a 29 es que la relación grava-arena afecta de manera importante el valor del volumen de refuerzo crítico (V_r crit). En el caso de relaciones agua-cemento 0.45 y tamaño máximo de agregado grueso, se necesita aumentar el contenido de fibras si la cantidad de grava se incrementa, así para una relación grava-arena de 30/70 el V_r crit es de 55 kg/m³, para 40/60 es 62 kg/m³ y para 50/50 se requieren 73 kg/m³ de fibras como contenido mínimo para incrementar la resistencia a flexión.

También, al observar las figs. 27, 30 y 33, se aprecia que para una misma relación grava-arena e igual tamaño máximo de agregado grueso, la relación agua-cemento influye sobre el valor del volumen crítico de fibras. Para 0.45 de relación agua-cemento (fig. 27) se requieren 55kg/m³, para 0.55 (fig. 30), se requieren 73 kg/m³ y para 0.62, (fig. 34), si se requiere reforzar por flexión deberán colocarse cuando menos 85 kg/m³ de fibras.

En la figura 37 se muestra el comportamiento promedio por longitud de fibra y el comportamiento promedio de todos los especímenes, ensayados con relación agua-cemento igual a 0.45. De esta figura queda claro que las fibras de 18 y 24 mm. se comportan prácticamente igual, sin importar la relación grava-arena y que el valor crítico de refuerzo promedio general es de 70 kg/m³.

En las figs. 38 y 39, se observa que con la relación, agua-cemento igual 0.55 la dispersión de resultados es mínima y que las fibras, sin importar su longitud o relación grava-arena tienen un comportamiento a flexión similar. De estas figuras también es claro que el valor de refuerzo mínimo necesario para incrementar la resistencia a flexión es de 80 kg/m³.

La figura 40 muestra que, en el caso de emplear una relación agua-cemento igual a 0.62, la longitud de fibra sí tiene influencia sobre la resistencia a tensión por flexión. En este caso, aparentemente, las fibras lisas de 28 mm. aportan mayor resistencia al concreto. Sin embargo al observar la fig. 41 se aprecia que en general hay poca dispersión de resultados y que el valor crítico de refuerzo se puede estimar en 80 kg/m³.

En las tablas 35 a 43 se ordenaron los resultados de ensayos a flexión realizados a 28 días de edad, en estas tablas se concentra el estudio de variables como longitud, tipo y dosificación de fibras así como relación agua - cemento y grava - arena para un tamaño máximo de agregado grueso igual a 13 mm. En estas tablas también se aprecia que conforme, aumenta el contenido de fibras en la mezcla, la resistencia a tensión por flexión se incrementa proporcionalmente.

Al comparar los valores de resistencia entre tipos diferentes de fibra, queda claro que las australianas mejoran la capacidad de carga del concreto ligeramente mas que las otras fibras y que las onduladas parecen no afectar la resistencia del concreto es decir estas últimas no refuerzan por flexión.

Lo anterior se nota claramente en las gráficas de las figs. 42 y 56, las cuales se construyeron con los valores de las tablas antes mencionadas. De estas figuras, se puede mencionar que el tamaño máximo de agregado de 13 mm. permite disminuir el valor crítico de refuerzo, si se compara con los resultados del agregado de 19mm., ya que en las figs. 42 a 56 el V_f crítico no supera los 80 Kg/m³.

En estas figuras se puede apreciar que la dispersión de resultados es menor para la relación agua - cemento igual 0.62 si se compara el grado de dispersión de valores entre agregados de 19 y 13 mm, se observará que cuando el tamaño máximo de agregado grueso disminuye, también la dispersión se reduce.

Un hecho de relevancia para las pruebas de laboratorio, es que los resultados de resistencia a tensión por flexión de los concretos con agregados de 13 mm fue superior a la que se obtuvo con el agregado cuyo tamaño de partícula fué de 19 mm.

Cuando se programaron las pruebas de campo, se pensó que los resultados de ensaye también mostrarían el mismo efecto, sin embargo como se aprecia en la tabla 44, los especímenes con agregado de 13 mm. cortados de artesas coladas en campo por lanzado, muestran valores de resistencia inferiores a los que se colaron por lanzado con agregado de 19 mm. De esta misma tabla se puede concluir que el colado por lanzado mejora las propiedades mecánicas en relación con el colado de especímenes en laboratorio.

En el tercer grupo de tablas 46 a 62 se ordenaron los resultados de ensayos a 7, 28 y 90 días de edad, de pruebas realizadas solo con fibras americanas lisas de 24 mm. En estas tablas, también se registran los valores de esfuerzo para que aparezca la primera grieta y para el esfuerzo máximo en flexión que se alcanza en función del contenido de fibras.

En las tablas 45 a 62, se muestran tablas de resistencia a compresión, obtenida en cubos de 10 X 10 X 10 cm. corregida por el factor de estandarización para hacerlo comparable con la resistencia que se obtiene en cilindros estandar de 15X 30 cm.

Los comentarios generales sobre los resultados mostrados en estas tablas se pueden resumir en: la resistencia a flexión se incrementa conforme aumenta la edad del concreto y la resistencia a compresión muestra una tendencia a incrementarse para contenidos de fibra hasta de 120 kg/m³. Para contenidos mayores la capacidad del concreto a compresión prácticamente es la misma que la de los concretos de referencia.

En el cuarto grupo de tablas, 63 a 80, se reportan los resultados de esfuerzo a la primera grieta y máximo a flexión para 28- y 90 días de edad, relacionados con los valores de deflexión, - en las figuras 59 a 76 se muestran las gráficas construidas con los valores de las tablas 63 a 80 que ilustran de manera esquemática el comportamiento a flexión de especímenes de referencia y vigas de concreto reforzado con 130 kg/m³ de fibras.

6.4 Comparativa de resultados con los obtenidos en pruebas realizadas en el extranjero.

Con la finalidad de tener una idea del éxito en los resultados obtenidos en este estudio, se trato de investigar las - - pruebas hechas en Estados Unidos por la Compañía Mitchell Fiber con Inc., ensayados por la General Testing Laboratories Inc.

Se obtuvieron esfuerzos de flexión y compresión a 7, 28 y 56 - días de edad, los cuales se presentan en la tabla 81.

De la observación de esta se puede concluir que los valores obtenidos en México son muy similares, comprobando con esta el - éxito a las pruebas realizadas.

De la observación de las tablas 82 y 83, realizadas por Hardy - BBT Limited, con fibras Aliva a razón de 60 y 75 kg/m³ respectivamente, se obtuvieron esfuerzos de compresión y flexión bastante altos a los esperados comparativamente, a las pruebas presentadas en la tabla 45 realizada en este estudio.

La razón es debido a que esta mezcla, se le agrego microsíllica a razón de 38 kg, que actua como un aditivo acelerante de fraguado adicional y se puede observar que la resistencia adquirida a los 7 días es sensiblemente inferior a la adquirida a 28 - días.

En la tabla 84 se presentan resultados con mezclas reforzadas con fibras reportadas en distintas obras, con resultados, satisfactorios y semejantes a las pruebas realizadas en este estudio con -- fibras fibercon, y finalmente en la tabla 85 se dan los resultados ensayados por la Mitchell Fibercon, en la que se compara una mezcla convencional con una fibrosa con un proporcionalamiento de -- agregados iguales, obteniendose mejores resultados de esfuerzos a compresión y flexión con la mezcla reforzada con fibras de acero.

7 C O N C L U S I O N E S .

7 CONCLUSIONES.

Durante la planeación del estudio, se definieron las variables cuya influencia en el comportamiento físico y mecánico del concreto reforzado con fibras convenía investigar. Así se estableció que las variables independientes serían: el tamaño máximo de agregado grueso relaciones agua-cemento y grava-arena, edad de ensayo, tipo de colado, contenido, longitud y geometría de fibras.

Para analizar y evaluar los resultados de las pruebas ejecutadas, se emplearon procedimientos estadísticos que permiten determinar el grado de dispersión de los valores obtenidos y calidad de los concretos fabricados. Estos procedimientos también sirven para establecer el grado de influencia de cada una de las variables estudiadas sobre el comportamiento a flexión y resistencia a compresión del concreto reforzado con fibras metálicas.

En las tablas 86 a 89, se dan los resultados en forma tabular, el estudio estadístico de los datos experimentados en laboratorio, de pruebas de concreto reforzado con fibras lisas Americanas, esto permite determinar el grado de dispersión de los esfuerzos obtenidos y calidad de los concretos ensayados. En la figura 77 se representa la curva de distribución estadística normalizada con las medidas de tendencia central, media y desviación estandar.

De la observación de las tablas mencionadas se observa que, con relaciones grava-arena, 30/70 la dispersión de resultados es menor y que, la longitud de las fibras practicamente no influye en los resultados a flexión.

También es claro que para una relación agua-cemento igual a 0.55 la dispersión de resultados es mínima y que las fibras sin importar su longitud ó relación grava-arena tienen un comportamiento a flexión similar.

Cuando se revisaron las tablas 26 a 34, se observó que se cumplía el hecho esperado de que a mayor contenido de fibras la resistencia a tensión por flexión se incrementaba de manera proporcional. Sin embargo, también se esperaba que la capacidad de carga a flexión aumentara en función de la relación "aspecto" (L/d), pero no se cumplió.

Al analizar con detenimiento los resultados de los ensayos y revisar los registros de laboratorio, donde se asentó el número de fibras que después de fracturar un espécimen de prueba, quedan expuestas en la sección de falla, se comprobó la existencia de una relación entre el número de fibras que refuerza una sección y la longitud de la fibra.

Lo anterior significa que, si se emplean fibras de 28 mm. de longitud, habrá menos unidades reforzando la sección de un elemento sujeto a flexión, que si se emplean fibras de 18 mm. Esto implica que el peso por unidad de refuerzo tiene más influencia sobre los resultados de ensaye.

Para probar la hipótesis anterior; se pesaron 600 fibras de cada una de las longitudes estudiadas. Se verificó que las fibras de 18 mm. pesan 20% menos que las de 24 mm. y estas, 15% menos que las de 28 mm.

Al hacer lo mismo con las fibras onduladas, las que además se supone que por su geometría deberían aportar mayor resistencia al concreto se encontró que con relación a las fibras, de 24 mm. las onduladas pesan 2.6 veces más, lo que implica que para contenidos iguales en una mezcla de concreto, hay 2.6 veces menos fibras reforzando una sección si se emplean las onduladas.

El razonamiento anterior, pretende explicar la razón por la que las fibras de 28 mm. mostraron, menor influencia, sobre la resistencia a flexión del concreto, así como la razón por la cual, las fibras onduladas, aparentemente no refuerzan. Debe mencionarse que desde el punto de vista ductibilidad y tomando en cuenta el número de unidades de refuerzo por unidad de área, las fibras onduladas son más eficientes.

Al observar las figuras 27 a 29, se puede concluir que la relación grava-arena afecta el valor crítico de refuerzo, especialmente en el caso de mezclas con relación agua-cemento igual a 0.45 y tamaño máximo de agregado grueso de 19 mm. Si en este caso se considera que para una relación grava-arena 30/70, el contenido de agregado con tamaño máximo de partícula menor de 5 mm. ocupa el 20% del volumen y como anteriormente se explicó que la libertad de movimiento de las fibras está en función del tamaño de agregado, resulta lógico esperar una mejor distribución de fibras en la masa de la matriz de concreto y por lo tanto, una mayor probabilidad de que exista un número adecuado de fibras orientadas en dirección correcta para resistir los esfuerzos de tensión por flexión.

De las figuras 27, 30 y 33 se puede concluir que la relación agua-cemento influye sobre el valor del volumen crítico de refuerzo, si se comparan los valores entre mezclas con la misma relación grava-arena e igual tamaño máximo de agregado grueso. Esto se puede considerar como un fenómeno esperado porque el esfuerzo de adherencia es función de la resistencia de la matriz, de la relación agua-cemento y de las reacciones químicas que se efectúan en la interfase matriz-fibras.

Un hecho de relevancia para el análisis y explicación de los fenómenos observados es que la relación agua-cemento influye sobre la dispersión de resultados. En el caso de las mezclas con relación agua-cemento 0.55, la dispersión fué mínima y con 0.62, no sólo se abatió la dispersión sino que se observó que las fibras de 28 mm. fueron más eficientes.

La explicación de lo anterior puede ser; que a mayor contenido de pasta de cemento se mejora la lubricación entre partículas de agregado y superficies de fibras, lo que permite distribuir de manera más uniforme el contenido de fibras dentro de la matriz de concreto. El hecho de que las fibras de 28 mm. mostraran mayor eficiencia como refuerzo de los concretos con relación agua-cemento 0.62, se puede deber a la misma razón.

Cuando se analizaron los resultados de pruebas de laboratorio y se compararon con los de campo, se observó que las mezclas preparadas con agregado de 13 mm. muestran mayor capacidad a flexión que las mezclas con agregado cuyo tamaño máximo fué de 19 mm., en las vigas fabricadas en el laboratorio. Las de campo, mostraron un comportamiento contrario, es decir, las que se hicieron con agregados de 19 mm. resisten más si provienen de concreto lanzado.

En el caso de laboratorio, las mezclas se curaron de acuerdo a las normas estándar. Las de campo debieron permanecer en el túnel por 24 hrs. y después transportarse al laboratorio. Tal vez esta diferencia de curado y manejo, propició la aparición de agrietamiento por contracción de secado, la cual se enfatiza por el manejo originando pérdidas de adherencia de las fibras en la vecindad de las grietas determinando una baja de resistencia.

Finalmente, se comprobó que el efecto de las fibras sobre la resistencia a compresión es mínimo, comparado con el aporte en flexión. En general se obtuvo un 20% de incremento de resistencia para valores de contenido de refuerzo de 130 Kg/m³. Al aumentar el volumen de fibras la resistencia a compresión tiende a disminuir.

De las observaciones y análisis de resultados se obtuvieron varias conclusiones entre las cuales se pueden mencionar las siguientes:

- 1) El equipo de lanzado que se emplea en las obras del Metro, sí puede usarse para lanzar concreto reforzado con fibras metálicas.

- 2) Las fibras con longitud menor de 24 mm. ofrecen menor problema de mezclado, homogenización y lanzado.
- 3) Las fibras netálicas australianas incrementan la resistencia a flexión un 8% más que las fibras lisas americanas de 24 mm.
- 4) El comportamiento a flexión que se obtiene con las fibras lisas de 24 mm. es satisfactorio desde el punto de vista resistencia y deformabilidad del concreto sometido a esfuerzos de tensión por flexión.
- 5) Las mezclas de concreto simple con relación agua-cemento 0.45 y grava-arena 40/60 se comportan de manera similar a los concretos lanzados en túnel por lo tanto se considera que la sección y ajuste de mezclas para las pruebas de lanzado con fibras fué adecuada.
- 6) Se estima que los concretos con agregados de tamaño máximo de partícula igual a 13 mm., son los más recomendables para bombear concreto con fibras si la relación grava-arena es 40/60.
- 7) Es probable que la diferencia de resultados entre mezclas lanzadas con agregado de 19 mm. y 13 mm. se deba a que con agregado de 19 mm. hubo menor agrietamiento debido a contracción por secado y el contenido de aire atrapado se redujo.
- 8) La razón por la que las fibras onduladas de 24 mm. no refuerzan por flexión es el peso por unidad; una fibra ondulada pesa 2.6 veces más que una plana de la misma longitud.
- 9) Según los resultados de ensaye para la resistencia a flexión es más importante el número de unidades de refuerzo por unidad de área, en la sección transversal de los especímenes sujetos a flexión, que la relación-aspecto.

- 10) Las diferencias en dispersión de resultados en función de la relación agua-cemento, parece deberse a que una mezcla con más pasta permite una mayor lubricación de superficies de fibras y se logra uniformidad en la distribución de fibras.
- 11) La resistencia a tensión por flexión se incrementa debido al lanzamiento, que permite una mejor compactación y distribución de fibras.
- 12) De las pruebas realizadas en otros países (tablas 81 a 84) - se obtuvieron valores, que aún en condiciones diferentes, de granulometría, relación-aspecto, y tipo de agregado, arroja resultados semejantes a las pruebas reportadas en esta tesis.

- COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES.

Normalmente, la construcción del revestimiento primario en tuneles, a base de concreto lanzado tradicional se realiza después de instalar una serie de anclas que sujetan el armado de acero de refuerzo; estas operaciones consumen tiempos de equipo y mano de obra, por lo que se recomienda dado los resultados de esta tesis, ensayar en campo un tramo de túnel revestido de concreto lanzado reforzado con fibras de acero, eliminando el armado de barras de acero, optimizando el uso de recursos económicos, abatiendo los tiempos de ejecución de obra.

Si se eliminan los tiempos de anclaje y colocación de refuerzo, puede acelerarse la excavación y construcción del revestimiento.

A N E X O 1.

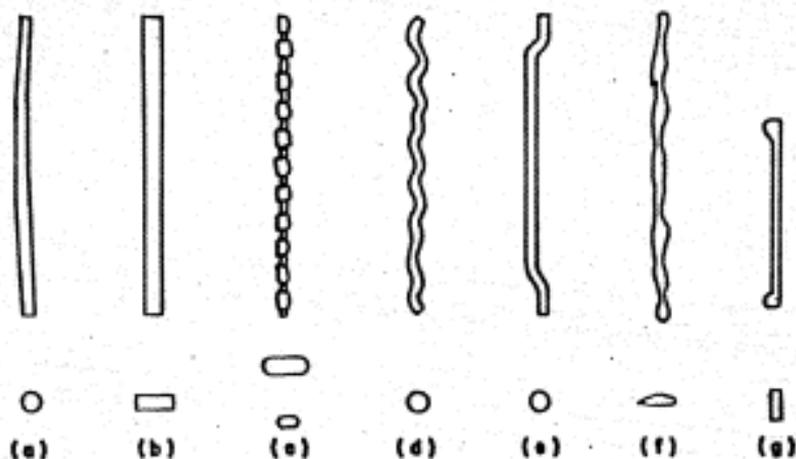


FIG. 1

GEOMETRIA DE LAS FIBRAS METALICAS DE USO COMUN. (a) REDONDA, (b) RECTANGULAR, (c) MUECADA, (d) ONDULADA, (e) DRAMIX, (f) FUNDIDA, (g) EXTREMOS ENSANCHADOS.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

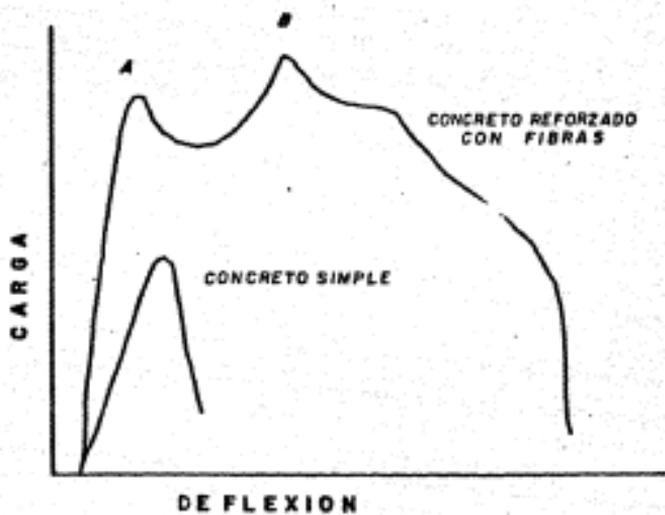


FIG. 2

ESQUEMA DE CURVA CARBA-DEFLEXION

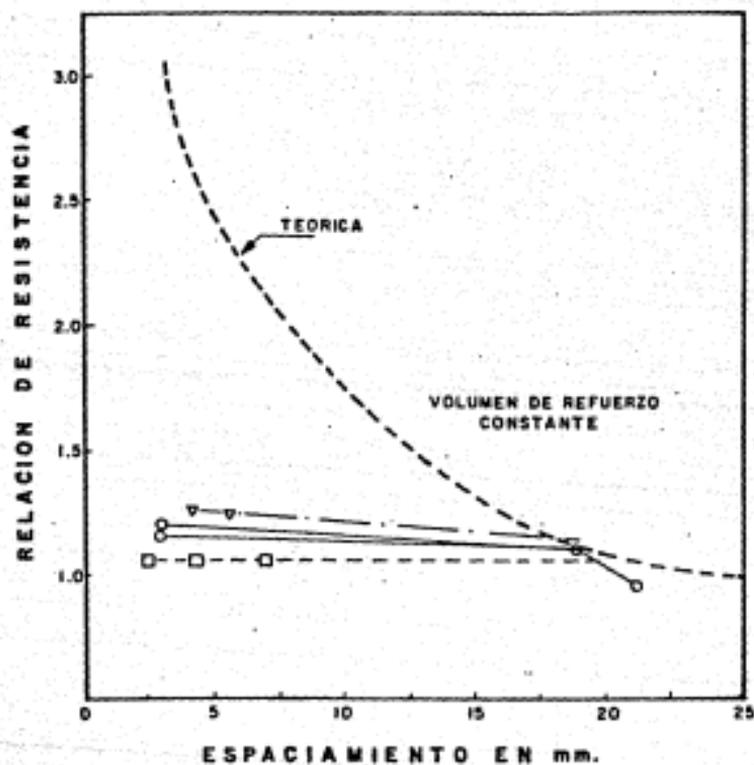


FIG.3 EFECTO DEL ESPACIAMIENTO ENTRE FIBRAS SOBRE LA RESISTENCIA AL ABIETAMIENTO DEL CONCRETO.

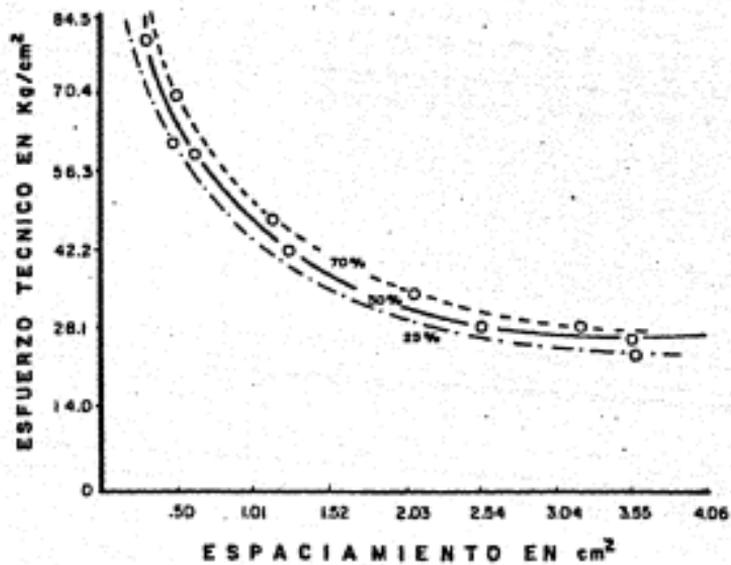


FIG. 3'

ESFUERZO TEORICO DE AGRIETAMIENTO

NOTA: CONTINUACION DE LA ANTERIOR

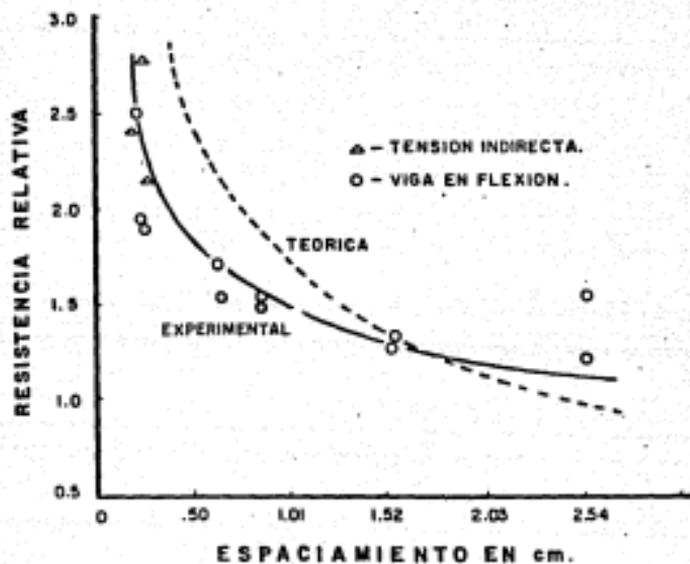


FIG. 4 **RESISTENCIAS RELATIVAS TEORICAS Y EXPERIMENTALES EN FUNCION DEL ESPACIAMIENTO DE FIBRAS.**

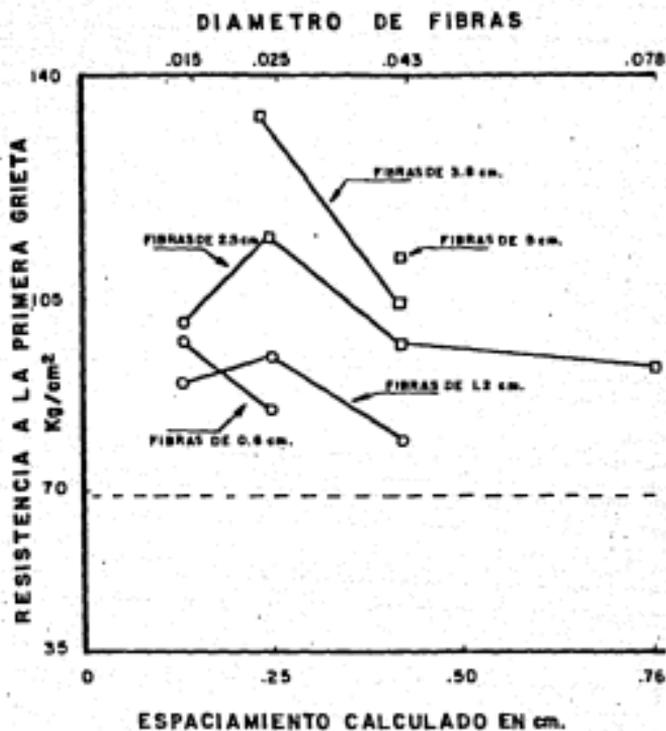


FIG. 5 EFECTO DE ESPACIAMIENTO DE FIBRAS SOBRE LA RESISTENCIA A FLEXION.

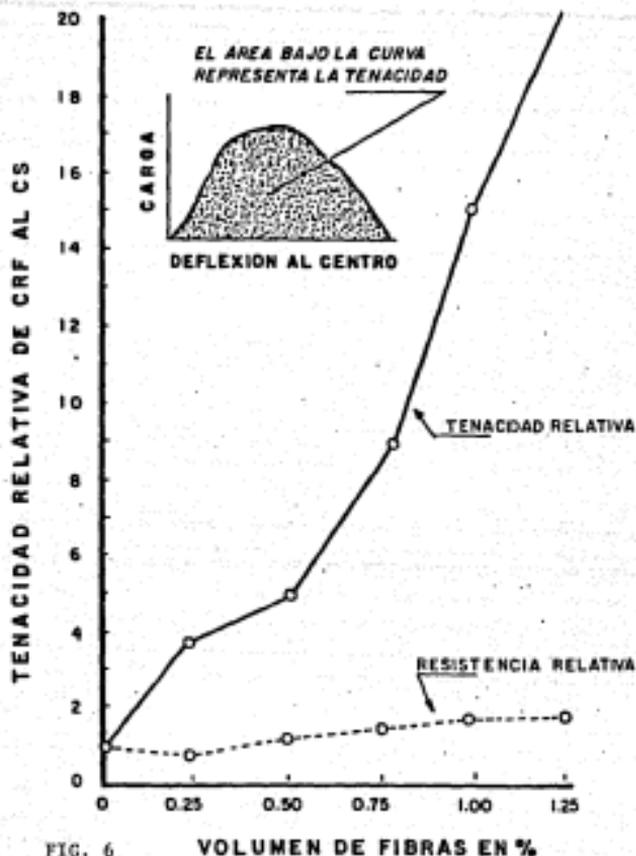


FIG. 6

EFFECTO DEL VOLUMEN DE FIBRAS SOBRE LA TENACIDAD EN FLEXION.

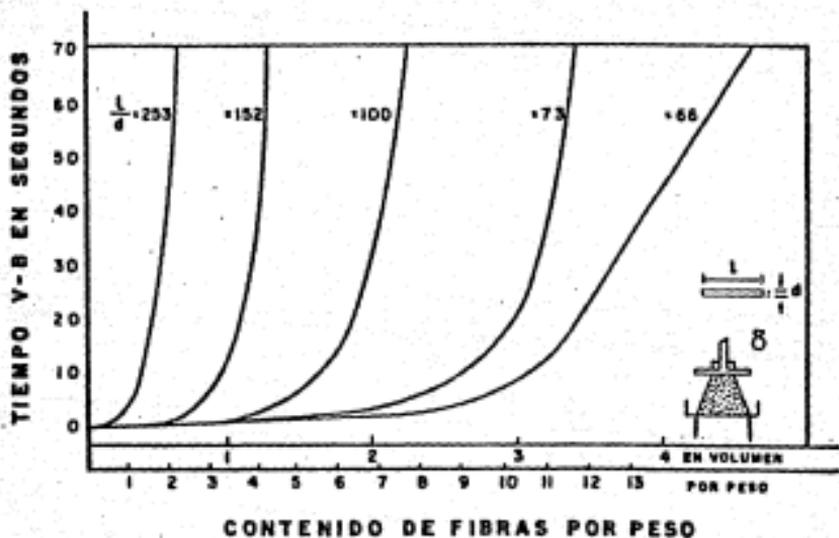


FIG. 7 EFECTO DE LA RELACION ASPECTO SOBRE EL TIEMPO DE REMOLDEO PARA LA PRUEBA V-B.

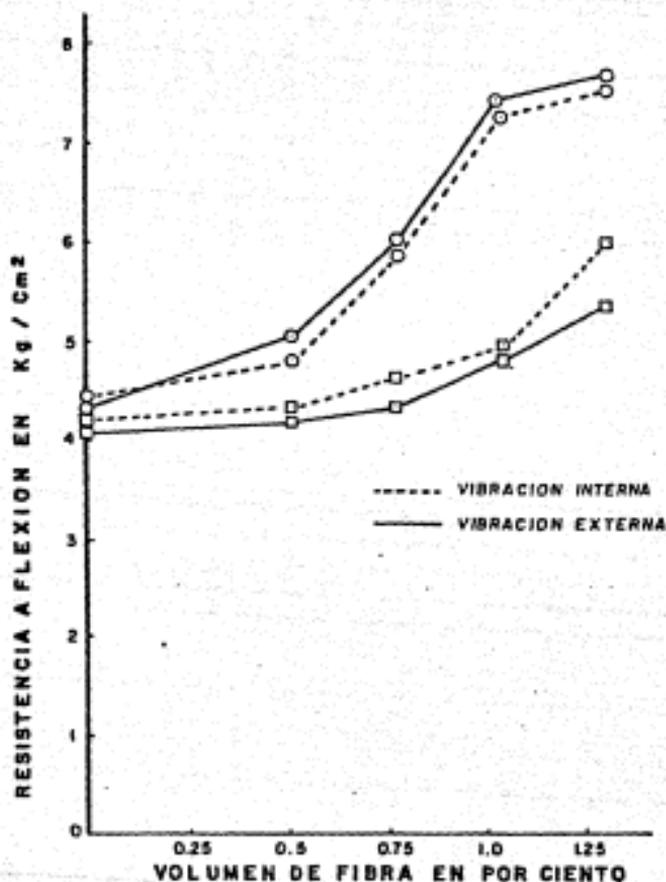
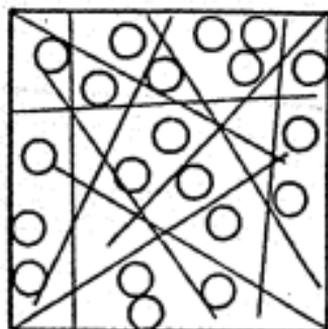
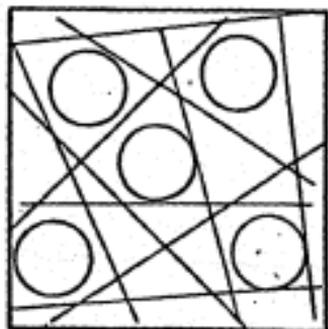


FIG. 7' *INFLUENCIA DEL METODO DE COLOCACION Y COMPACTACION SOBRE LA RESISTENCIA A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS.*

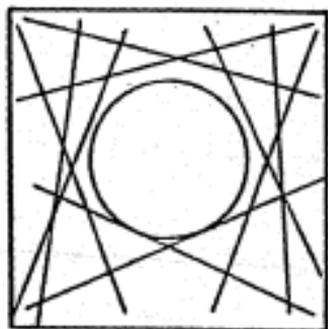
NOTA: *CONTINUACION DE LA ANTERIOR*



ABRESADO 8 mm



ABRESADO 10 mm



ABRESADO 20 mm

FIG. 8 EFECTO DEL TAMAÑO MÁXIMO DE ABRESADO BRUESO SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE FIBRAS EN LA MATRIZ DE CONCRETO.

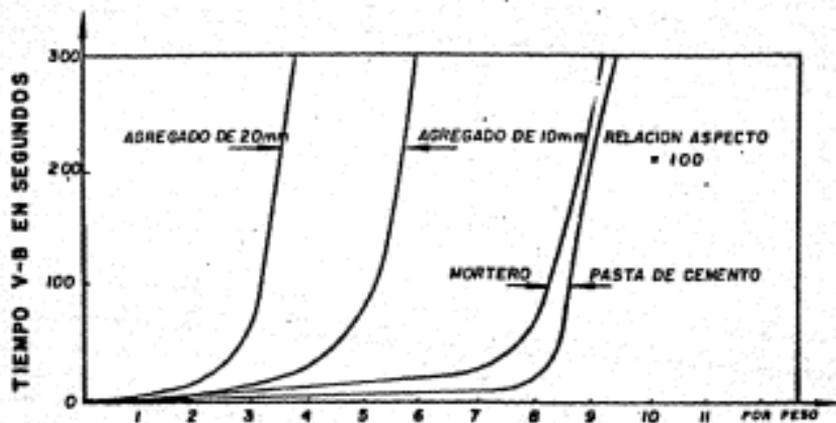


FIG. 9 **TIEMPO DE COMPACTACION EN RELACION AL CONTENIDO DE FIBRAS Y TAMAÑO MAXIMO DE ABREGADO.**

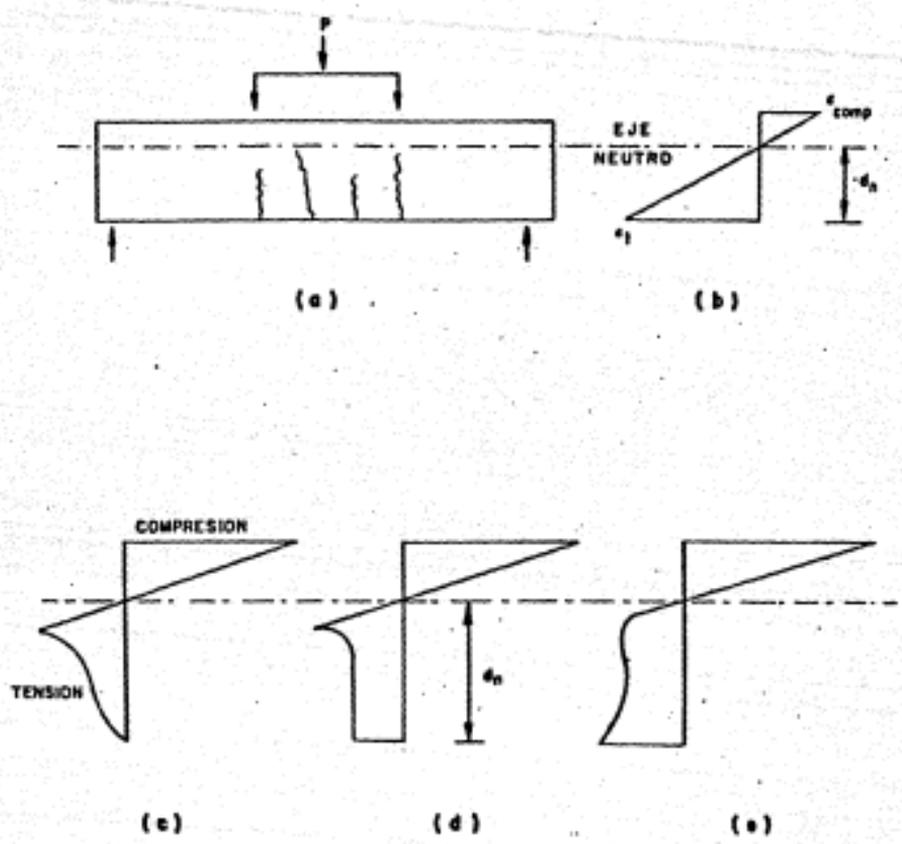


FIG. 10 BLOQUES DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES PARA SECCIONES ABRIETADAS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS. (a) ESPECIMEN SUJETO AFLEXION, (b) DEFORMACIONES PROMEDIO DESPUES DEL ABRIETAMIENTO, (c) (d) y (e) POSIBILIDADES DE DISTRIBUCION DE DEFORMACIONES.

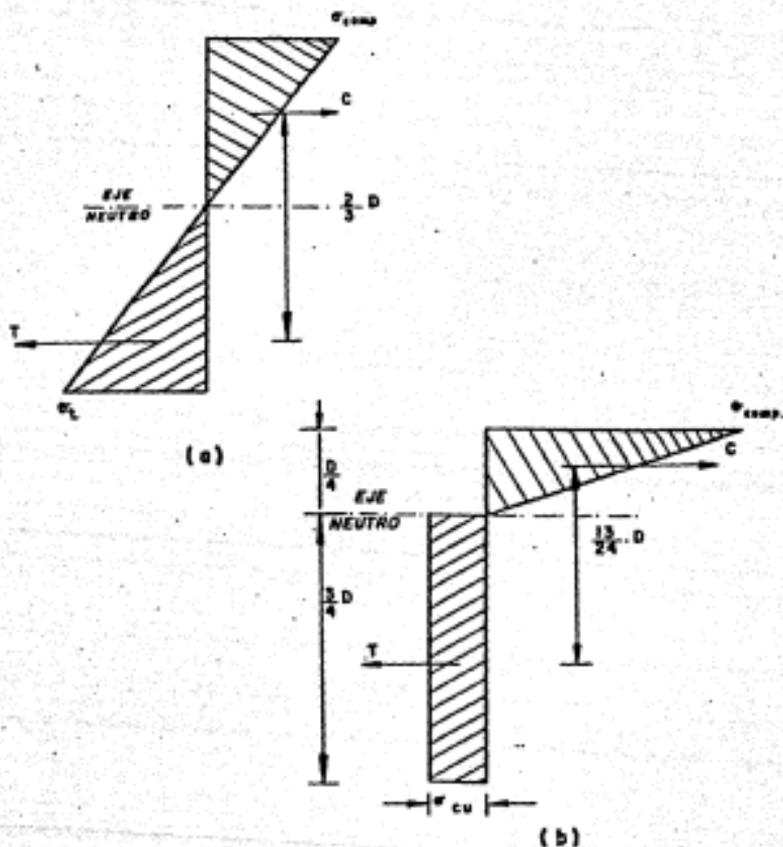


Fig. 11

BLOQUE DE ESFUERZO POR FLEXION
(a) MATERIAL ELASTICO
(b) MATERIAL PLASTICO

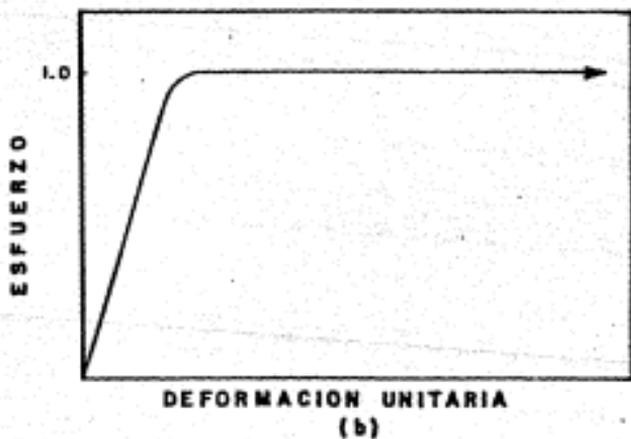
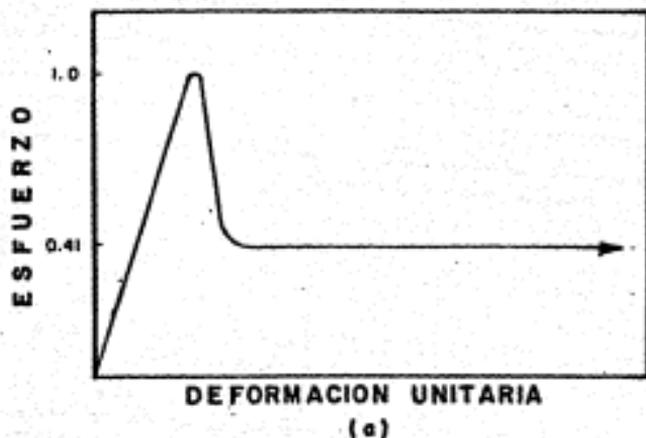


FIG. 12 CURVAS ESFUERZO-DEFORMACION UNITARIA EN TENSION UNIAIXIAL. (a) SOSTIENE LA CARGA DESPUES DEL ABRIETAMIENTO. (b) MAYOR CAPACIDAD DE CARGA.

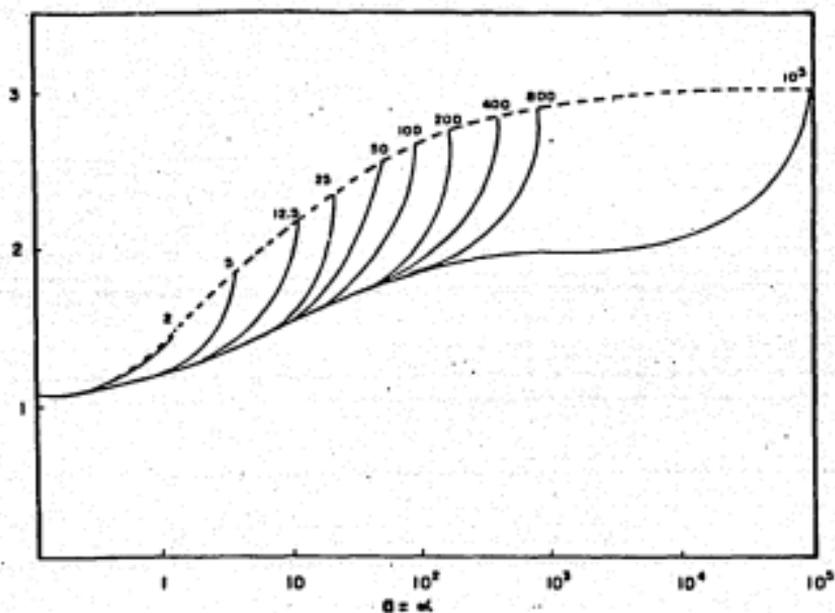


FIG. 13 RELACION DE MODULOS DE ROTURA Y RESISTENCIA A TENSION CON $\mu = E_m V_m / E_f V_f$ SEGUN LOS VALORES DE $E_f V_f / E_m V_m$.

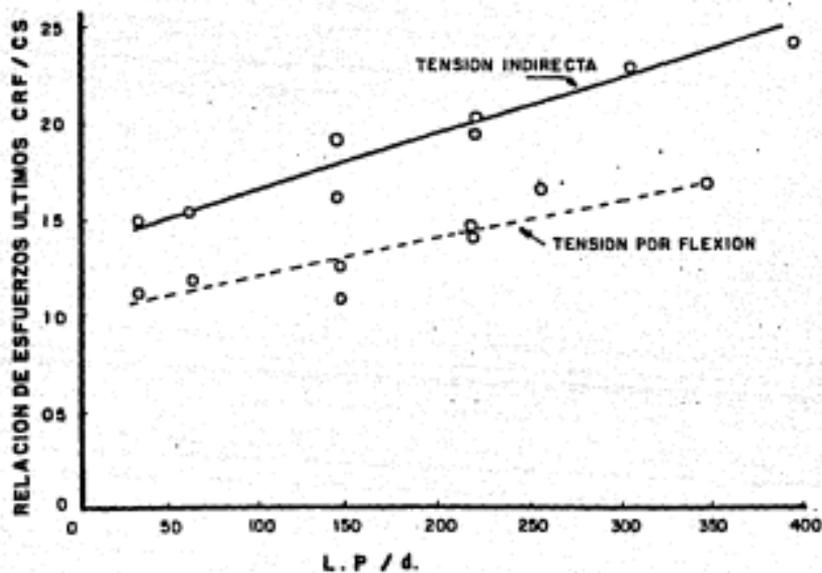


FIG. 14 RESISTENCIA ULTIMA EN FUNCION DE L.P/d

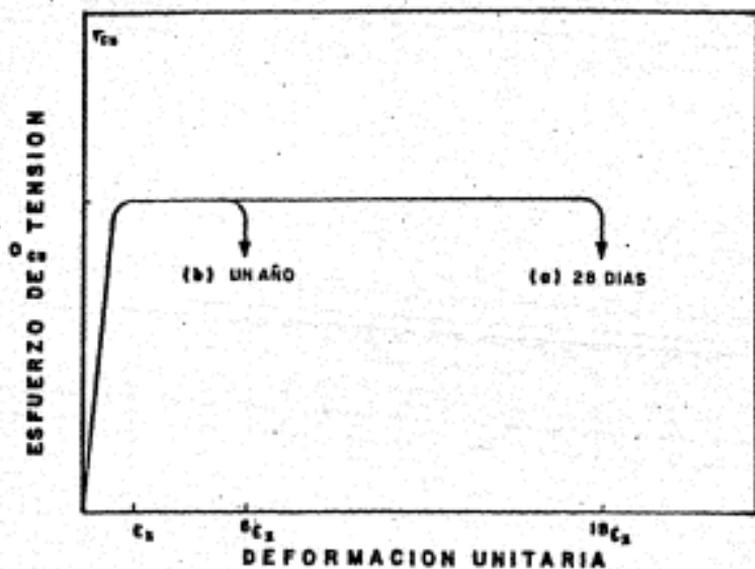


FIG. 15

CURVA ESFUERZO-DEFORMACION UNITARIA IDEALIZADA PARA TENSION DIRECTA.

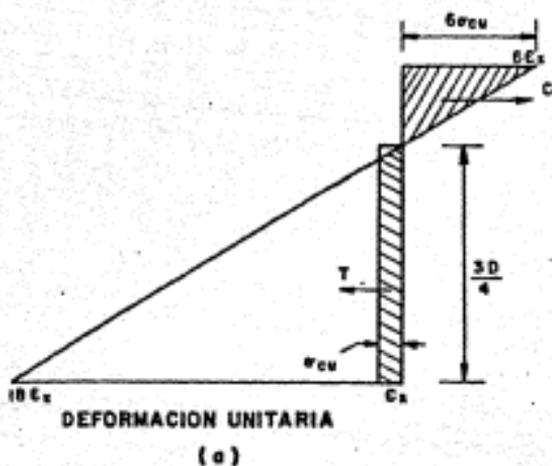
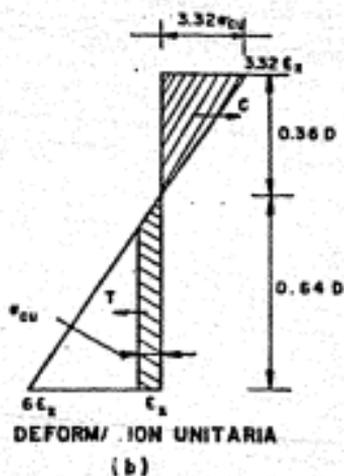


FIG. 16
 DISTRIBUCION ESFUERZO-DEFORMACION
 UNITARIA.
 (a) MOMENTO RESISTENTE = $0.41 f_{cu} D^2$
 (b) MOMENTO RESISTENTE = $0.35 f_{cu} D^2$



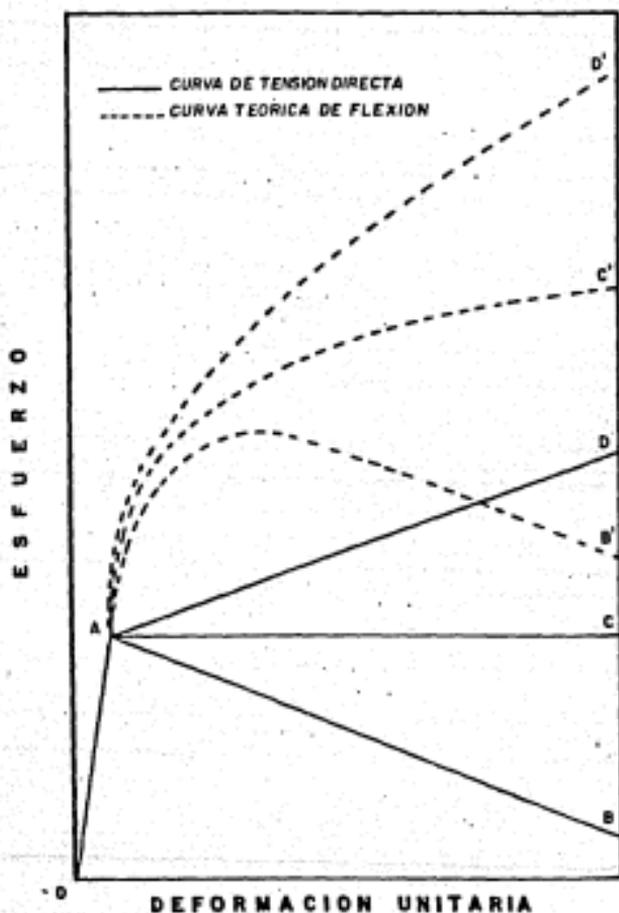


FIG. 17

MODULOS DE ROTURA CALCULADOS A PARTIR DE LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACION A TENSION DIRECTA.

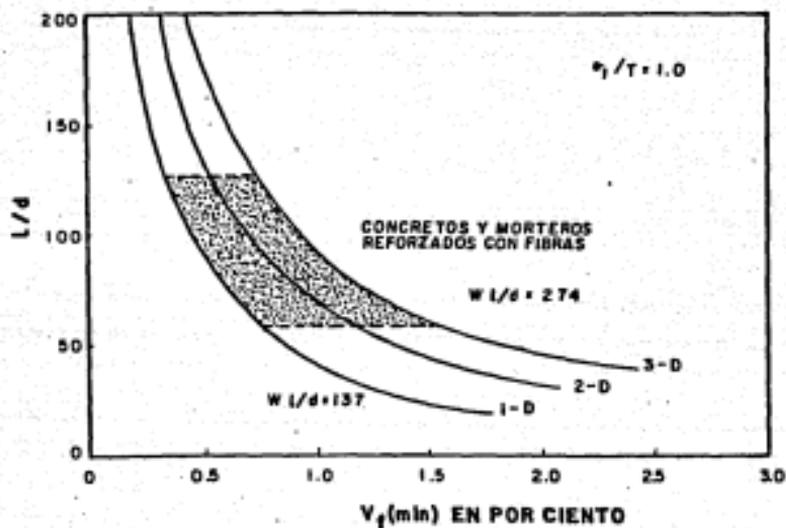


FIG. 18 VOLUMEN DE REFUERZO MINIMO PARA REFORZAR A FLEXION.

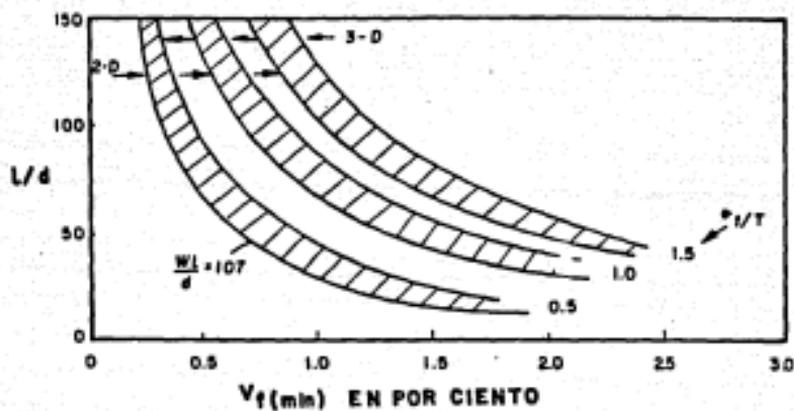


FIG. 19 VOLUMEN DE REFUERZO MÍNIMO NECESARIO PARA REFORZAR A FLEXIÓN SEGUN LA RELACION $V_f/3$

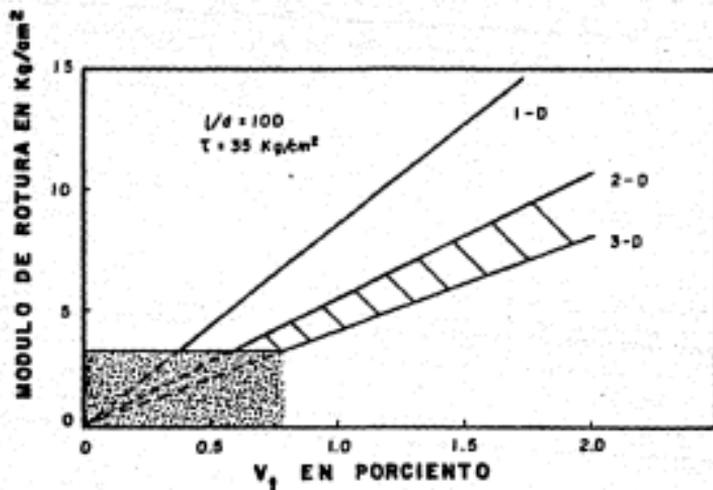


FIG. 20

MODULO DE ROTURA APARENTE SEGUN LA ORIENTACION DE LAS FIBRAS.

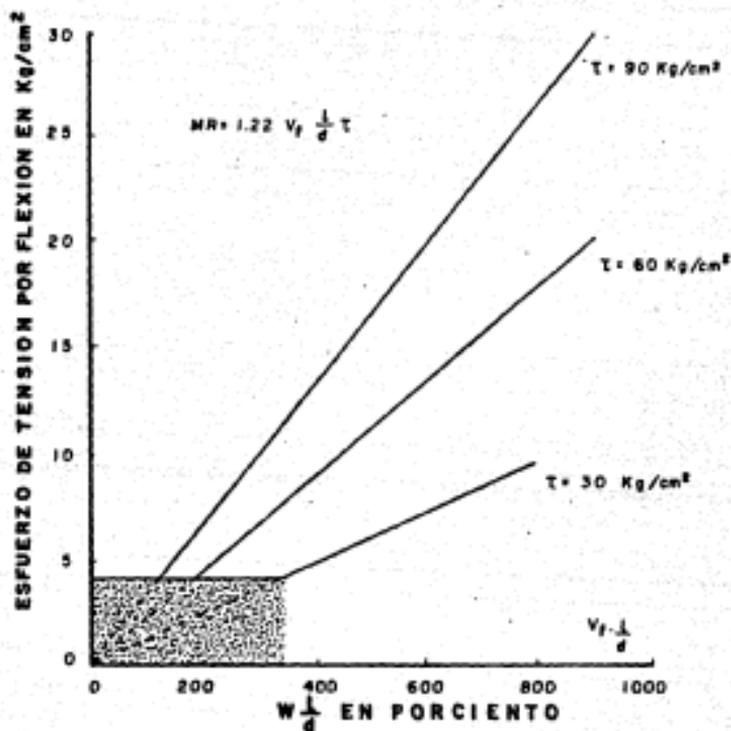


FIG. 21

EFEECTO DEL ESFUERZO DE ADHERENCIA T SOBRE LA RESISTENCIA POST-ABRIETAMIENTO PARA FIBRAS ORIENTADAS EN TRES DIRECCIONES.

FIG. 22 a SECADO DE MUESTRAS DE AGREGADOS OBTENIDOS EN LAS OBRAS DE LA LINEA 7.



FIG. 22 b AGREGADO SEPARADO POR TAMAÑO DE PARTICULA.



FIG. 22 c METODO EMPLEADO PARA EL ANALISIS GRANULOMETRICO DE LOS AGREGADOS PROVENIENTES DE LAS OBRAS -- DEL METRO.

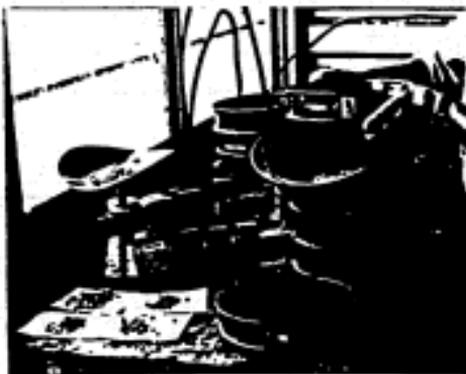




FIG. 23

SE MUESTRA EL EQUIPO DE LANZADO,
CAMION REVOLVEDOR Y PERSONAL COLO-
CANDO LAS MEZCLAS DE AGREGADO Y FI-
BRAS EN LA TOLVA DEL CAMION.



FIG. 24

SE MUESTRAN 3 ARTESAS ANTES
DE LA PRUEBA DE LANZADO. SE
COLABAN 3 POR CADA MEZCLA.



FIG. 25

CABECEADO CON AZUFRE DE LOS
CILINDROS, DE CONCRETO REFOR-
ZADO CON FIBRAS, QUE SIRVIÉ-
RON COMO REFERENCIA PARA LAS
PRUEBAS SOBRE CUBOS.



FIG. 26

ENSAYE A COMPRESION DE UN CUBO CORTA-
DO DE UNA VIGA PARA FLEXION.

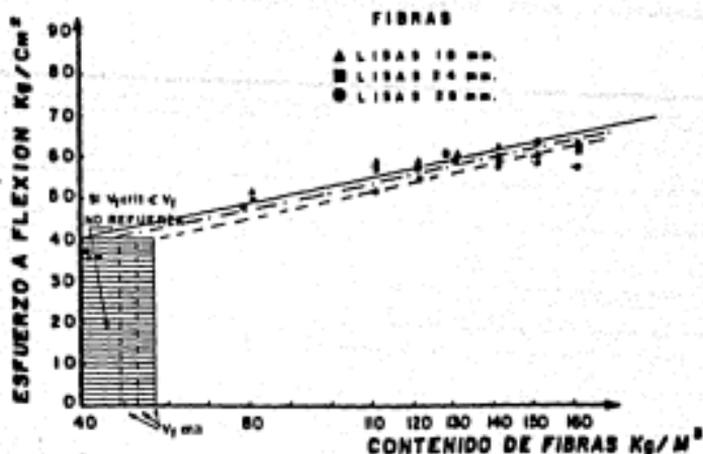


Fig. 27 COMPORTAMIENTO A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS RELACION AGUA-CEMENTO 0.45, GRAVA-ARENA 30/70, TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GRUESO 19 mm.

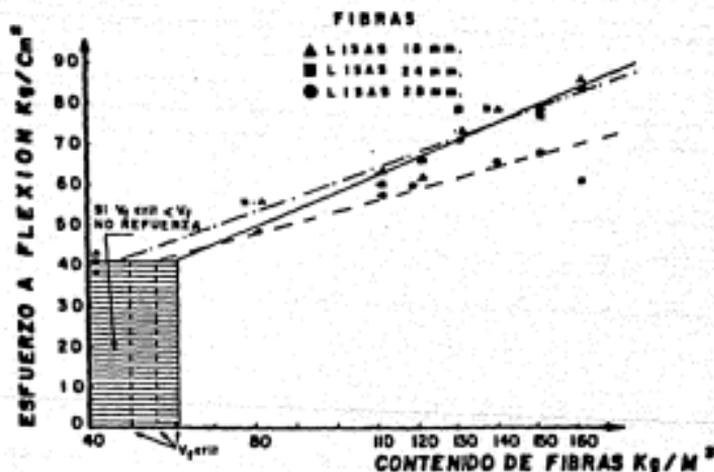


Fig. 28 COMPORTAMIENTO A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.45, GRAVA-ARENA 40/60, TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GRUESO 19 mm.

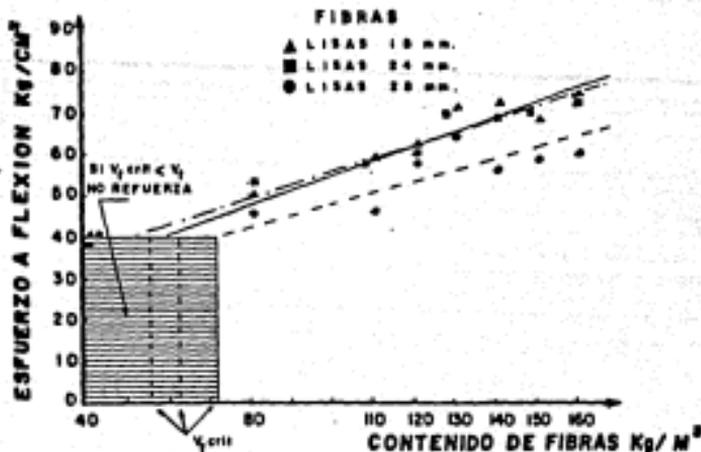


Fig. 29 COMPORTAMIENTO A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.45, GRAVA ARENA 50/50 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GUESO 19 mm.

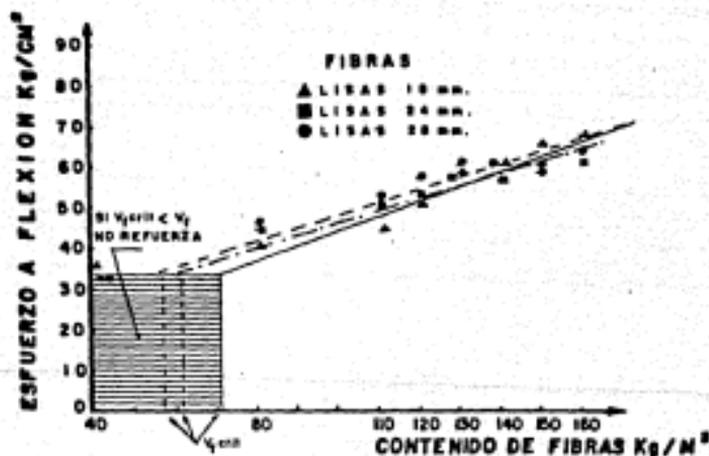


Fig. 30 COMPORTAMIENTO A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.55, GRAVA ARENA 30/70 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GUESO 19 mm.

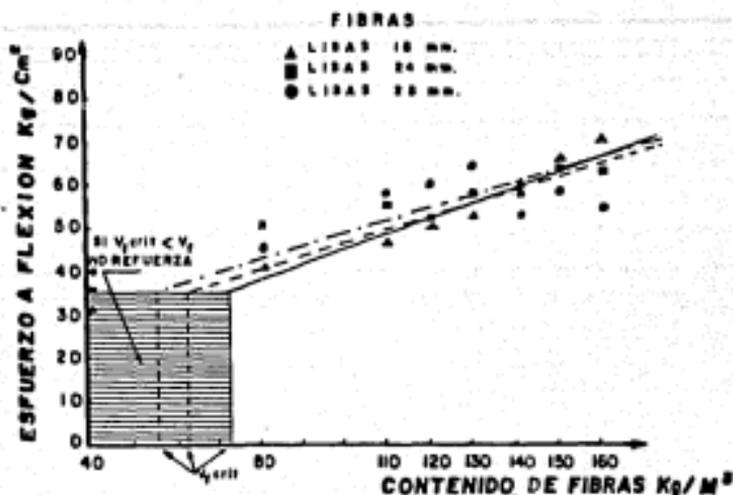


Fig. 31 COMPORTAMIENTO A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.55, GRAVA-ARENA 40/60 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GRUESO 19 mm.

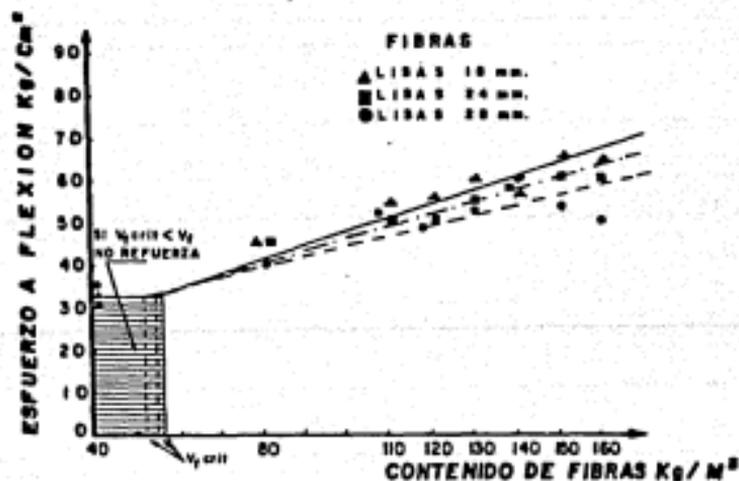


Fig. 32 COMPORTAMIENTO A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.55, GRAVA-ARENA 50/50 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GRUESO 19 mm.

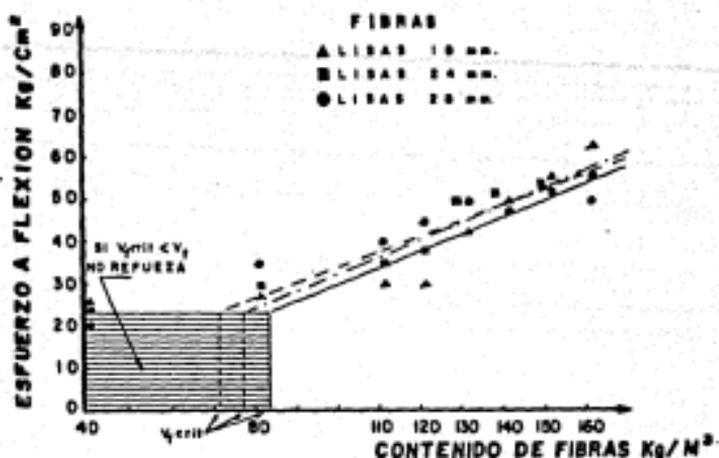


Fig. 33 COMPORTAMIENTO A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.62, GRAVA-ARENA 30/70 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GRUESO 19 mm.

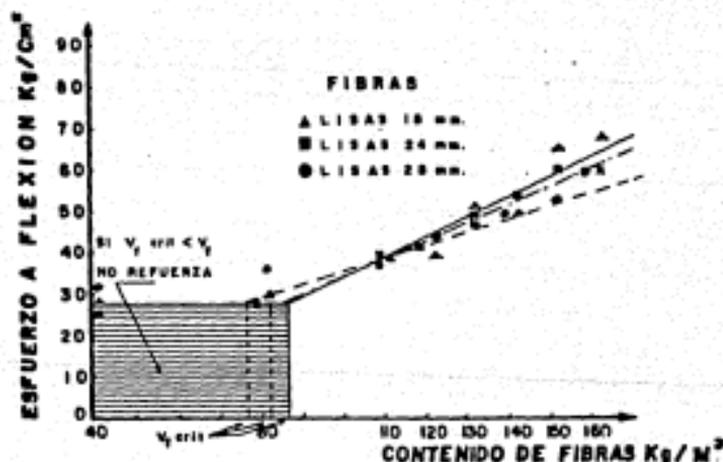


Fig. 34 COMPORTAMIENTO A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.62, GRAVA-ARENA 40/60 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GRUESO 19 mm.

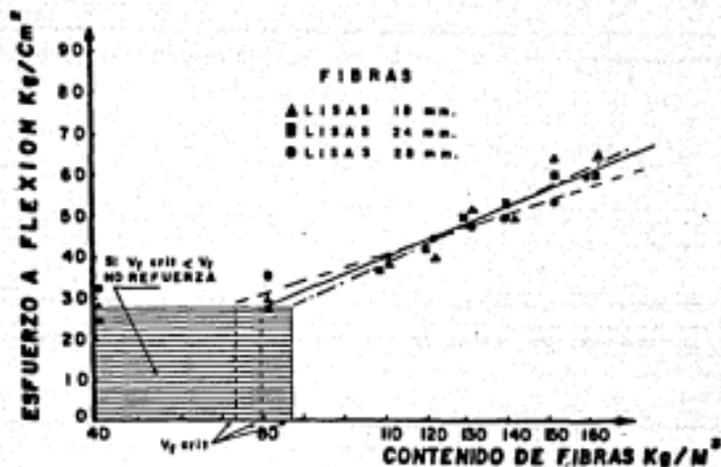


Fig. 35 COMPORTAMIENTO A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.62, GRAVA-ARENA 50/50 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GRUESO 19 mm.

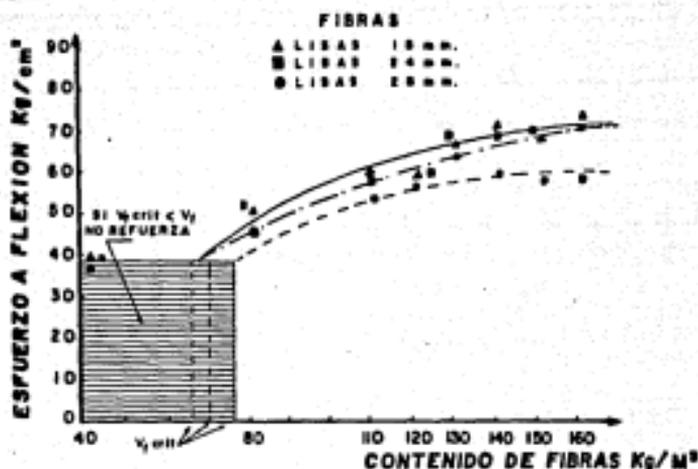


Fig. 36 COMPORTAMIENTO PROMEDIO A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.45 TAMAÑO MAXIMO 19 mm.

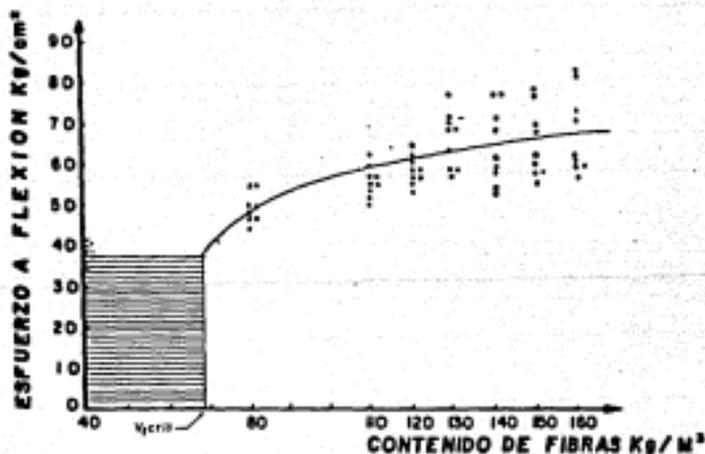


Fig. 37 GRAFICA DE COMPORTAMIENTO PROMEDIO GENERAL DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS RELACION AGUA-CEMENTO 0.45 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GRUESO 19 mm.

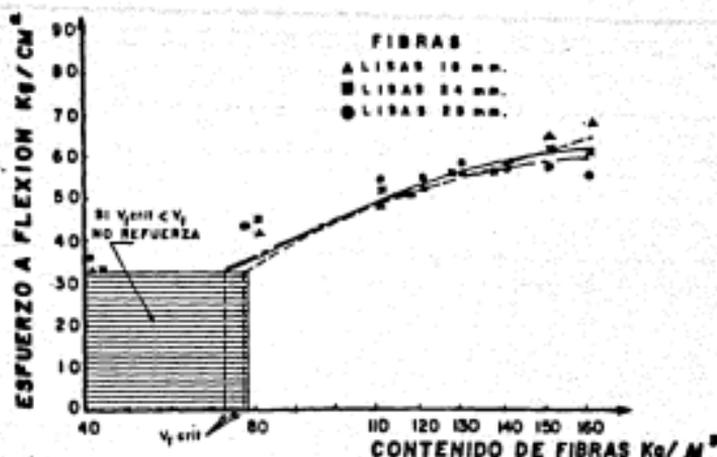


Fig. 38 COMPORTAMIENTO PROMEDIO A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.55 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGR: 19 mm GRUESO 19 mm.

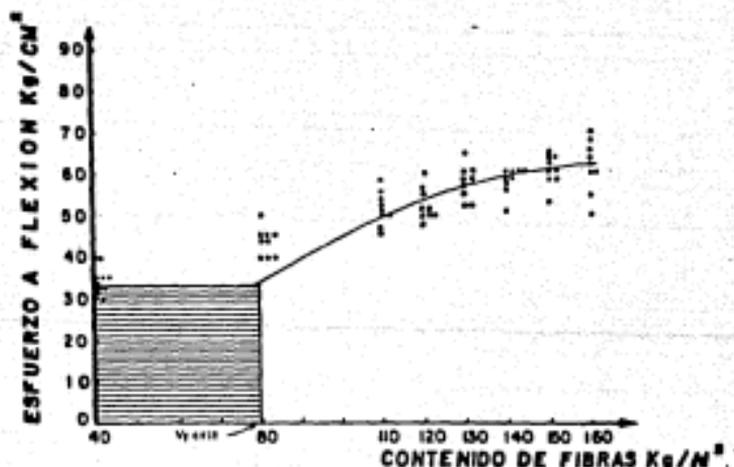


Fig. 39 GRAFICA DE COMPORTAMIENTO PROMEDIO GENERAL DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.55 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GRUESO 19 mm.

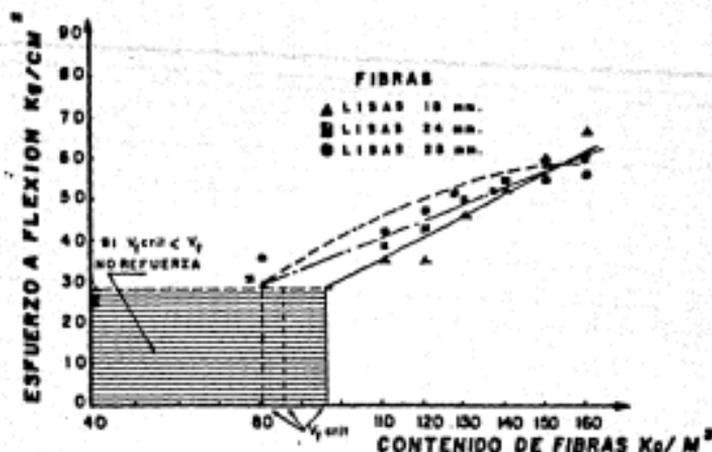


Fig. 40 COMPORTAMIENTO PROMEDIO A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.62 Y TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO GRUESO 19 mm.

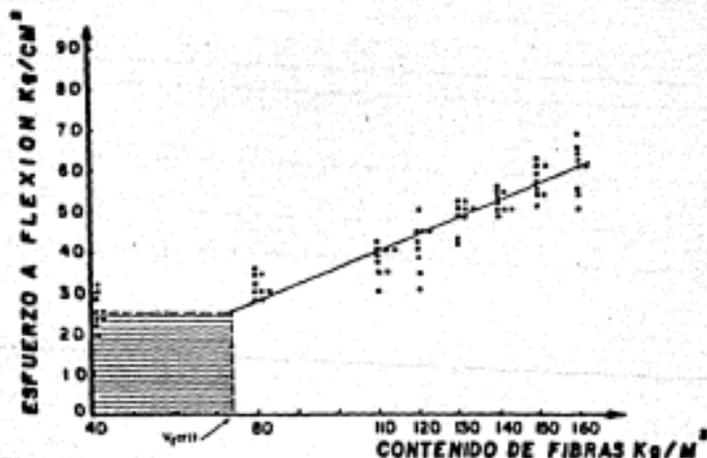


Fig. 41 GRÁFICA DE COMPORTAMIENTO GENERAL DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.62 Y TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO GRUESO 19 mm.

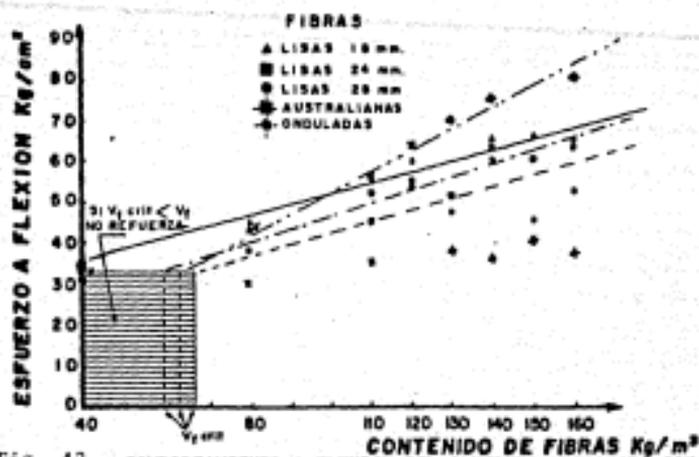


Fig. 42 COMPORTAMIENTO A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.45, GRAVA-ARENA 30/70 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GRUESO 13 mm

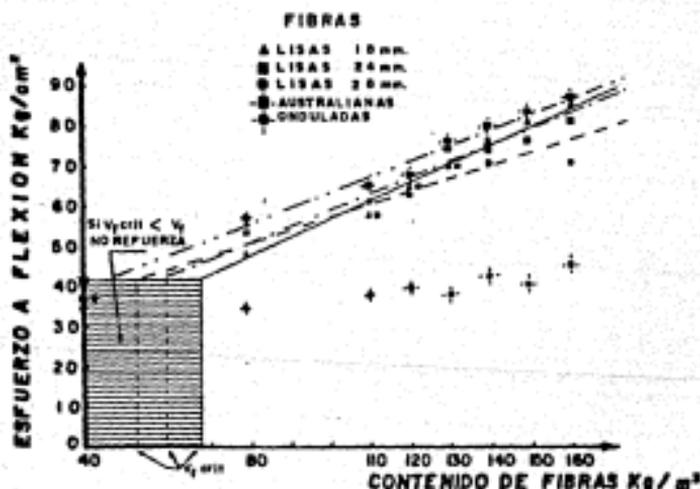


Fig. 43 COMPORTAMIENTO A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.45, GRAVA-ARENA 40/60 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GRUESO 13 mm.

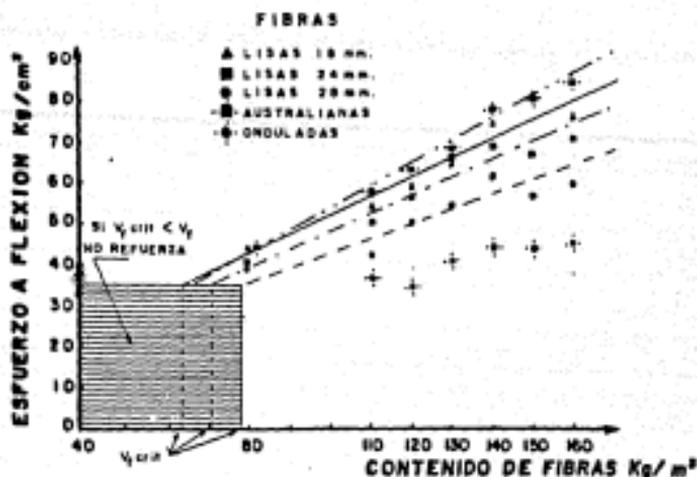


Fig. 44 COMPORTAMIENTO A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.45, GRAVA-ARENA 50/50 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GRUESO 13 mm.

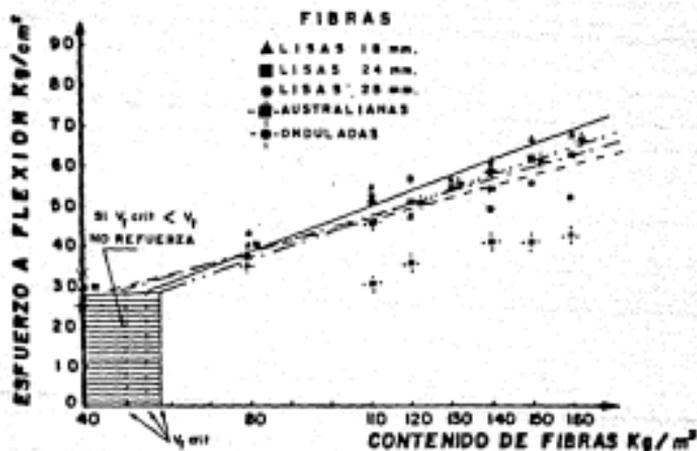


Fig. 45 COMPORTAMIENTO A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.55, GRAVA-ARENA 30/70 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GRUESO 13 mm.

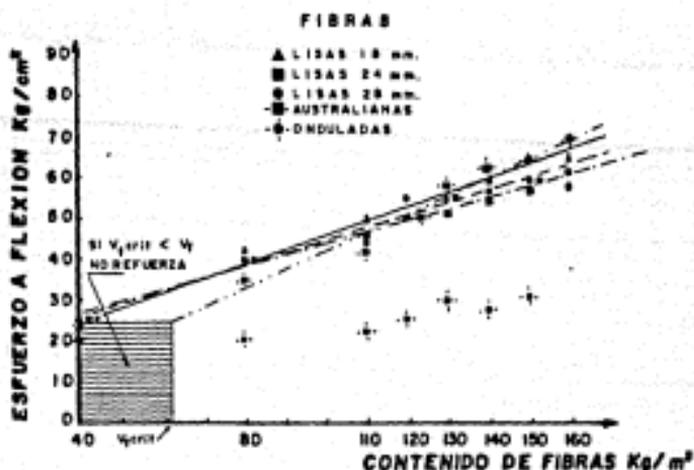


Fig. 46 COMPORTAMIENTO A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.55, GRAVA-ARENA 40/60 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GRUESO 13 mm.

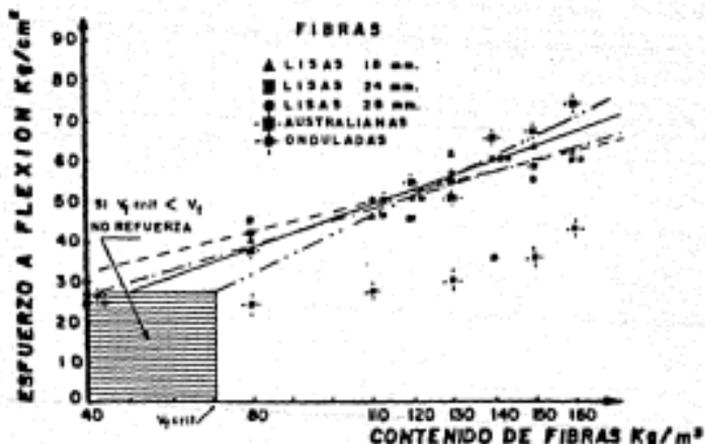


Fig. 47 COMPORTAMIENTO A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.55, GRAVA-ARENA 50/50 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GRUESO 13 mm.

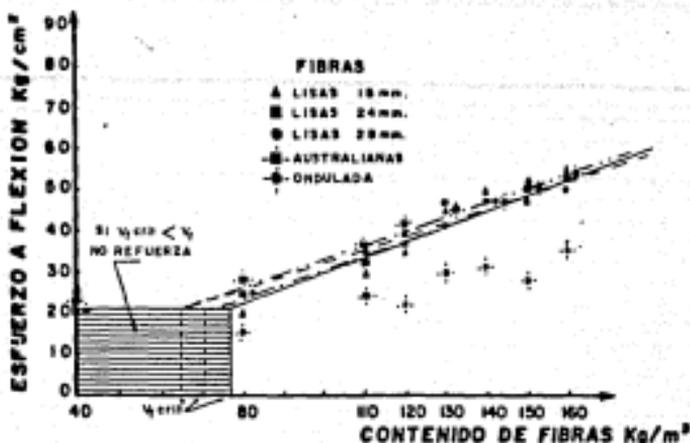


Fig. 48 COMPORTAMIENTO A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.62, GRAVA-ARENA 30/70 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GRUESO 13 mm.

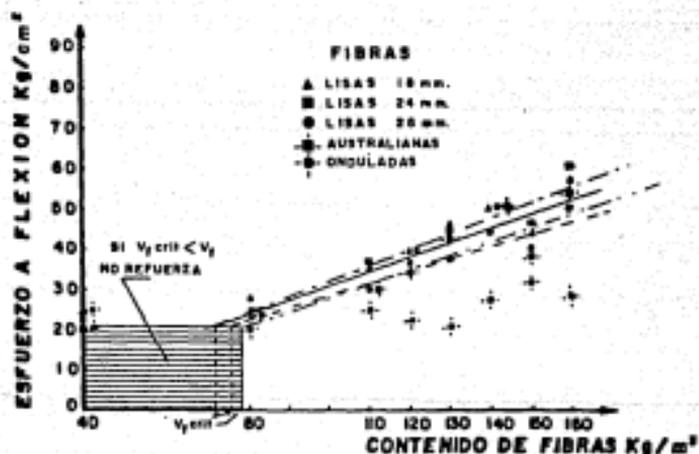


Fig. 49 COMPORTAMIENTO A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.62, GRAVA-ARENA 40/60 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GRUESO 13 mm.

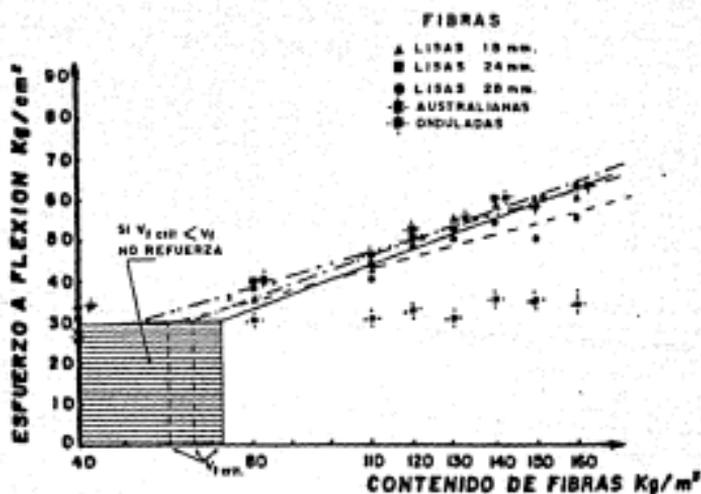


Fig. 50 COMPORTAMIENTO A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.62, GRAVA-ARENA 50/50 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GRUESO 13 mm.

FIBRAS

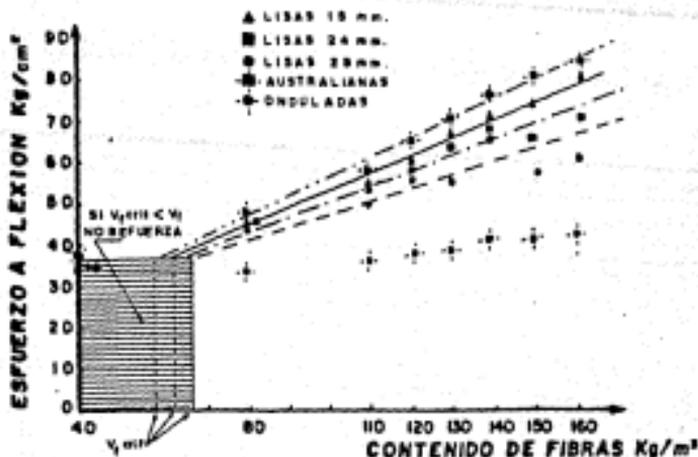


Fig. 51 COMPORTAMIENTO PROMEDIO A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.45 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GRUESO 13 mm.

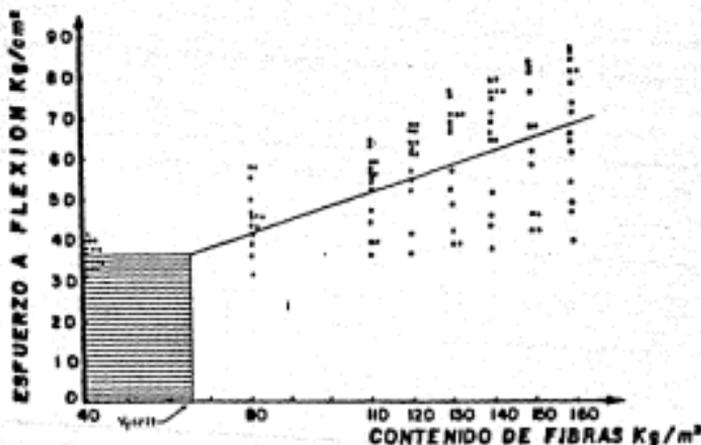


Fig. 52 GRAFICA DE COMPORTAMIENTO PROMEDIO GENERAL A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.45 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GRUESO 13 mm.

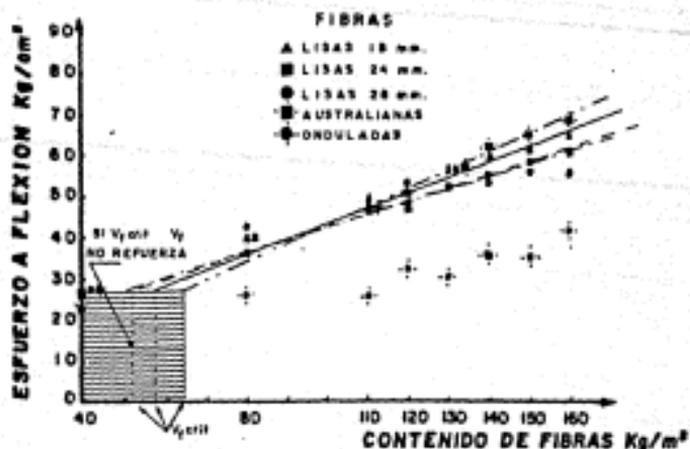


Fig. 53 COMPORTAMIENTO PROMEDIO A FLEXION DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.55 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GRUESO 13 mm.

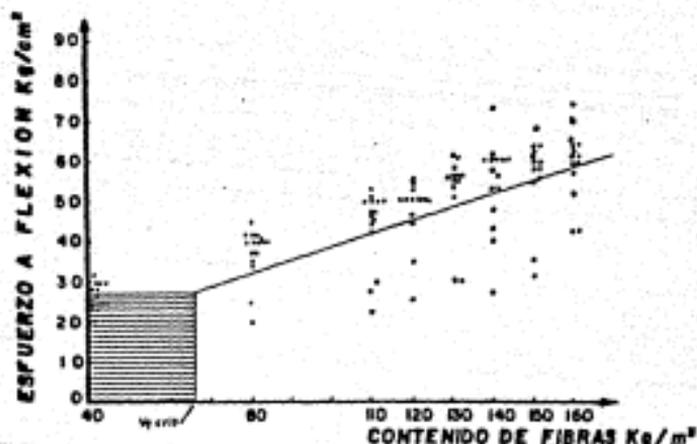


Fig. 54 GRAFICA DE COMPORTAMIENTO GENERAL A FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METALICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.55 Y TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO GRUESO 13 mm.

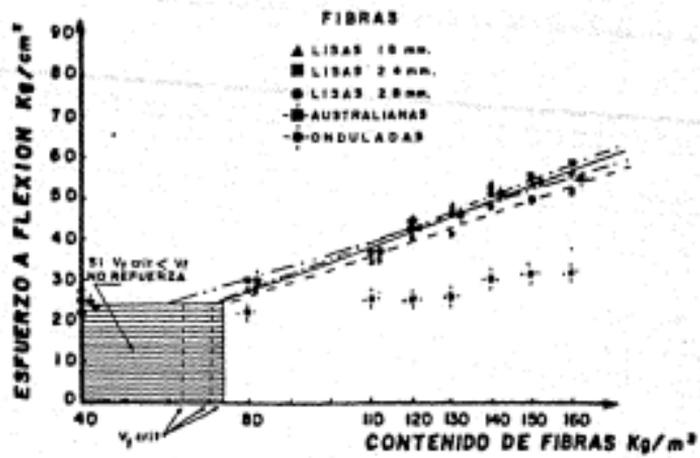


Fig. 55 COMPORTAMIENTO PROMEDIO DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.62 Y TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO GRUESO 13 mm.

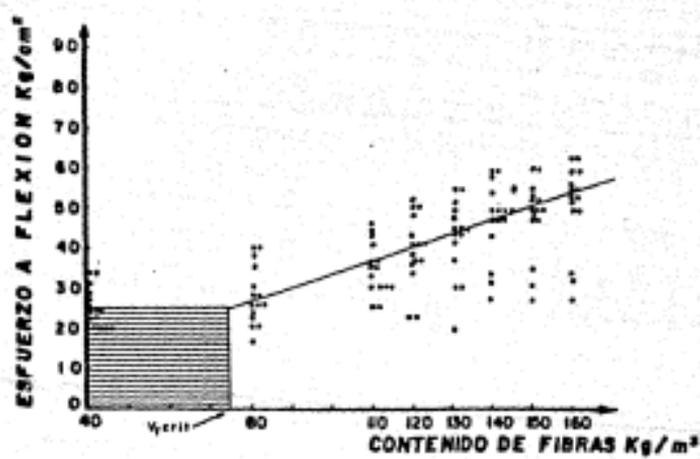


Fig. 56 GRÁFICA DE COMPORTAMIENTO PROMEDIO GENERAL A FLEXIÓN DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS, RELACION AGUA-CEMENTO 0.62 Y TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO GRUESO 13 mm.

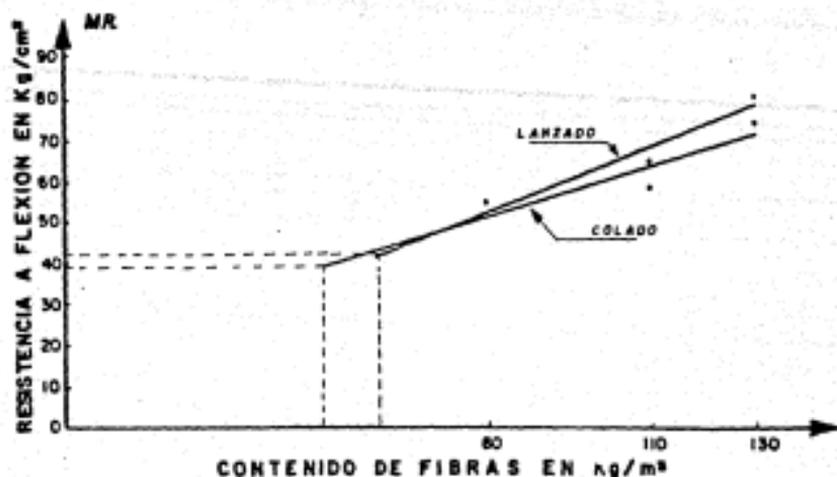


Fig. 57 GRAFICA COMPARATIVA DE RESULTADOS DE RESISTENCIA A FLEXION ENTRE CONCRETOS LANZADOS EN TUNEL DE METRO Y COLADOS EN LABORATORIO.

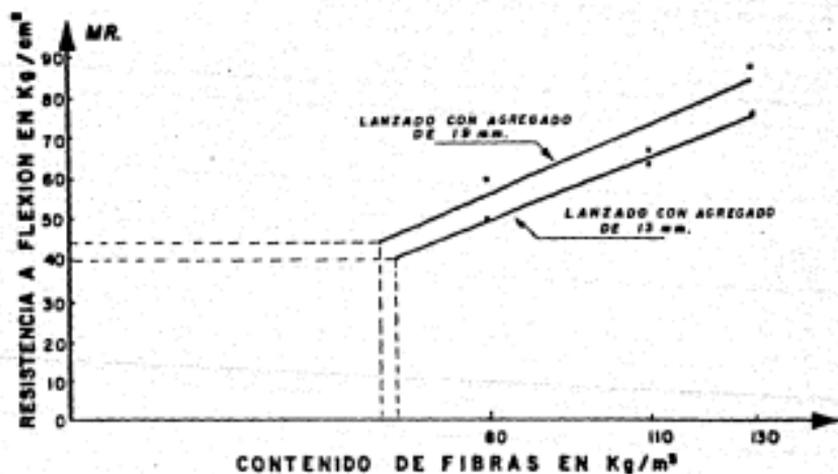


Fig. 58 GRAFICA COMPARATIVA DE RESULTADOS DE ENSAYOS A FLEXION ENTRE CONCRETOS LANZADOS CON AGREGADOS DE TAMAÑO MÁXIMO 13 Y 19 mm.

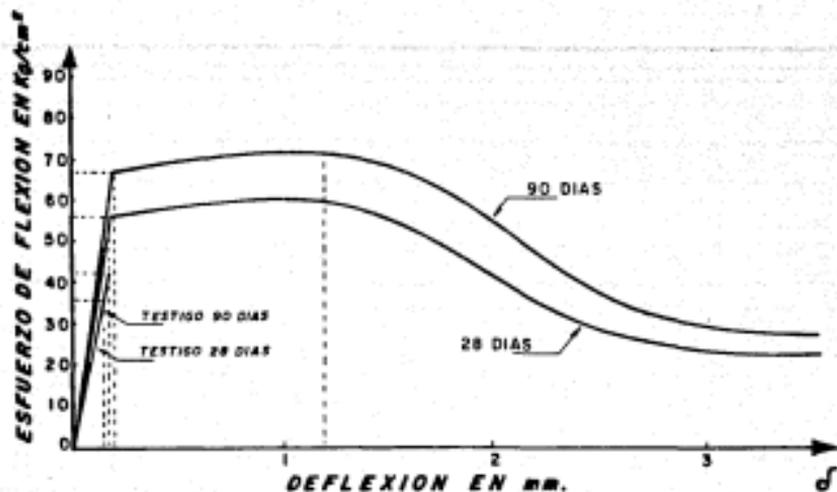


Fig. 59 COMPORTAMIENTO A FLEXION Y ESFUERZOS DE AGRIETAMIENTO Y MAXIMO PARA EL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS LISAS DE 24 mm, 130 kg/m³ DE REFUERZO, RELACION AGUA-CEMENTO 0.45, GRAVA-ARENA 30/70 Y AGREGADO DE 19 mm.

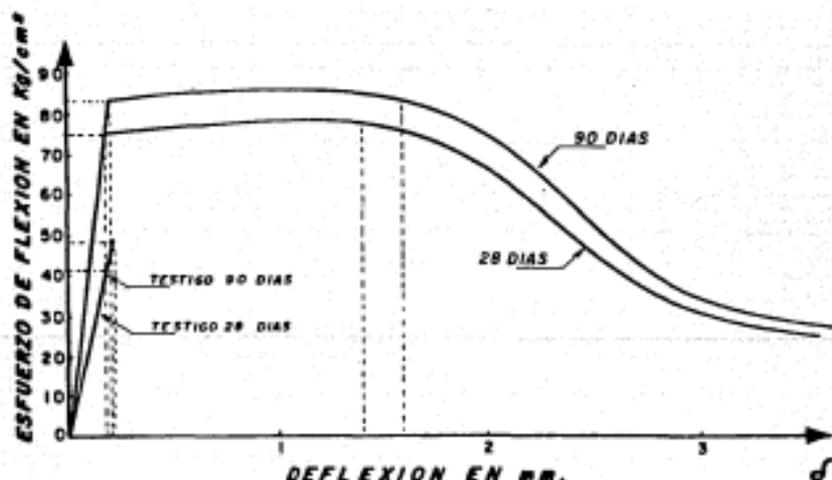


Fig. 60 COMPORTAMIENTO A FLEXION Y ESFUERZOS DE AGRIETAMIENTO Y MAXIMO PARA EL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS LISAS DE 24 mm, 130 kg/m³ DE REFUERZO, RELACION AGUA-CEMENTO 0.45, GRAVA-ARENA 40/60 Y AGREGADO DE 19 mm.

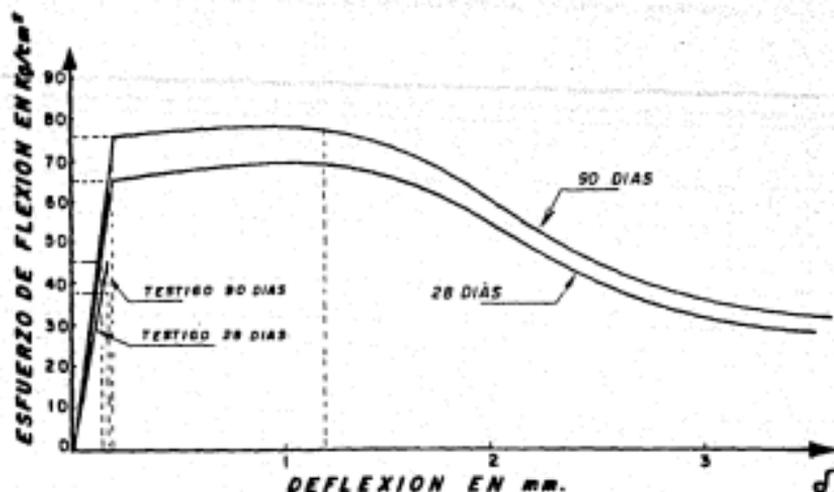


Fig. 61 COMPORTAMIENTO A FLEXION Y ESFUERZOS DE AGRIETAMIENTO Y MAXIMOS DEL CONCRETO CON FIBRAS LISAS DE 24 mm, 130 kg/m^3 DE REFUERZO, RELACION AGUA-CEMENTO 0.45, GRAVA-ARENA 50/50 Y AGREGADO DE 19 mm.

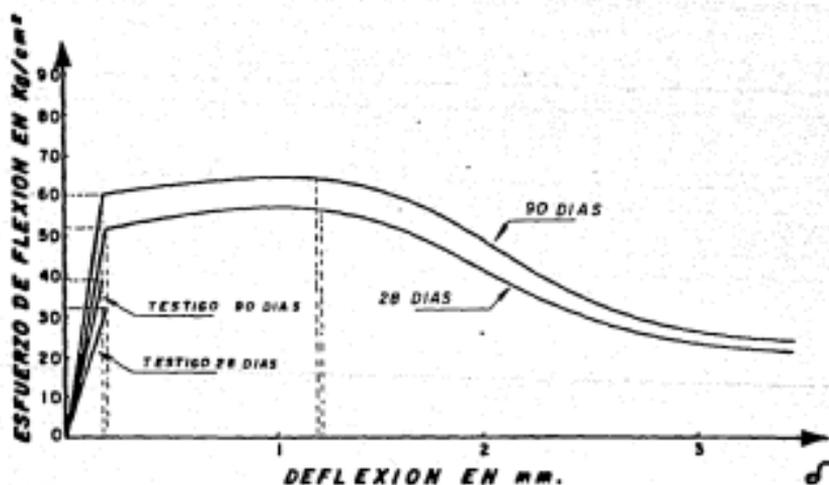


Fig. 62 COMPORTAMIENTO A FLEXION Y ESFUERZOS DE AGRIETAMIENTO Y MAXIMOS DEL CONCRETO CON FIBRAS LISAS DE 24 mm, 130 kg/m^3 DE REFUERZO, RELACION AGUA-CEMENTO 0.55 GRAVA-ARENA 30/70 Y AGREGADO DE 19 mm.

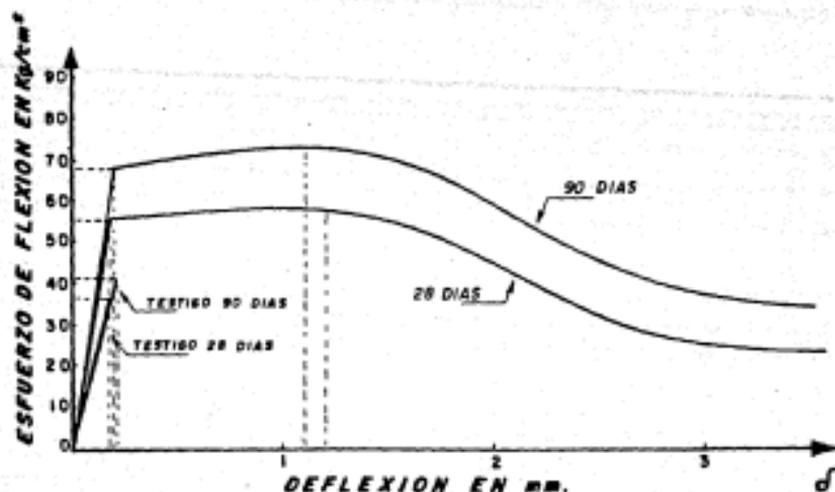


Fig. 63 COMPORTAMIENTO A FLEXION Y ESFUERZOS DE AGRIETAMIENTO Y MAXIMOS DEL CONCRETO CON FIBRAS DE 24 mm, 130 kg/m^3 DE REFUERZO, RELACION AGUA-CEMENTO 0.55, GRAVA-ARENA 40/60 Y AGREGADO DE 19 mm.

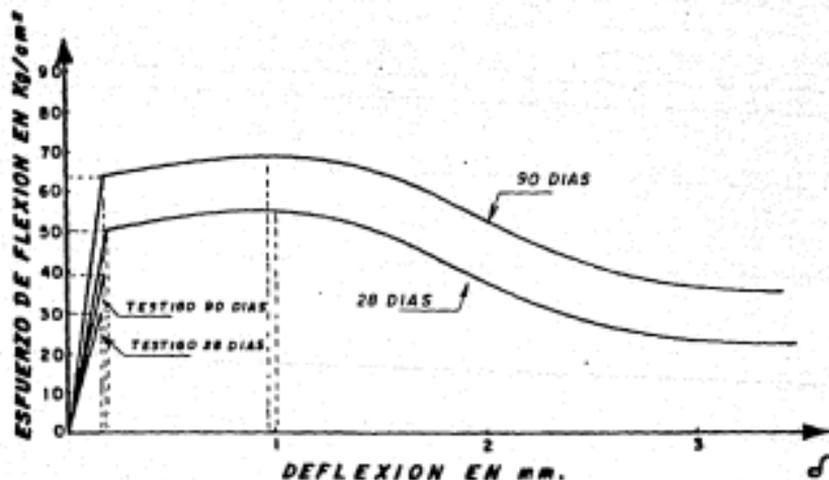


Fig. 64 COMPORTAMIENTO A FLEXION Y ESFUERZOS DE AGRIETAMIENTO Y MAXIMOS DEL CONCRETO CON FIBRAS DE 24 mm, 130 kg/m^3 DE REFUERZO, RELACION AGUA-CEMENTO 0.55, GRAVA-ARENA 50/50 Y AGREGADO DE 19 mm.

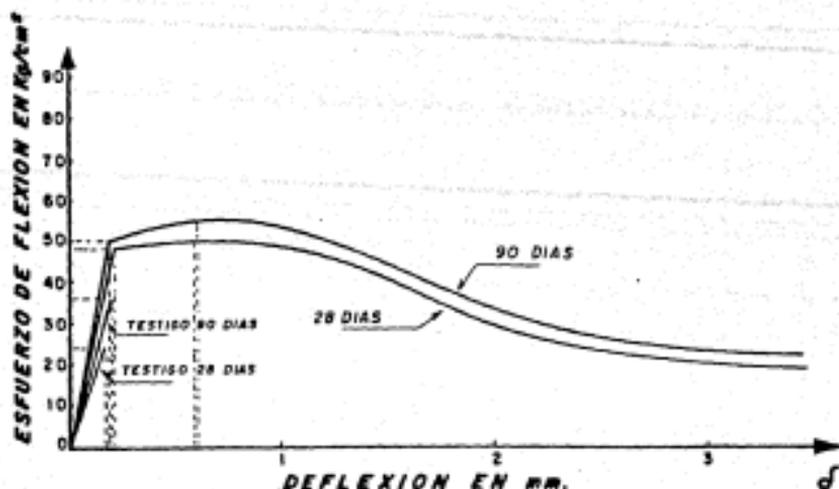


Fig. 65 COMPORTAMIENTO A FLEXION Y ESFUERZOS DE AGRIETAMIENTO Y MAXIMOS DEL CONCRETO CON FIBRAS DE 19 mm, 130 kg/m^3 DE REFUERZO, RELACION AGUA-CEMENTO 0.62, CRAVA-ARENA 30/70 Y AGREGADO DE 19 mm.

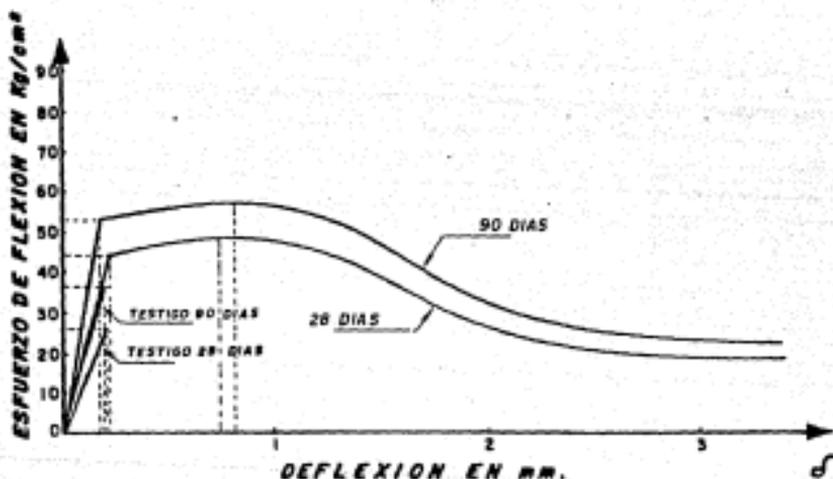


Fig. 66 COMPORTAMIENTO A FLEXION Y ESFUERZOS DE AGRIETAMIENTO Y MAXIMOS DEL CONCRETO CON FIBRAS LISAS DE 24 mm, 130 kg/m^3 DE REFUERZO, Y RELACION AGUA-CEMENTO 0.60, CRAVA-ARENA 40/62 Y AGREGADO DE 19 mm.

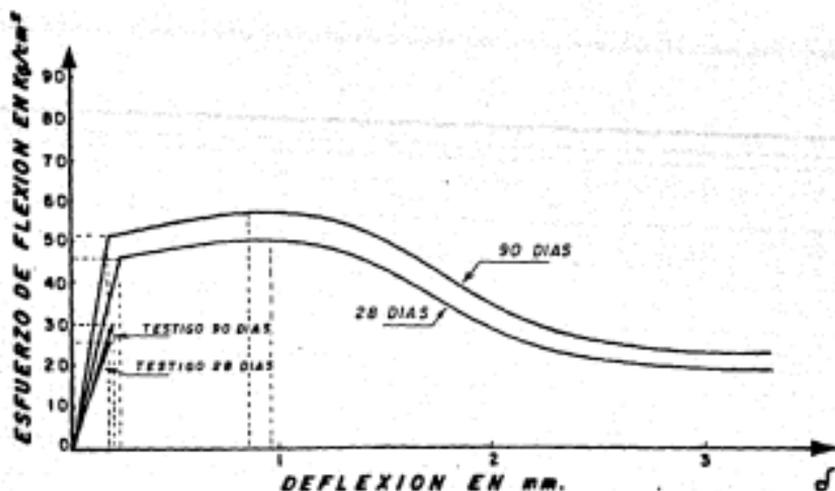


Fig. 67 COMPORTAMIENTO A FLEXION Y ESFUERZOS DE AGRIETAMIENTO Y MAXIMOS DEL CONCRETO CON FIBRAS DE 24 mm, 130 kg/m³ DE REFUERZO, RELACION AGUA-CEMENTO 0.62, GRAVA-ARENA 50/50 Y AGREGADO DE 19 mm.

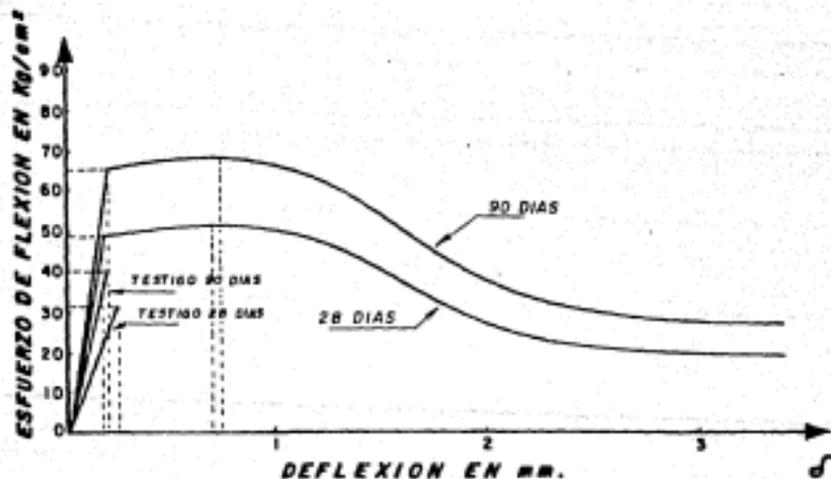


Fig. 68 COMPORTAMIENTO A FLEXION Y ESFUERZOS DE AGRIETAMIENTO Y MAXIMOS DEL CONCRETO CON FIBRAS DE 24 mm, 130 kg/m³ DE REFUERZO, RELACION AGUA-CEMENTO 0.45, GRAVA-ARENA 30/70 Y AGREGADO DE 13 mm.

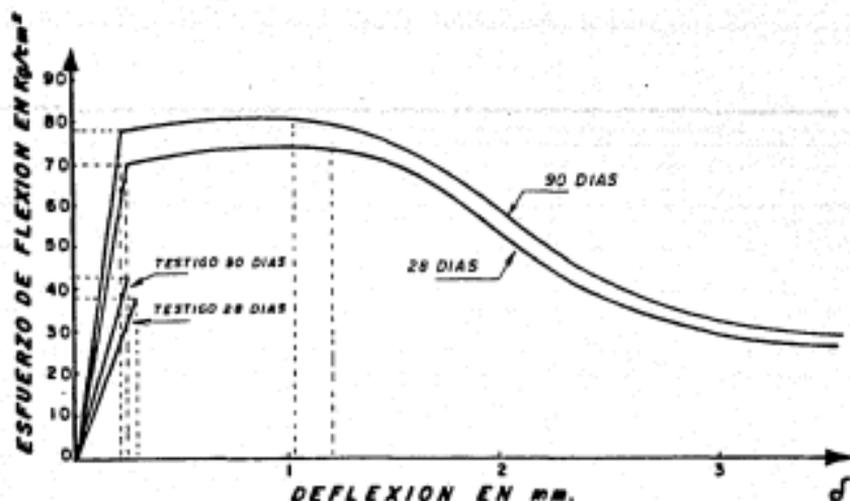


Fig. 69 COMPORTAMIENTO A FLEXION Y ESFUERZOS DE AGRIETAMIENTO Y MAXIMO DEL CONCRETO CON FIBRAS LISAS DE 24 mm, 130 kg/m³ DE REFUERZO, RELACION AGUA-CEMENTO 0.45, GRAVA-ARENA 40/60 Y AGREGADO DE - 13 mm.

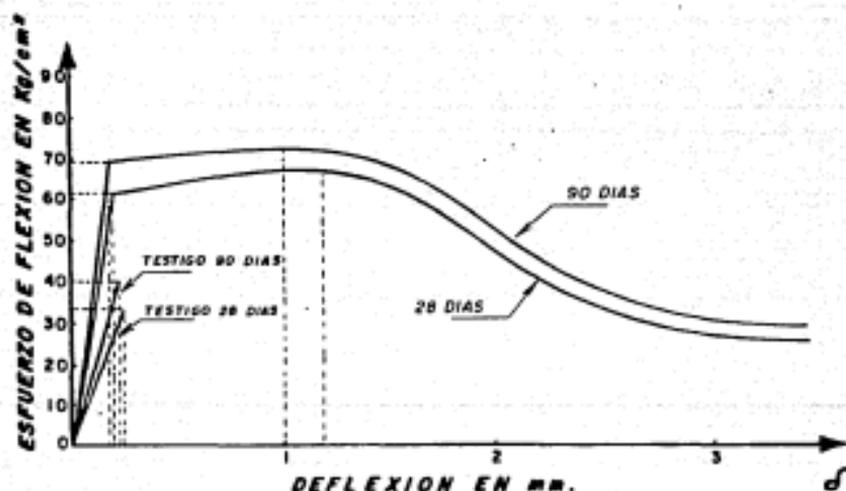


Fig. 70 COMPORTAMIENTO A FLEXION Y ESFUERZOS DE AGRIETAMIENTO Y MAXIMO DEL CONCRETO CON FIBRAS LISAS DE 24 mm, 130 kg/m³ DE REFUERZO, RELACION AGUA-CEMENTO 0.45, GRAVA-ARENA 50/50 Y AGREGADO DE 13 mm.

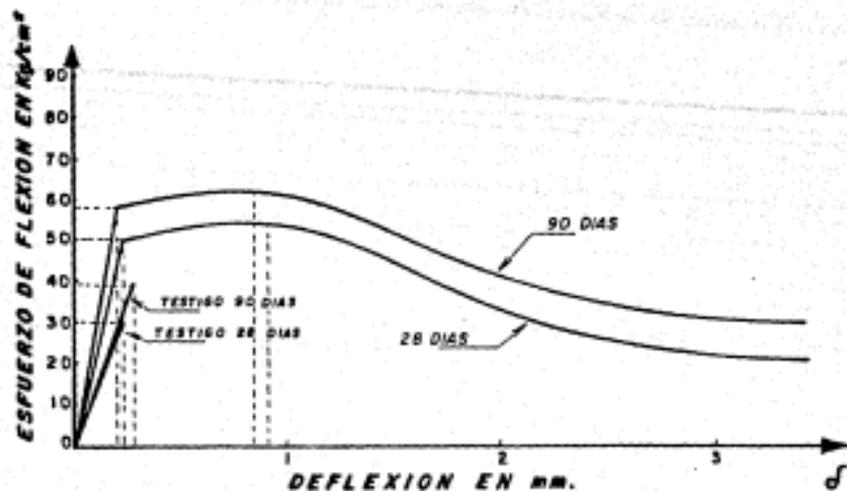


Fig. 71 COMPORTAMIENTO A FLEXION Y ESFUERZOS DE AGRIETAMIENTO Y MAXIMO DEL CONCRETO CON FIBRAS DE 24 mm, 130 kg/m^3 DE REFUERZO, RELACION AGUA-CEMENTO 0,55, GRAVA-ARENA 30/70 Y AGREGADO DE 13 mm.

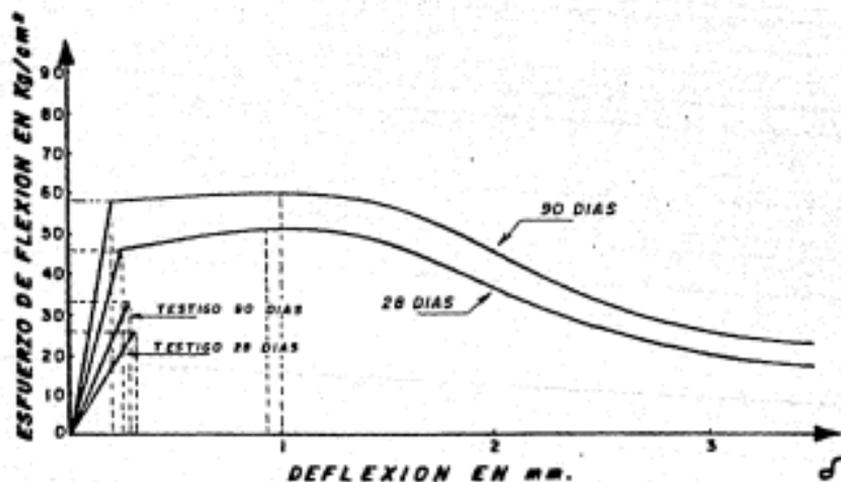


Fig. 72 COMPORTAMIENTO A FLEXION Y ESFUERZOS DE AGRIETAMIENTO Y MAXIMOS DEL CONCRETO CON FIBRAS DE 24 mm, 130 kg/m^3 DE REFUERZO, RELACION AGUA-CEMENTO 0,55, GRAVA-ARENA 40/60 Y AGREGADO DE 13 mm.

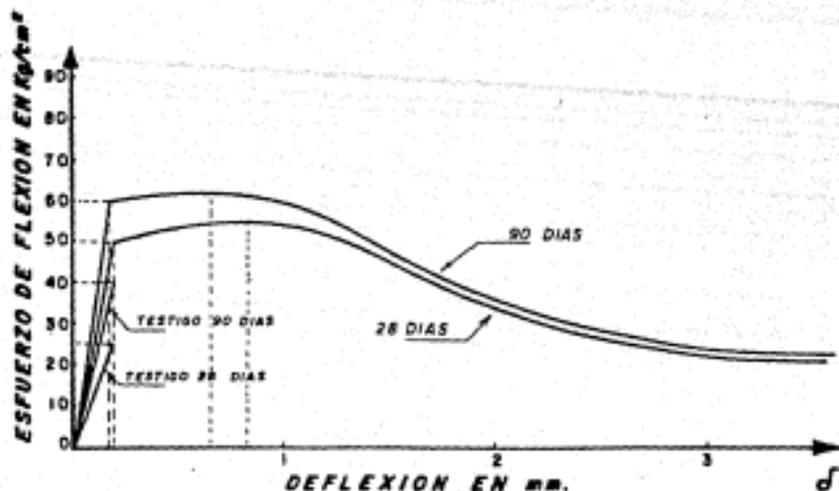


Fig. 73 COMPORTAMIENTO A FLEXION Y ESFUERZOS DE AGRIETAMIENTO Y MAXIMOS DEL CONCRETO CON FIBRAS LISAS DE 24 mm, 130 kg/m³ DE REFUERZO, RELACION AGUA-CEMENTO 0.55, CRAVA-ARENA 50/50 Y AGREGADO DE 13 mm.

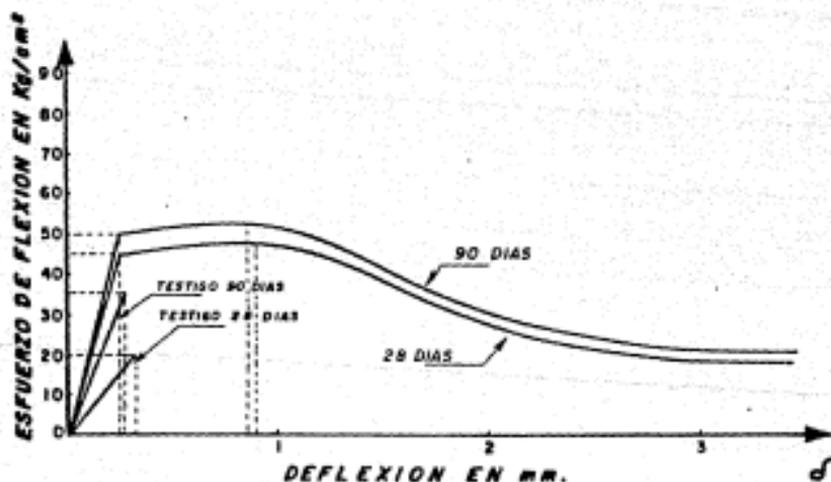


Fig. 74 COMPORTAMIENTO A FLEXION Y ESFUERZOS DE AGRIETAMIENTO Y MAXIMOS DEL CONCRETO CON FIBRAS LISAS DE 24 mm, 130 kg/m³ DE REFUERZO, RELACION AGUA-CEMENTO 0.62, CRAVA-ARENA 30/70 Y AGREGADO DE 13 mm.

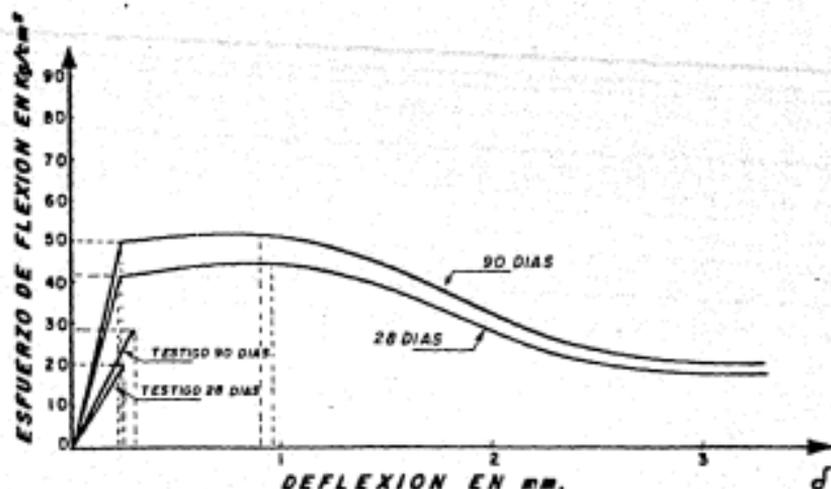


Fig. 75 COMPORTAMIENTO A FLEXION Y ESFUERZOS DE AGRIETAMIENTO Y MAXIMOS DEL CONCRETO CON FIBRAS LISAS DE 24 mm. 130 kg/m³ DE REFUERZO, RELACION AGUA-CEMENTO 0.62, GRAVA-ARENA 40/60 Y AGREGADO DE 13 mm.

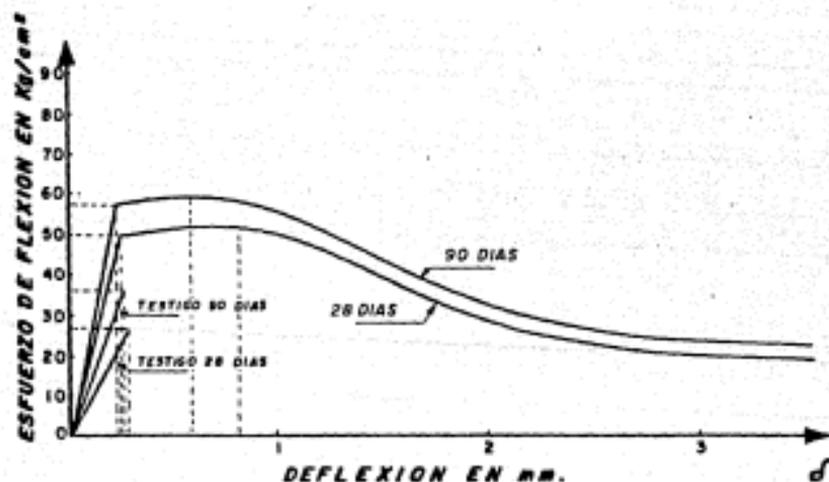


Fig. 76 COMPORTAMIENTO A FLEXION Y ESFUERZOS DE AGRIETAMIENTO Y MAXIMOS DEL CONCRETO CON FIBRAS LISAS DE 24 mm. 130 kg/m³ DE REFUERZO, RELACION AGUA-CEMENTO 0.62, GRAVA ARENA 50/50 Y AGREGADO DE 13 mm.

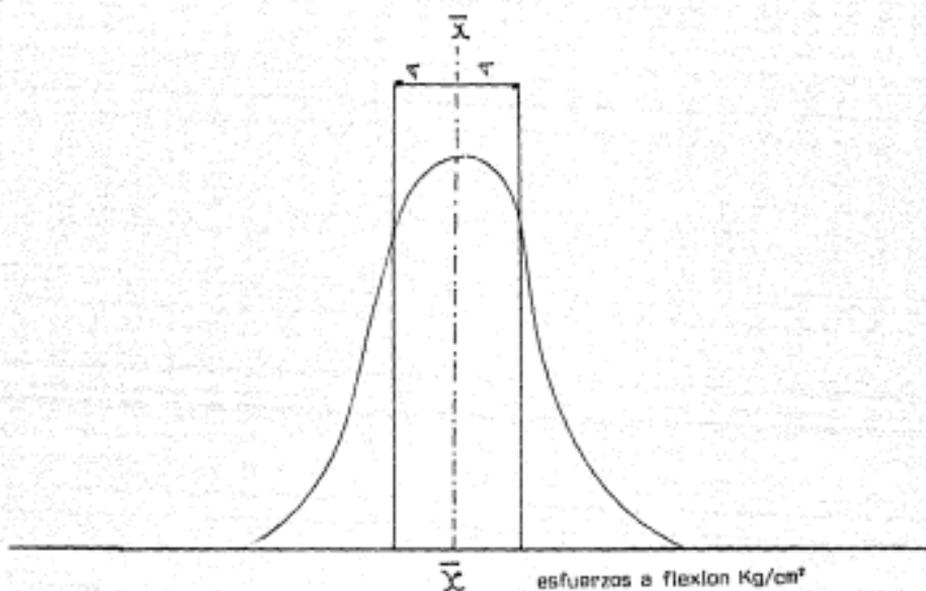


Fig 77 Curva de distribución estadística normalizada
 medidas de tendencia central [Tabla 87]
 esfuerzos a flexion, fibras lisas de 28 mm.
 tma = 19 mm.

A N E X O 2 .

TABLA 1 PROPIEDADES FISICAS DE LAS FIBRAS

FIBRAS	DIAMETRO MICRAS	LONGITUD mm	DENSIDAD Kg/m ³ 10 ³	MODULO DE YOUNG Kg/cm ² 10 ⁵	RESISTENCIA A LA TENSION Kg/cm ²
ALTA TENSION ACERO	100 - 600	10 - 60	7.86	200	700 - 2000
INOXIDABLE	10 - 330			160	2,100
CRISOTILO ASBESTOS	0.02 - 30	40	2.55	164	200 - 1800
CROCIDOLITA	0.1 - 20	—	3.37	196	3,500
TIPO 1 CARBON	8	10 A CONTINUA	1.90	380	1,800
TIPO 2	9		1.90	230	2,600
C E L U L O S A	—	—	1.2	10	300 - 500
E	8 - 10		2.54	72	3,500
FIDR10 ALCALINA	12.5	10 - 50		80	2,500
FILAMENTO 204	110 X 650		2.7	70	1,250
PRD 49 KEVLAR	10	6 - 65	1.45	133	2,900
PRD 29	12		1.44	69	2,900
NYLON (TIPO 242)	74	5 - 50	1.14	SUPERIOR A 4	750 - 900
MONOFILAMENTO POLIPROPILENO	100 - 200	5 - 50	0.9	SUPERIOR A 5	400
FIBRILADO	500 - 4000	20 - 75	0.9		400

TABLA 2

Dosificación de las mezclas estudiadas en laboratorio con fibras lisas Americanas de 19, 24, y 28 mm de longitud, relación agua-cemento 0.45, relación grava-arena 30/70 y tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

MATERIALES	DOSIFICACION EN Kg/m ³							
	MEZCLAS							
	TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
AGUA	220	220	220	220	220	220	220	220
CEMENTO	490	490	490	490	490	490	490	490
GRAVA	413	406	403	402	401	400	400	398
ARENA	964	947	941	939	937	935	935	930
FIBRAS	0	80	110	120	130	140	150	160

NOTA: Se preparó una mezcla por cada tamaño de fibra por dosificación, en total 21 mezclas.

TABLA 3

Dosificación de las mezclas estudiadas en laboratorio con fibras lisas Americanas de 19, 24, y 28 mm de longitud, relación agua-cemento 0.45, relación grava-arena 40/60, tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

MATERIALES	DOSIFICACION EN Kg/m ³							
	MEZCLAS							
	TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
AGUA	220	220	220	220	220	220	220	220
CEMENTO	490	490	490	490	490	490	490	490
GRAVA	551	541	538	536	535	534	533	532
ARENA	826	812	807	805	803	801	799	797
FIBRAS	0	80	110	120	130	140	150	160

NOTA: Se preparó una mezcla por cada tamaño de fibra por dosificación, en total 21 mezclas.

TABLA 6

Dosificación de las mezclas estudiadas en laboratorio con fibras lisas Americanas de 19, 24 y 28 mm. de longitud, relación agua-cemento 0.55, relación grava-arena 40/60 y tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

MATERIALES	DOSIFICACION EN Kg/ m ³							
	MEZCLAS							
	TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
AGUA	240	240	240	240	240	240	240	240
CEMENTO	480	480	480	480	480	480	480	480
GRAVA	535	526	522	521	520	518	517	516
ARENA	803	789	783	781	779	778	776	774
FIBRAS	0	80	110	120	130	140	150	160

NOTA: Se preparó una mezcla por cada tamaño de fibra por dosificación en total 21 mezclas.

TABLA 7

Dosificación de las mezclas estudiadas en laboratorio con fibras lisas Americanas de 19, 24 y 28 mm de longitud, relación agua-cemento 0.55, relación grava-arena 50/50 y tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

MATERIALES	DOSIFICACION EN Kg/ m ³							
	MEZCLAS							
	TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
AGUA	240	240	240	240	240	240	240	240
CEMENTO	480	480	480	480	480	480	480	480
GRAVA	669	657	653	651	650	648	647	645
ARENA	669	657	653	651	650	648	647	645
FIBRAS	0	80	110	120	130	140	150	160

NOTA: Se preparó una mezcla para cada tamaño de fibra por dosificación en total 21 mezclas.

TABLA 8

Dosificación de las mezclas estudiadas en laboratorio con fibras lisas Americanas de 19, 24, y 28 mm de longitud, relación agua-cemento 0.62, relación grava-arena 30/70 y tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

MATERIALES	DOSIFICACION EN Kg/ m ³							
	MEZCLAS							
	TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
AGUA	291	291	291	291	291	291	291	291
CEMENTO	480	480	480	480	480	480	480	480
GRAVA	366	358	356	355	354	353	352	351
ARENA	853	836	830	828	826	824	821	819
FIBRAS	0	80	110	120	130	140	150	160

NOTA: Se preparó una mezcla por cada tamaño de fibras por dosificación en total 21 mezclas.

TABLA 9

Dosificación de las mezclas estudiadas en laboratorio con fibras lisas Americanas de 19, 24 y 28 mm de longitud, relación agua-cemento 0.62, relación grava-arena 40/60 y tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

MATERIALES	DOSIFICACION EN Kg/ m ³							
	MEZCLAS							
	TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
AGUA	291	291	291	291	291	291	291	291
CEMENTO	480	480	480	480	480	480	480	480
GRAVA	487	478	474	473	472	471	469	468
ARENA	731	717	711	709	708	706	704	702
FIBRAS	0	80	110	120	130	140	150	160

NOTA: Se preparó una mezcla por cada tamaño de fibras por dosificación en total 21 mezclas.

TABLA 10

Dosificación de las mezclas estudiadas en laboratorio con fibras lisas Americanas de 19, 24 y 28 mm de longitud, relación agua-cemento 0.62, relación grava-arena 50/50 y tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

MATERIALES	DOSIFICACION EN Kg/ m ³							
	MEZCLAS							
	TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
AGUA	291	291	291	291	291	291	291	291
CEMENTO	480	480	480	480	480	480	480	480
GRAVA	609	597	593	591	590	588	587	585
ARENA	609	597	593	591	590	588	587	585
FIBRAS	0	80	110	120	130	140	150	160

NOTA: Se preparó una mezcla por cada tamaño de fibras por dosificación en total 21 mezclas.

TABLA 11

Dosificación de las mezclas estudiadas en laboratorio con fibras lisas Americanas de 19, 24 y 28 mm, Australianas de 19mm, onduladas de 24 mm, relación agua-cemento 0.45, relación grav arena 30/70 y tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

MATERIALES	DOSIFICACION EN Kg/ m ³							
	MEZCLAS							
	TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
AGUA	225	225	225	225	225	225	225	225
CEMENTO	500	500	500	500	500	500	500	500
GRAVA	404	396	394	393	392	391	390	389
ARENA	942	925	919	917	915	913	910	908
FIBRAS	0	80	110	120	130	140	150	160

NOTA: Se preparó una mezcla por cada tamaño de fibras por dosificación en total 35 mezclas.

TABLA 12

Dosificación de las mezclas estudiadas en laboratorio con fibras lisas Americanas de 19, 24 y 28 mm, Australianas de 19mm, onduladas de 24 mm, relación agua-cemento 0.45, relación grava-arena 40/60 y tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

MATERIALES	DOSIFICACION EN Kg/ m ³							
	MEZCLAS							
	TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
AGUA	225	225	225	225	225	225	225	225
CEMENTO	500	500	500	500	500	500	500	500
GRAVA	538	527	525	524	523	522	521	519
ARENA	807	793	788	786	784	782	780	788
FIBRAS	0	80	110	120	130	140	150	160

NOTA: Se preparó una mezcla por cada tamaño de fibras por dosificación en total 35 mezclas.

TABLA 13

Dosificación de las mezclas estudiadas en laboratorio con fibras lisas Americanas de 19, 24 y 28 mm, Australianas de 19 mm, onduladas de 24 mm, relación agua-cemento 0.45, relación grava-arena 50/50 y tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

MATERIALES	DOSIFICACION EN Kg/ m ³							
	MEZCLAS							
	TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
AGUA	225	225	225	225	225	225	225	225
CEMENTO	500	500	500	500	500	500	500	500
GRAVA	673	661	656	655	654	652	650	649
ARENA	673	661	656	655	654	652	650	649
FIBRAS	0	80	110	120	130	140	150	160

NOTA: Se preparó una mezcla por cada tamaño de fibras por dosificación en total 35 mezclas.

TABLA 14

Dosificación de las mezclas estudiadas en laboratorio con fibras lisas de 19,24 y 28 mm, Australianas de 19 mm, onduladas de 24 mm, relación agua-cemento 0.55, relación grava-arena 30/70 y tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

MATERIALES	DOSIFICACION EN Kg/m ³							
	MEZCLAS							
	TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
AGUA	275	275	275	275	275	275	275	275
CEMENTO	500	500	500	500	500	500	500	500
GRAVA	368	361	358	358	357	356	355	354
ARENA	860	843	837	835	832	830	828	826
FIERAS	0	80	110	120	130	140	150	160

NOTA: Se preparó una mezcla para cada tamaño de fibras por dosificación en total 35 mezclas.

TABLA 15

Dosificación de las mezclas estudiadas en laboratorio con fibras lisas Americanas de 19,24 y 28 mm, Australianas de 19mm, onduladas de 24mm, relación agua-cemento 0.55, relación grava-arena 40/60 y tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

MATERIALES	DOSIFICACION EN Kg/m ³							
	MEZCLAS							
	TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
AGUA	275	275	275	275	275	275	275	275
CEMENTO	500	500	500	500	500	500	500	500
GRAVA	491	482	478	476	476	474	473	472
ARENA	737	722	717	715	713	712	710	708
FIBRAS	0	80	110	120	130	140	150	160

NOTA: Se preparó una mezcla por cada tamaño de fibras por dosificación en total 35 mezclas.

TABLA 16

Dosificación de las mezclas estudiadas en laboratorio con fibras lisas Americanas de 19,24 y 28 mm, Australianas de 19 mm, onduladas de 24 mm, -relación agua-cemento 0.55, relación grava-arena 50/50 y tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

MATERIALES	DOSIFICACION EN Kg/m ³							
	MEZCLAS							
	TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
AGUA	275	275	275	275	275	275	275	275
CEMENTO	500	500	500	500	500	500	500	500
GRAVA	614	602	598	596	594	593	592	590
ARENA	614	602	598	596	594	593	592	590
PIBRAS	0	80	110	120	130	140	150	160

NOTA: Se preparó una mezcla por cada tamaño de fibras por dosificación, en total 35 mezclas.

TABLA 17

Dosificación de las mezclas estudiadas en laboratorio con fibras lisas Americanas de 19,24 y 28 mm, Australianas de 19 mm, onduladas de 24 mm, -relación agua-cemento 0.62, relación grava-arena 30/70, tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

MATERIALES	DOSIFICACION EN Kg/m ³							
	MEZCLAS							
	TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
AGUA	310	310	310	310	310	310	310	310
CEMENTO	500	500	500	500	500	500	500	500
GRAVA	344	337	334	333	332	330	330	329
ARENA	802	785	779	777	775	773	771	769
PIBRAS	0	80	110	120	130	140	150	160

NOTA: Se preparó una mezcla por cada tamaño de fibras por dosificación, en total 35 mezclas

TABLA 18

Dosificación de las mezclas estudiadas en laboratorio con fibras lisas Americanas de 19, 24 y 28 mm, Australianas de 19 mm, onduladas de 24 mm, relación agua-cemento 0.62, relación grava-arena 40/60 y tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

MATERIALES	DOSIFICACION EN Kg/m ³							
	MEZCLAS							
	TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
AGUA	310	310	310	310	310	310	310	310
CEMENTO	500	500	500	500	500	500	500	500
GRAVA	458	449	445	443	442	441	440	439
ARENA	687	673	668	666	664	662	660	658
FIBRAS	0	80	110	120	130	140	150	160

NOTA: Se preparó una mezcla por cada tamaño de fibras por dosificación en total 35 mezclas.

TABLA 19

Dosificación de las mezclas estudiadas en laboratorio con fibras lisas Americanas de 19,24 y 28 mm, Australianas de 19mm, onduladas de 24 mm, máximo de agregado grueso 13 mm.

MATERIALES	DOSIFICACION EN Kg/m ³							
	MEZCLAS							
	TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
AGUA	310	310	310	310	310	310	310	310
CEMENTO	500	500	500	500	500	500	500	500
GRAVA	573	561	556	555	553	552	550	548
ARENA	573	561	556	555	553	552	550	548
FIBRAS	0	80	110	120	130	140	150	160

NOTA: Se preparó una mezcla por cada tamaño de fibras por dosificación en total 35 mezclas.

TABLA 20

Dosificación de las mezclas estudiadas en laboratorio con fibras Suizas y Mexicanas tipo suizo, relación agua-cemento 0.45, relación grava-arena 40/60 y tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

MATERIALES	DOSIFICACION EN Kg/m ³						
	TESTIGO	SUIZAS			MEXICANAS TIPO SUIZO		
		1	2	3	1	2	3
AGUA	225	225	225	225	225	225	225
CEMENTO	500	500	500	500	500	500	500
GRAVA	538	533	532	530	533	532	530
ARENA	807	800	798	795	800	798	795
FIBRAS	0	40	50	70	40	50	70

NOTA: Con las fibras mexicanas se preparó una serie adicional con la misma dosificación pero la longitud de las fibras cambió de 6mm a 12 mm de longitud.

TABLA 21

Dosificación de las mezclas estudiadas en laboratorio con fibras Suizas y Mexicanas tipo Suizo, relación agua-cemento 0.45, relación grava-arena 40/60 y tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

MATERIALES	DOSIFICACION EN Kg/m ³						
	TESTIGO	SUIZAS			MEXICANAS TIPO SUIZO		
		1	2	3	1	2	3
AGUA	220	220	220	220	220	220	220
CEMENTO	490	490	490	490	490	490	490
GRAVA	551	546	545	542	546	545	542
ARENA	826	819	817	814	819	817	814
FIBRAS	0	40	50	70	40	50	70

NOTA: Con las fibras mexicanas se preparó una serie adicional con la misma dosificación pero la longitud de fibras cambió de 6mm a 12 mm.

TABLA 22

Dosificación de las mezclas estudiadas en laboratorio con fibras plásticas, relación agua-cemento 0.5, relación grava-arena 40/60, tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

MATERIALES	DOSIFICACION EN Kg/m ³						
	TESTIGO	POLIPROPILENO			POLIESTIRENO		
		1	2	3	1	2	3
AGUA	240	240	240	240	240	240	240
CEMENTO	480	480	480	480	480	480	480
GRAVA	535	534	533	530	534	533	530
ARENA	803	801	800	795	801	800	795
FIBRAS	0	1	2	5	1	2	5

TABLA 23

Dosificación de las mezclas estudiadas en laboratorio con fibras plásticas, relación agua-cemento 0.62 relación grava-arena 40/60 tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

MATERIALES	DOSIFICACION EN Kg/m ³						
	TESTIGO	POLIPROPILENO			POLIESTIRENO		
		1	2	3	1	2	3
AGUA	298	298	298	298	298	298	298
CEMENTO	480	480	480	480	480	480	480
GRAVA	481	480	479	476	480	479	476
ARENA	721	720	718	713	720	718	713
FIBRAS	0	1	2	5	1	2	5

TABLA 24

Dosificación de las mezclas de prueba, lanzadas en túnel con fibras lisas americanas de 24 mm y suizas de 6 mm, relación grava-arena -- 40/60 y tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

MATERIALES	DOSIFICACION EN Kg/m ³						
	TESTIGO	AMERICANAS			SUIZAS		
		1	2	3	1	2	3
AGUA (APROX.)	225	225	225	225	225	225	225
CEMENTO	500	500	500	500	500	500	500
GRAVA	538	527	525	523	533	532	530
ARENA	807	793	788	784	800	798	795
FIBRAS	0	80	110	130	40	50	70

NOTA: Se colocaron 3 artesas por lanzado para corte de especímenes de ensaye

TABLA 25

Dosificación de las mezclas de prueba lanzadas en túnel con fibras lisas americanas de 24 mm y onduladas de 24 mm, relación grava-arena 40/60 y tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

MATERIALES	DOSIFICACION EN Kg/m ³						
	TESTIGO	LISAS			ONDULADAS		
		1	2	3	1	2	3
AGUA (APROX.)	206	206	206	206	206	206	206
CEMENTO	480	480	480	480	480	480	480
GRAVA	567	558	554	552	558	554	552
ARENA	851	836	831	827	836	831	827
FIBRAS	0	80	110	130	80	110	130

NOTA: Se colocaron 3 artesas por lanzado para corte de especímenes de ensaye

TABLA 26 Esfuerzo máximo a flexión obtenido a 28 días de edad en laboratorio. Relación agua-cemento 0.45, grava-arena - 30/70 y tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

MEZCLA	ESFUERZO EN Kg/cm ²		
	FIBRAS LISAS		
	18 mm.	24 mm.	28 mm.
TESTIGO	36	36	37
1	51	50	48
2	58	57	52
3	58	55	57
4	60	59	60
5	62	60	58
6	60	63	59
7	62	61	57

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 27 Esfuerzo máximo a flexión obtenido a 28 días de edad en laboratorio. Relación agua-cemento 0.45, grava-arena 40/60 y tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

MEZCLA	ESFUERZO EN Kg/cm ²		
	FIBRAS LISAS		
	18 mm.	24 mm.	28 mm.
TESTIGO	42	41	39
1	56	56	48
2	63	60	57
3	61	66	60
4	73	78	70
5	78	78	65
6	78	77	57
7	85	83	60

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 28 Esfuerzo máximo a flexión obtenido a 28 días de edad en laboratorio. Relación agua-cemento 0.45, grava-arena - 50/50 y tamaño máximo de agregado grueso 19 mm

MEZCLA	ESFUERZO EN Kg/cm ²		
	FIBRAS LISAS		
	18 mm.	24 mm.	28 mm.
TESTIGO	40	38	40
1	50	53	46
2	59	58	56
3	62	60	58
4	71	70	65
5	72	69	56
6	69	70	59
7	74	72	60

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 29 Esfuerzo máximo obtenido a 28 días de edad en laboratorio. Relación agua-cemento 0.55, grava-arena - 30/70 y tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

MEZCLA	ESFUERZO EN Kg/cm ²		
	FIBRAS LISAS		
	18 mm.	24 mm.	28 mm.
TESTIGO	36	32	32
1	40	45	46
2	45	50	52
3	50	52	57
4	58	57	60
5	60	56	60
6	65	60	58
7	68	60	64

TABLA 30 Esfuerzo máximo a flexión obtenido a 28 días de edad en laboratorio. Relación agua-cemento 0.55, grava-arena - 40/60 y tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

MEZCLA	ESFUERZO EN Kg/cm ²		
	FIBRAS LISAS		
	18 mm.	24 mm.	28 mm.
TESTIGO	31	36	40
1	40	50	45
2	47	56	58
3	50	52	60
4	53	58	65
5	60	58	53
6	66	64	58
7	70	63	55

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 31 Esfuerzo máximo a flexión obtenido a 28 días de edad en laboratorio. Relación agua-cemento 0.55, grava-arena - 50/50 y tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

MEZCLA	ESFUERZO EN Kg/cm ²		
	FIBRAS LISAS		
	18 mm.	24 mm.	28 mm.
TESTIGO	33	30	36
1	46	46	40
2	54	50	51
3	56	50	48
4	60	55	53
5	57	58	60
6	65	60	54
7	66	60	50

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 32 Esfuerzo máximo a flexión a 28 días de edad en laboratorio. Relación agua-cemento 0.62, grava-arena - 30/70 y tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

MEZCLA	E SFUERZO EN Kg/cm ²		
	FIBRAS LISAS		
	18 mm.	24 mm.	28 mm.
TESTIGO	26	24	20
1	28	30	35
2	30	36	40
3	30	38	45
4	42	50	50
5	50	52	48
6	56	54	52
7	62	56	50

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 33 Esfuerzo máximo a flexión obtenido a 28 días de edad en laboratorio. Relación agua-cemento 0.62, grava-arena 40/60 tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

MEZCLA	E SFUERZO EN Kg/cm ²		
	FIBRAS LISAS		
	18 mm.	24 mm.	28 mm.
TESTIGO	30	26	25
1	30	32	35
2	36	40	42
3	35	45	50
4	43	48	52
5	53	54	56
6	62	58	55
7	65	61	54

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 34 Esfuerzo máximo a flexión obtenido a 28 días de edad en laboratorio. Relación agua-cemento 0.62 grava-arena 50/50 y tamaño máximo de agregado grueso 19 mm

MEZCLA	ESFUERZO EN Kg/cm ²		
	FIBRAS LISAS		
	18 mm.	24 mm.	28 mm.
TESTIGO	28	25	32
1	30	28	36
2	39	38	40
3	40	42	45
4	52	50	48
5	50	54	50
6	66	60	54
7	68	60	60

TABLA 35 Esfuerzo máximo a flexión obtenido a 28 días de edad en laboratorio
Relación agua-cemento 0.45, grava-arena 30/70 y tamaño máximo de --
agregado grueso 13 mm.

MEZCLA	ESFUERZO EN Kg/cm ²				
	TIPO DE FIBRAS				
	LISAS			ONDULADAS	AUSTRALIANAS
	18 mm	24mm	28mm	24 mm	18 mm
TESTIGO	37	31	33	33	36
1	46	43	38	30	45
2	55	53	46	35	56
3	60	56	54	-	63
4	-	51	48	38	70
5	65	63	50	37	75
6	67	60	45	40	-
7	65	63	52	38	80

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 36 Esfuerzo máximo a flexión obtenido a 28 días de edad en laboratorio
Relación agua-cemento 0.45, grava-aren: 3/60 y tamaño máximo de --
agregado grueso 13 mm

MEZCLA	ESFUERZO EN Kg/cm ²				
	TIPO DE FIBRAS				
	LISAS			ONDULADAS	AUSTRALIANAS
	18 mm.	24mm.	28mm.	24 mm.	18 mm.
TESTIGO	36	38	40	38	41
1	49	54	56	35	56
2	58	58	62	38	64
3	66	63	66	40	68
4	70	74	70	38	76
5	75	74	68	42	78
6	80	76	-	40	82
7	83	80	70	45	85

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 37 Esfuerzo máximo a flexión obtenidos a 28 días de edad en laboratorio Relación agua-cemento 0.45, grava-arena 50/50 y tamaño máximo de agregado grueso 13 mm

MEZCLA	ESFUERZO EN Kg/cm ²				
	TIPO DE FIBRAS				
	LISAS			ONDULADAS	AUSTRALIANAS
	18 mm	24 mm	28 mm	24 mm	18 mm
TESTIGO	40	33	35	36	38
1	45	42	40	-	45
2	56	52	43	38	58
3	60	58	51	36	64
4	66	67	55	41	69
5	75	70	63	45	78
6	-	67	58	44	81
7	78	72	60	47	86

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 38 Esfuerzos máximos a flexión obtenidos a 28 días de edad en laboratorio Relación agua-cemento 0.55, grava-arena 30/70, y tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

MEZCLA	ESFUERZO EN Kg/cm ²				
	TIPO DE FIBRAS				
	LISAS			ONDULADAS	AUSTRALIANAS
	18 mm.	24 mm	28 mm.	24 mm.	18 mm.
TESTIGO	30	30	28	33	27
1	40	40	42	35	38
2	53	50	51	30	45
3	47	50	56	36	50
4	56	54	-	-	55
5	60	53	48	40	58
6	64	61	55	50	60
7	66	61	51	42	65

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 39 Esfuerzos máximos a flexión obtenidos a 28 días de edad en laboratorio Relación agua-cemento 0.55, grava-arena 40/60 y tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

MEZCLA	ESFUERZO EN Kg/cm ²				
	TIPO DE FIBRAS				
	L I S A S			ONDULADAS	AUSTRALIANAS
	18 mm	24 mm	28 mm	24 mm	18 mm
TESTIGO	26	26	26	24	20
1	42	40	40	20	36
2	50	46	45	22	43
3	-	50	55	26	50
4	56	51	56	30	58
5	60	53	56	28	61
6	60	58	60	31	64
7	65	61	58	-	70

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 40 Esfuerzos máximos a flexión obtenidos a 28 días de edad en laboratorio Relación agua-cemento 0.55, grava-arena 50/50 y tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

MEZCLA	ESFUERZO EN Kg/cm ²				
	TIPO DE FIBRAS				
	L I S A S			ONDULADAS	AUSTRALIANAS
	18 mm.	24 mm.	28 mm.	24 mm.	18 mm.
TESTIGO	28	25	30	27	25
1	40	51	45	26	38
2	47	47	50	28	50
3	50	45	50	-	53
4	61	55	57	30	60
5	60	60	60	36	65
6	62	59	56	35	68
7	62	60	60	42	73

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 41 Esfuerzos máximos obtenidos a 28 días de edad en laboratorio.
Relación agua-cemento 0.62, grava-arena 30/70 y tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

MEZCLA	ESFUERZO EN Kg/cm ²				
	TIPO DE FIBRAS				
	L I S A S			ONDULADAS	AUSTRALIANAS
	18 mm	24 mm	28 mm	24 mm	18 mm
TESTIGO	26	20	25	20	23
1	20	25	25	17	28
2	30	32	35	25	36
3	36	38	40	22	42
4	46	48	42	30	46
5	50	48	48	31	48
6	48	50	52	28	52
7	55	54	50	35	53

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 42 Esfuerzos máximos obtenidos a 28 días de edad en laboratorio.
Relación agua-cemento 0.62, grava-arena 40/60 y tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

MEZCLA	ESFUERZO EN Kg/cm ²				
	TIPO DE FIBRAS				
	L I S A S			ONDULADAS	AUSTRALIANAS
	18 mm.	24 mm.	28 mm.	24 mm.	18 mm.
TESTIGO	25	20	23	25	20
1	28	25	23	20	24
2	35	36	30	25	30
3	40	40	37	22	36
4	46	45	38	20	43
5	50	50	44	28	50
6	53	56	50	31	48
7	57	60	50	28	53

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 43 Esfuerzo máximo obtenido a 28 días de edad en laboratorio.
Relación agua-cemento 0.62, grava-arena 50/50 y tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

MEZCLA	ESFUERZO EN Kg/cm ²				
	TIPO DE FIBRAS				
	L I S A S			ONDULADAS	AUSTRALIANAS
	18 mm.	24 mm.	28 mm.	24 mm.	18 mm.
TESTIGO	33	27	31	28	33
1	36	40	38	30	40
2	42	43	40	30	45
3	48	50	50	33	51
4	56	52	50	30	56
5	59	60	55	33	60
6	60	60	50	35	59
7	60	63	56	33	63

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 64 Resultados comparativos entre mezclas coladas en laboratorio y lanzadas en túnel de metro. Pruebas efectuadas a 28 días de edad. Las muestras de túnel se obtuvieron a partir de corte de aristas.

MEZCLA COMPARABLE A/C = 0.48 GRAVA - ARENA 40/80 Y LANZADAS	FIBRAS EN Kg/m ³	TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO GRUESO EN mm.	ESFUERZO MÁXIMO A 28 DÍAS EN Kg/cm ²			
			TIPO DE FIBRAS			
			L I S A S		ONDULADAS	
			LANZADA	COLADA	LANZADA	COLADA
1 Y 4	0	13	40	38	41	38
		19	44	41	-	-
1 Y 4	80	13	50	54	40	35
		19	60	56	-	-
1 Y 4	110	13	64	58	42	38
		19	67	60	-	-
1 Y 4	130	13	76	74	45	38
		19	88	78	-	-

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 45 Resultados de pruebas de laboratorio con fibras Americanas lisas de - de 24 mm de largo, agua-cemento 0.45, grava-arena 30/70.

M E Z C L A	ESFUERZO A COMPRESION EN Kg/cm ²			ESFUERZO A FLEXION EN Kg/cm ²					
				EDAD EN DIAS					
	EDAD EN DIAS			PRIMERA GRIETA			ESFUERZO ULTIMO		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
TESTIGO	170	300	420	22	36	42	22	36	42
1	183	326	438	35	48	50	35	50	55
2	175	320	430	38	51	57	38	57	59
3	170	320	423	38	50	59	40	55	60
4	172	318	430	40	56	67	42	59	71
5	170	332	438	42	56	65	42	60	70
6	180	336	440	45	60	71	47	63	76
7	184	340	442	45	59	71	45	61	79

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

TABLA 46 Resultados de pruebas de laboratorio con fibras Americanas lisas de - 24 mm de largo, agua-cemento 0.45, grava-arena 40/60.

M E Z C L A	ESFUERZO A COMPRESION EN Kg/cm ²			ESFUERZO A FLEXION EN Kg/cm ²					
				EDAD EN DIAS					
	EDAD EN DIAS			PRIMERA GRIETA			ESFUERZO ULTIMO		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
TESTIGO	206	340	450	28	41	48	28	41	48
1	217	361	467	38	53	57	38	56	60
2	226	374	480	40	57	63	40	60	63
3	230	370	480	45	66	74	47	66	78
4	220	368	467	48	75	83	50	78	83
5	210	356	461	50	77	84	53	78	85
6	200	349	455	50	76	84	50	77	83
7	210	351	450	54	79	88	60	83	93

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

TABLE 47 Resultados de pruebas de laboratorio con fibras lisas Americanas de 24mm de largo, agua-cemento 0.45, grava-arena 50/50

MEZCLA	ESFUERZO A COMPRESION EN Kg/cm ²			ESFUERZO A FLEXION EN Kg/cm ²					
				EDAD EN DIAS					
	EDAD EN DIAS			PRIMERA GRIETA			ESFUERZO ULTIMO		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
TESTIGO	180	325	430	26	38	45	26	38	45
1	200	344	452	37	50	53	37	53	57
2	200	347	455	39	54	60	39	58	61
3	190	345	450	40	58	66	43	60	69
4	185	343	447	44	65	75	46	70	77
5	180	344	450	46	71	75	47	69	77
6	190	340	445	47	68	77	49	70	79
7	187	339	447	50	69	80	51	72	86

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

TABLE 48 Resultados de pruebas de laboratorio con fibras lisas Americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.55 grava-arena 30/70.

MEZCLA	ESFUERZO A COMPRESION EN Kg/cm ²			ESFUERZO A FLEXION EN Kg/cm ²					
				EDAD EN DIAS					
	EDAD EN DIAS			PRIMERA GRIETA			ESFUERZO ULTIMO		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
TESTIGO	140	235	344	20	32	39	20	32	39
1	151	252	360	29	45	50	29	45	51
2	148	248	355	36	49	57	36	50	53
3	142	240	350	38	49	56	38	52	58
4	138	235	340	37	52	60	40	57	64
5	141	230	350	39	50	60	40	56	67
6	145	238	356	42	56	68	44	60	70
7	152	245	361	45	58	70	45	60	76

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

TABLE 49 Resultados de pruebas de laboratorio con fibras lisas Americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.55, grava-arena 40/60.

MEZCLA	ESFUERZO A COMPRESION EN Kg/cm ²			ESFUERZO A FLEXION EN Kg/cm ²					
				EDAD EN DIAS					
	EDAD EN DIAS			PRIMERA GRIETA			ESFUERZO ULTIMO		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
TESTIGO	160	258	362	23	36	41	23	36	41
1	170	275	376	37	48	49	37	50	52
2	177	283	390	38	51	56	38	56	59
3	180	280	389	37	51	60	40	52	60
4	175	280	380	40	55	68	42	58	73
5	170	269	372	41	55	68	41	58	73
6	162	260	365	45	58	70	47	64	73
7	168	266	365	44	60	73	44	63	80

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

TABLE 50 Resultados de pruebas de laboratorio con fibras lisas Americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.55, grava-arena 50/50

MEZCLA	ESFUERZO A COMPRESION EN Kg/cm ²			ESFUERZO A FLEXION EN Kg/cm ²					
				EDAD EN DIAS					
	EDAD EN DIAS			PRIMERA GRIETA			ESFUERZO ULTIMO		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
TESTIGO	145	240	355	20	30	39	20	30	39
1	160	256	360	31	43	50	31	46	50
2	153	270	376	35	50	55	35	50	55
3	164	260	369	40	47	56	40	50	57
4	160	255	365	40	50	63	42	55	68
5	156	250	360	38	50	63	40	58	65
6	154	258	366	42	54	70	45	60	70
7	165	255	355	46	57	68	46	60	78

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

TABLA 51 Resultados de pruebas de laboratorio con fibras lisas Americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.62, grava-arena 30/70.

MEZCLA	ESFUERZO A COMPRESION EN Kg/cm ²			ESFUERZO A FLEXION EN Kg/cm ²					
				EDAD EN DIAS					
	EDAD EN DIAS			PRIMERA GRIETA			ESFUERZO ULTIMO		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
TESTIGO	110	180	278	17	24	36	17	24	36
1	125	192	290	25	30	40	25	30	40
2	130	200	210	28	36	45	28	36	48
3	130	197	212	30	38	45	31	38	48
4	126	180	285	34	48	50	36	50	55
5	120	185	290	36	48	56	36	52	57
6	110	175	280	36	47	60	38	54	60
7	120	190	280	40	52	65	42	56	70

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

TABLA 52 Resultados de pruebas de laboratorio con fibras lisas Americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.62, grava-arena 40/60

MEZCLAS	ESFUERZO A COMPRESION EN Kg/cm ²			ESFUERZO A FLEXION EN Kg/cm ²					
				EDAD EN DIAS					
	EDAD EN DIAS			PRIMERA GRIETA			ESFUERZO ULTIMO		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
TESTIGO	130	210	306	20	26	36	20	26	36
1	142	228	320	25	32	40	25	32	40
2	148	230	320	30	40	45	30	40	47
3	151	232	326	35	43	48	35	45	50
4	155	225	330	40	44	53	42	48	57
5	140	230	325	43	50	51	43	54	63
6	135	220	315	43	55	65	44	58	70
7	140	209	320	46	54	66	47	61	78

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

TABLA 53 Resultados de pruebas de laboratorio con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.62, grava-arena 50/50.

M E Z C L A	ESFUERZO A COMPRESION EN kg/cm ²			ESFUERZO A FLEXION EN kg/cm ²					
				EDAD EN DIAS					
	EDAD EN DIAS			PRIMERA GRIETA			ESFUERZO ULTIMO		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
TESTIGO	121	196	295	18	25	30	18	25	30
1	134	210	360	20	28	36	20	28	36
2	138	218	310	28	38	42	28	38	42
3	140	216	321	32	40	46	32	42	48
4	140	220	300	37	46	51	39	50	57
5	130	205	310	38	48	57	39	54	64
6	120	195	295	40	55	62	43	60	67
7	130	200	300	45	50	67	45	60	78

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

TABLA 54 Resultado de pruebas de laboratorio con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.45, grava-arena 30/70

M E Z C L A	ESFUERZO A COMPRESION EN kg/cm ²			ESFUERZO A FLEXION EN kg/cm ²					
				EDAD EN DIAS					
	EDAD EN DIAS			PRIMERA GRIETA			ESFUERZO ULTIMO		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
TESTIGO	180	297	415	20	31	40	20	31	40
1	180	300	420	32	43	47	32	43	48
2	170	290	422	32	48	51	34	53	60
3	168	285	420	35	50	54	38	56	59
4	170	310	428	38	49	65	40	51	68
5	165	325	430	37	51	63	42	63	70
6	174	330	431	40	55	68	45	60	72
7	178	334	440	42	60	70	45	63	75

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

TABLA 55 Resultados de pruebas de laboratorio con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.45, grava-arena 40/60

MEZCLA	ESFUERZO A COMPRESION EN kg/cm ²			ESFUERZO A FLEXION EN kg/cm ²					
				EDAD EN DIAS					
	EDAD EN DIAS			PRIMERA GRIETA			ESFUERZO ULTIMO		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
TESTIGO	200	335	440	26	38	43	26	38	43
1	210	353	458	32	50	53	36	54	57
2	220	365	471	38	55	60	40	58	63
3	225	362	468	40	58	70	42	63	73
4	206	355	460	45	70	78	48	74	80
5	200	341	453	47	72	80	50	74	81
6	185	340	444	50	74	80	51	76	80
7	200	338	450	50	75	83	56	80	88

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

TABLA 56 Resultados de pruebas de laboratorio con fibras lisas americanas de 24 mm, agua-cemento 0.45, grava-arena 50/50.

MEZCLA	ESFUERZO A COMPRESION EN kg/cm ²			ESFUERZO A FLEXION EN kg/cm ²					
				EDAD EN DIAS					
	EDAD EN DIAS			PRIMERA GRIETA			ESFUERZO ULTIMO		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
TESTIGO	170	318	420	24	33	40	24	33	40
1	185	337	442	35	42	48	35	42	50
2	191	340	450	37	50	55	40	52	55
3	180	340	453	36	55	61	38	58	70
4	170	317	422	40	61	69	43	67	72
5	175	332	443	42	65	71	45	70	71
6	181	338	432	43	64	75	50	67	80
7	190	325	429	47	68	76	50	72	83

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

TABLA 57 Resultados de pruebas de laboratorio con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.55, grava-arena 30/70.

M E Z C L A	ESFUERZO A COMPRESION EN kg/cm ²			ESFUERZO A FLEXION EN kg/cm ²					
				EDAD EN DIAS					
	EDAD EN DIAS			PRIMERA GRIETA			ESFUERZO ULTIMO		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
TESTIGO	133	228	336	19	30	39	19	30	39
1	144	241	349	22	40	43	22	40	43
2	140	236	364	31	49	50	32	50	50
3	136	229	340	36	51	56	36	50	55
4	130	231	329	34	50	58	41	54	62
5	128	220	340	36	48	62	37	53	66
6	133	230	349	40	57	63	42	61	67
7	150	238	356	45	60	66	45	61	74

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

TABLA 58 Resultados de pruebas de laboratorio con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.55, grava-arena 40/60.

M E Z C L A	ESFUERZO A COM- PRESION EN kg/cm ²			ESFUERZO A TENSION EN kg/cm ²					
				EDAD EN DIAS					
	EDAD EN DIAS			PRIMERA GRIETA			ESFUERZO ULTIMO		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
TESTIGO	160	253	358	18	26	33	18	26	33
1	162	270	376	30	40	44	30	40	44
2	170	284	381	31	42	48	35	46	50
3	172	268	375	36	44	51	40	50	54
4	170	269	363	38	46	58	50	51	60
5	162	260	358	40	46	60	42	53	61
6	154	251	360	42	55	68	43	58	65
7	160	259	357	45	57	68	47	61	73

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

TABLA 59 Resultados de pruebas de laboratorio con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.55, grava-arena 50/50.

M E Z C L A	ESFUERZO A COMPRESION EN kg/cm^2			ESFUERZO A FLEXION EN kg/cm^2					
				EDAD EN DIAS					
	EDAD EN DIAS			PRIMERA GRIETA			ESFUERZO ULTIMO		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
TESTIGO	140	240	338	20	25	40	20	25	40
1	150	240	350	30	40	43	30	41	46
2	145	265	361	32	45	51	32	47	50
3	158	243	370	37	40	56	41	45	52
4	160	242	260	38	50	60	40	55	62
5	156	240	345	36	51	63	41	60	63
6	154	250	353	40	53	66	43	58	67
7	160	250	345	46	58	66	46	60	75

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

TABLA 60 Resultado de pruebas de laboratorio con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.62, grava-arena 30/70.

M E Z C L A	ESFUERZO A COMPRESION EN kg/cm^2			ESFUERZO A FLEXION EN kg/cm^2					
				EDAD EN DIAS					
	EDAD EN DIAS			PRIMERA GRIETA			ESFUERZO ULTIMO		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
TESTIGO	110	170	280	18	20	35	18	20	35
1	120	185	280	22	25	36	22	25	36
2	125	188	206	26	30	41	28	32	44
3	120	190	200	28	38	42	31	38	46
4	119	170	275	30	45	50	34	48	52
5	120	180	275	32	48	52	36	48	53
6	100	165	271	36	48	55	38	50	56
7	115	186	280	40	53	61	43	54	58

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

TABLA 61 Resultados de pruebas de laboratorio con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.62, grava-arena 40/60.

M E Z C L A	ESFUERZO A COMPRESION EN kg/cm ²			ESFUERZO A FLEXION EN kg/cm ²					
				EDAD EN DIAS					
	EDAD EN DIAS			PRIMERA GRIETA			ESFUERZO ULTIMO		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
TESTIGO	125	210	290	16	20	28	16	20	28
1	138	219	315	18	25	36	18	25	36
2	140	225	309	22	31	40	28	36	45
3	145	230	310	30	40	45	33	40	46
4	150	225	340	37	42	50	40	45	51
5	140	218	320	41	48	56	43	50	60
6	130	222	300	43	50	61	45	56	68
7	141	210	315	46	57	63	45	60	76

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

TABLA 62 Resultados de pruebas de laboratorio con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.62, grava-arena 50/50.

M E Z C L A	ESFUERZO A COMPRESION EN kg/cm ²			ESFUERZO A FLEXION EN kg/cm ²					
				EDAD EN DIAS					
	EDAD EN DIAS			PRIMERA GRIETA			ESFUERZO ULTIMO		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
TESTIGO	120	190	283	17	27	36	17	27	36
1	135	200	356	30	38	40	30	40	42
2	130	215	300	32	42	45	32	43	48
3	135	200	318	35	48	50	38	50	57
4	140	216	291	35	50	57	37	57	60
5	125	200	300	36	49	60	42	60	65
6	120	196	300	37	50	65	41	60	70
7	125	190	296	40	55	68	43	63	71

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes tamaño máximo de agregado grueso 13 mm.

TABLA 63 Esfuerzos y deflexiones obtenidos con fibras lisas americanas de -
24 mm de largo, agua-cemento 0.45, grava-arena 30/70 y agregado max.
19 mm.

M E Z C L A	ESFUERZO EN kg/cm ²				DEFLEXION EN mm			
	PRIMERA GRIETA				ESFUERZO MAXIMO			
	EDAD EN DIAS				EDAD EN DIAS			
	28	∅	90	∅	28	∅	90	∅
TESTIGO	36	0.15	42	0.20	36	0.15	42	0.20
1	48	0.18	50	0.22	50	0.85	55	0.90
2	51	0.18	57	0.25	57	0.80	59	0.90
3	50	0.20	59	0.21	55	0.90	60	1.00
4	56	0.18	67	0.20	59	1.20	71	1.20
5	56	0.20	65	0.22	60	1.24	70	1.25
6	60	0.19	71	0.21	61	1.20	76	1.30
7	59	0.21	73	0.25	61	1.31	79	1.32

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 64 Esfuerzos y deflexiones obtenidos con fibras lisas americanas de -
24 mm de largo, agua-cemento 0.45, grava-arena 40/60 y agregado max.
19 mm.

M E Z C L A	ESFUERZO EN kg/cm ²				DEFLEXION EN mm			
	PRIMERA GRIETA				ESFUERZO MAXIMO			
	EDAD EN DIAS				EDAD EN DIAS			
	28	∅	90	∅	38	∅	90	∅
TESTIGO	41	0.18	48	0.21	41	0.18	48	0.21
1	53	0.18	57	0.20	56	0.90	60	1.08
2	57	0.15	63	0.18	60	0.95	63	1.00
3	66	0.15	74	0.18	66	1.00	78	1.22
4	75	0.18	83	0.20	78	1.4	83	1.60
5	77	0.18	84	0.18	78	1.36	85	1.60
6	76	0.16	84	0.20	77	1.5	83	1.65
7	79	0.18	88	0.21	83	1.62	93	1.60

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLE 65 Esfuerzos y deflexiones obtenidos con fibras lisas americanas de 24mm de largo, agua-cemento 0.45, grava-arena 50/50 y agregado máx. 19 mm

M E Z C L A	ESFUERZO EN kg/cm ²				DEFLEXION EN mm			
	PRIMERA GRIETA				ESFUERZO MAXIMO			
	EDAD EN DIAS				EDAD EN DIAS			
	28	∅	90	∅	28	∅	90	∅
TESTIGO	38	0.15	45	0.18	38	0.15	45	0.18
1	50	0.18	53	0.21	53	0.65	57	0.70
2	54	0.20	60	0.22	58	0.60	61	0.72
3	58	0.18	66	0.20	60	0.80	69	0.85
4	65	0.20	75	0.20	70	1.20	77	1.20
5	71	0.16	75	0.20	69	1.18	77	1.20
6	68	0.20	77	0.18	70	0.98	79	1.00
7	69	0.18	80	0.20	72	1.35	86	1.20

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLE 66 Esfuerzos y deflexiones obtenidos con fibras lisas americanas de 24mm de largo, agua-cemento 0.55, grava-arena 30/70 y agregado máx. 19 mm

M E Z C L A	ESFUERZO EN kg/cm ²				DEFLEXION EN mm			
	PRIMERA GRIETA				ESFUERZO MAXIMO			
	EDAD EN DIAS				EDAD EN DIAS			
	28	∅	90	∅	28	∅	90	∅
TESTIGO	32	0.20	39	0.18	32	0.20	39	0.18
1	45	0.20	50	0.20	45	0.89	51	0.90
2	49	0.18	57	0.20	50	0.95	53	0.85
3	49	0.18	56	0.16	52	1.00	58	1.10
4	52	0.20	60	0.18	57	1.22	64	1.20
5	50	0.18	60	0.20	56	1.30	67	1.32
6	56	0.20	68	0.20	60	1.36	70	1.35
7	58	0.22	70	0.25	60	1.40	76	1.40

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 67. Esfuerzos y deflexiones obtenidos con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.55, grava-arena 40/60 y agregado máx. 19 mm

M E Z C L A	ESFUERZO EN kg/cm ²				DEFLEXION EN mm.			
	PRIMERA GRIETA				ESFUERZO MAXIMO			
	EDAD EN DIAS				EDAD EN DIAS			
	28	∅	90	∅	28	∅	90	∅
TESTIGO	36	0.18	41	0.21	36	0.18	41	0.21
1	48	0.20	49	0.18	50	0.80	52	0.75
2	51	0.18	56	0.18		0.92	59	0.83
3	51	0.17	60	0.20	--	0.95	60	0.96
4	55	0.18	68	0.20	58	1.20	73	1.10
5	55	0.20	68	0.22	58	1.35	73	1.35
6	58	0.21	70	0.20	64	1.36	73	1.40
7	60	0.20	73	0.18	63	1.51	80	1.48

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 68. Esfuerzos y deflexiones obtenidos con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.55, grava-arena 0/50 y agregado máx. 19 mm

M E Z C L A	ESFUERZO EN kg/cm ²				DEFLEXIONES EN mm			
	PRIMERA GRIETA				ESFUERZO MAXIMO			
	EDAD EN DIAS				EDAD EN DIAS			
	28	∅	90	∅	28	∅	90	∅
TESTIGO	30	0.17	39	0.18	30	0.17	39	0.18
1	43	0.20	50	0.21	46	0.75	50	0.70
2	50	0.18	55	0.20	50	0.90	55	0.85
3	47	0.19	56	0.22	50	0.85	57	0.92
4	50	0.20	63	0.18	55	1.00	68	0.96
5	50	0.18	63	0.18	58	1.30	65	1.20
6	54	0.20	70	0.18	60	1.28	70	1.25
7	57	0.17	68	0.18	60	1.32	78	1.21

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 69 Esfuerzos y deflexiones obtenidos con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.62, grava-arena 30/70 y agregado máx. 19 mm

M E Z C L A	ESFUERZO EN kg/cm ²				DEFLEXIONES EN mm			
	PRIMERA GRIETA				ESFUERZO MAXIMO			
	EDAD EN DIAS				EDAD EN DIAS			
	28	∅	90	∅	28	∅	90	∅
TESTIGO	24	0.18	36	0.21	24	0.18	36	0.21
1	30	0.20	40	0.20	30	0.55	40	0.45
2	36	0.21	45	0.18	36	0.50	48	0.45
3	38	0.20	45	0.18	38	0.64	48	0.50
4	48	0.22	50	0.20	50	0.60	55	0.61
5	48	0.18	56	0.21	52	0.78	57	0.82
6	47	0.20	60	0.20	54	0.84	60	0.80
7	52	0.18	65	0.20	56	0.91	70	0.86

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 70 Esfuerzos y deflexiones obtenidos con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.62, grava-arena 40/60 y agregado máx. 19 mm

M E Z C L A	ESFUERZO EN kg/cm ²				DEFLEXION EN mm			
	PRIMERA GRIETA				ESFUERZO MAXIMO			
	EDAD EN DIAS				EDAD EN DIAS			
	38	∅	90	∅	28	∅	90	∅
TESTIGO	26	0.21	36	0.20	26	0.21	36	0.20
1	32	0.20	40	0.20	32	0.60	40	0.57
2	40	0.18	45	0.20	40	0.55	47	0.60
3	43	0.20	48	0.18	45	0.60	50	0.56
4	44	0.22	53	0.18	48	0.75	57	0.81
5	50	0.22	51	0.18	54	0.83	63	0.80
6	55	0.18	65	0.18	58	0.78	70	0.80
7	54	0.21	66	0.20	61	0.92	78	0.86

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLE 71 Esfuerzo y deflexiones obtenidos con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.67 grava-arena 05/50 y agregado máx. 19 mm

M E Z C L A	ESFUERZO EN kg/cm^2				DEFLEXION EN mm			
	PRIMERA GRIETA				ESFUERZO MAXIMO			
	EDAD EN DIAS				EDAD EN DIAS			
	28	ϕ	90	ϕ	28	ϕ	90	ϕ
TESTIGO	15	0.73	30	0.20	25	0.23	30	0.20
1	28	0.73	36	0.21	28	0.66	36	0.58
2	38	0.25	42	0.20	38	0.74	42	0.81
3	40	0.20	46	0.18	42	0.84	48	0.78
4	46	0.23	51	0.18	50	0.96	57	0.85
5	48	0.20	57	0.21	54	1.00	64	1.04
6	55	0.22	62	0.18	60	1.18	67	1.10
7	50	0.20	67	0.20	60	1.20	78	1.08

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLE 72 Esfuerzo y deflexiones obtenidas con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.45, grava-arena 30/70 y agregado máx. 13 mm

M E Z C L A	ESFUERZO EN kg/cm^2				DEFLEXION EN mm			
	PRIMERA GRIETA				ESFUERZO MAXIMO			
	EDAD EN DIAS				EDAD EN DIAS			
	28	ϕ	90	ϕ	28	ϕ	90	ϕ
TESTIGO	31	0.25	40	0.20	31	0.25	40	0.20
1	43	0.22	47	0.21	43	0.76	48	0.75
2	48	0.20	51	0.18	53	0.81	60	0.78
3	50	0.20	54	0.20	56	0.80	59	0.82
4	49	0.18	65	0.20	51	0.74	68	0.70
5	51	0.21	63	0.18	63	0.93	70	0.95
6	55	0.25	68	0.23	60	0.98	72	0.89
7	60	0.20	70	0.21	63	1.10	75	0.95

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 73 Esfuerzos y deflexiones obtenidos con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.45, grava-arena 40/60 y agregado máx. 13 mm

M E Z C L A	ESFUERZO EN kg/cm ²				DEFLEXION EN mm			
	PRIMERA GRIETA				ESFUERZO MAXIMO			
	EDAD EN DIAS				EDAD EN DIAS			
	28	∅	90	∅	28	∅	90	∅
TESTIGO	38	0.30	43	0.25	38	0.3	43	0.25
1	50	0.31	53	0.25	54	0.86	57	0.88
2	55	0.30	60	0.20	58	0.93	63	0.90
3	58	0.25	70	0.21	63	1.21	73	1.00
4	70	0.25	78	0.22	74	1.20	80	1.03
5	72	0.20	80	0.18	74	1.32	81	1.10
6	74	0.20	80	0.21	76	1.26	80	1.00
7	75	0.22	83	0.18	80	1.36	88	1.22

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 74 Esfuerzos y deflexiones obtenidos con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.45, grava-arena 50/50, agregado máx. 13 mm

M E Z C L A	ESFUERZO EN kg/cm ²				DEFLEXION EN mm			
	PRIMERA GRIETA				ESFUERZO MAXIMO			
	EDAD EN DIAS				EDAD EN DIAS			
	28	∅	90	∅	28	∅	90	∅
TESTIGO	33	0.25	40	0.23	33	0.25	40	0.23
1	42	0.25	48	0.20	42	0.80	50	0.85
2	50	0.20	55	0.20	52	0.95	55	0.90
3	55	0.18	61	0.21	58	0.96	70	0.92
4	61	0.20	69	0.18	67	1.18	72	1.00
5	65	0.18	71	0.18	70	1.20	71	1.10
6	64	0.21	75	0.18	67	1.22	80	1.00
7	68	0.18	76	0.18	72	1.25	83	1.15

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

..... TABLA 73 Esfuerzos y deflexiones obtenidos con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.45, grava-arena 40/60 y agregado máx. 13 mm

M E Z C L A	ESFUERZO EN kg/cm ²				DEFLEXION EN mm			
	PRIMERA GRIETA				ESFUERZO MAXIMO			
	EDAD EN DIAS				EDAD EN DIAS			
	28	∅	90	∅	26	∅	90	∅
TESTIGO	38	0.30	43	0.25	38	0.3	43	0.25
1	50	0.31	53	0.25	54	0.86	57	0.88
2	55	0.30	60	0.20	58	0.93	63	0.90
3	58	0.25	70	0.21	63	1.21	73	1.00
4	70	0.25	78	0.22	74	1.20	80	1.03
5	72	0.20	80	0.18	74	1.32	81	1.10
6	74	0.20	80	0.21	76	1.26	80	1.00
7	75	0.22	83	0.18	80	1.36	88	1.22

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 74 Esfuerzos y deflexiones obtenidos con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.45, grava-arena 50/50, agregado máx. 13 mm

M E Z C L A	ESFUERZO EN kg/cm ²				DEFLEXION EN mm			
	PRIMERA GRIETA				ESFUERZO MAXIMO			
	EDAD EN DIAS				EDAD EN DIAS			
	28	∅	90	∅	28	∅	90	∅
TESTIGO	33	0.25	40	0.23	33	0.25	40	0.23
1	42	0.25	48	0.20	42	0.80	50	0.85
2	50	0.20	55	0.20	52	0.95	55	0.90
3	55	0.18	61	0.21	58	0.96	70	0.92
4	61	0.20	69	0.18	67	1.18	72	1.00
5	65	0.18	71	0.18	70	1.20	71	1.10
6	64	0.21	75	0.18	67	1.22	80	1.00
7	68	0.18	76	0.18	72	1.25	83	1.15

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLE 75 Esfuerzos y deflexiones obtenidos con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.55, grava-arena 30/70 y agregado máx. 13 mm

M E Z C L A	ESFUERZO EN kg/cm ²				DEFLEXION EN mm			
	PRIMERA GRIETA				ESFUERZO MAXIMO			
	EDAD EN DIAS				EDAD EN DIAS			
	28	∕	90	∕	28	∕	90	∕
TESTIGO	30	0.28	39	0.28	30	0.28	39	0.28
1	40	0.30	43	0.25	40	0.66	43	0.70
2	49	0.28	50	0.25	50	0.75	50	0.70
3	51	0.25	56	0.20	50	0.80	55	0.73
4	50	0.23	58	0.20	54	0.91	62	0.84
5	48	0.20	62	0.18	53	0.94	66	0.82
6	57	0.21	63	0.20	61	1.00	67	0.92
7	60	0.22	66	0.18	61	1.04	74	0.96

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLE 76 Esfuerzos y deflexiones obtenidos con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.55, grava-arena 40/60 y agregado máx. 13 mm

M E Z C L A	ESFUERZO EN kg/cm ²				DEFLEXION EN mm			
	PRIMERA GRIETA				ESFUERZO MAXIMO			
	EDAD EN DIAS				EDAD EN DIAS			
	28	∕	90	∕	28	∕	90	∕
TESTIGO	26	0.31	33	0.28	26	0.31	33	0.28
1	40	0.28	44	0.28	40	0.74	44	0.66
2	42	0.28	48	0.25	46	0.85	50	0.73
3	44	0.26	51	0.23	50	0.86	54	0.70
4	46	0.25	58	0.20	51	0.93	60	1.00
5	46	0.70	60	0.20	53	1.22	61	1.00
6	55	0.22	68	0.20	58	1.28	65	1.10
7	57	0.20	68	0.20	61	1.31	73	1.15

NOTA: cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 77 Esfuerzos y deflexiones obtenidos con fibras lisas Americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.55, grava-arena 50/50 y agregado máx. 13 mm

M E Z C L A	ESFUERZO EN kg/cm ²				DEFLEXION EN mm			
	PRIMERA GRIETA				ESFUERZO MAXIMO			
	EDAD EN DIAS				EDAD EN DIAS			
	28	∅	90	∅	28	∅	90	∅
TESTIGO	25	0.20	40	0.20	25	0.20	40	0.20
1	40	0.25	43	0.18	41	0.54	46	0.50
2	45	0.20	51	0.18	47	0.63	50	0.68
3	40	0.18	56	0.18	45	0.71	57	0.65
4	50	0.20	60	0.18	55	0.83	62	0.66
5	51	0.28	63	0.23	60	0.96	53	0.87
6	53	0.18	66	0.20	58	0.97	67	1.00
7	58	0.18	66	0.18	60	1.10	75	1.00

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 78 Esfuerzos y deflexiones obtenidos con fibras lisas Americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.62, grava-arena 70/30 y agregado máx. 13 mm

M E Z C L A	ESFUERZO EN kg/cm ²				DEFLEXION EN mm			
	PRIMERA GRIETA				ESFUERZO MAXIMO			
	EDAD EN DIAS				EDAD EN DIAS			
	28		90		28		90	
TESTIGO	20	0.33	35	0.28	20	0.33	35	0.28
1	25	0.29	36	0.30	25	0.78	36	0.69
2	30	0.30	41	0.27	32	0.71	44	0.70
3	38	0.28	42	0.25	38	0.83	46	0.75
4	45	0.26	50	0.26	48	0.90	52	0.86
5	48	0.21	52	0.20	48	0.90	53	0.93
6	48	0.18	55	0.20	50	1.08	56	1.00
7	53	0.23	61	0.18	54	1.2	58	1.00

NOTA: Cada resultado representará el promedio de 2 especímenes.

TABLA 79 Esfuerzos y deflexiones obtenidos con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.62, grava-arena 40/60 y agregado máx. 13 mm

M E Z C L A	ESFUERZO EN kg/cm ²				DEFLEXION EN mm			
	PRIMERA GRIETA				ESFUERZO MAXIMO			
	EDAD EN DIAS				EDAD EN DIAS			
	28	∅	90	∅	28	∅	90	∅
TESTIGO	20	0.25	28	0.30	20	0.25	28	0.30
1	25	0.28	36	0.21	25	0.73	36	0.65
2	31	0.21	40	0.25	36	0.84	45	0.80
3	40	0.20	45	0.18	40	0.95	46	0.82
4	42	0.22	50	0.24	45	0.96	51	0.90
5	48	0.18	56	0.20	50	0.98	60	1.00
6	50	0.22	61	0.18	56	1.10	68	0.98
7	57	0.25	63	0.21	60	1.21	76	1.10

NOTA : Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 80 Esfuerzos y deflexiones obtenidos con fibras lisas americanas de 24 mm de largo, agua-cemento 0.62, grava-arena 50/50 y agregado máx. 13 mm

M E Z C L A	ESFUERZO EN kg/cm ²				DEFLEXION EN mm			
	PRIMERA GRIETA				ESFUERZO MAXIMO			
	EDAD EN DIAS				EDAD EN DIAS			
	28	∅	90	∅	28	∅	90	∅
TESTIGO	27	0.28	36	0.26	27	0.28	36	0.26
1	38	0.30	40	0.25	40	0.48	42	0.51
2	42	0.28	45	0.26	43	0.53	48	0.50
3	48	0.25	50	0.18	50	0.63	57	0.49
4	50	0.24	57	0.22	52	0.81	60	0.58
5	49	0.30	60	0.18	60	0.77	65	0.82
6	50	0.25	65	0.20	60	0.85	70	0.70
7	55	0.26	68	0.24	63	1.10	71	0.91

NOTA: Cada resultado representa el promedio de 2 especímenes.

TABLA 81.- Esfuerzo máximo a flexión obtenido a 28 días de edad en laboratorio. Relación agua - cemento 0.45 grava-arena 30/70 y tamaño máximo de agregado grueso 19 mm.

M E T C L A	ESFUERZO EN Kg/cm ²			
	FIBRAS LISAS			PGTL *
	18 mm	24 mm	28 mm	25 mm
TESTIGO	36	36	37	37.4
1	51	50	48	55
2	58	57	52	59
3	58	55	57	63
4	60	59	60	62
5	62	60	58	61
6	60	63	59	56
7	62	61	57	56

Comparativa de resultados con los obtenidos en pruebas realizadas en el extranjero.

* Pruebas General Testing Laboratories Inc. Mitchell Fibercon Inc.

Tabla 82 Resultados de pruebas de Laboratorio con fibras aliva de 24 mm, agua- cemento 0.40, grava - arena 30/70 con tenido de fibras 60 kg/m³.

Propiedades	R e s u l t a d o s .	
	7 días (Kg/cm ²)	28 días (Kg/cm ²)
Esfuerzos a Compresión.	426.24	491.58
	427.20	510.87
	378.31	513.93
Esfuerzos a Flexión Primera Grieta.	43.84	57.10
	40.78	55.06
	41.78	65.26
Esfuerzo ultimo a flexión.	43.84	57.10
	40.78	55.06
	41.78	65.26

* Fuente: Hardy BBT Limited
Evaluation of Aliva Steel Fibre in Shot crete.

Tabla 83 Resultados de pruebas de laboratorio con Fibras Aliva de 24mm, agua-cemento 0.40, grava-arena 30/70, contenido de fibras 75 Kg/m³.

Propiedades	R e s u l t a d o s	
	7 días (Kg/cm ²)	28 días (Kg/cm ²)
Esfuerzos a compresión.	357.92	438.47
	337.52	455.81
	380.35	440.51
Esfuerzo a flexión Primera grieta.	46.90	63.22
	44.86	66.28
	47.92	60.16
Esfuerzo último a flexión.	46.90	63.22
	44.96	66.28
	47.92	60.16

* Fuente: Hardy BBT Limited
Evaluation of Aliva Steel Fibre in Shotcrete.

Tabla 84 Tabla comparativa de resultados obtenidos con mezclas reforzadas con fibras de acero en distintas obras.

Propiedad	Atlanta Peach Tree Centre Tunnels.	British Columbia Tunnels	Stanford Linear Collider Tunnels	Spirit Lake Tunnels.
Esfuerzo Compresión. (Kg/cm ²) 28 días	281.44	356.90	281.44	316.11
Esfuerzo a flexión. 8 horas	no esp.	no esp.	14.06	19.20
3 días	no esp.	no esp.	28.12	32.66
28 días.	no esp.	no esp.	56.24	59.44
Cemento	Tipo 1 390 Kg/m ³	Tipo 1 459 Kg/m ³	Tipo 1 445 Kg/m ³	Tipo 1 414 Kg/m ³
Fibras	71 Kg/m ³	59 Kg/m ³	47 Kg/m ³	59 Kg/m ³
Tipo	Fibra Lisa Americana.	Bekaert	Fibercon	Bekaert.

*Fuente: Tunnels and tunnelling may 1988

Don Rose, Consulting Engineer, San Francisco California.

Tabla 85. Comparativo de resultados ensayados por Mitchell Fibercon Inc. de proporcionamiento y resistencias de una mezcla -- convencional y una Mezcla Fibrosa.

M A T E R I A L	MEZCLA FIBROSA	MEZCLA CONVENCIONAL
Cemento	446 Kg/m ³	446 Kg/m ³
Arena	1: 4.75	1: 4.75
Fibra de acero	Fibercon	- - -
Dimensión de Fibra	25 X 0.25 X 0.56 mm	- - -
Cantidad de Fibra	107 Kg/m ³	- - -
Acelerante	13.3 Kg	13.3 Kg
Rel. Agua-cemento	0.40	0.40
Resistencia a flexión		
28 días.	55 Kg/cm ²	37.4 Kg/cm ²
90 días.	89 Kg/cm ²	45.8 Kg/cm ²
Resistencia a compresión		
28 días	410 Kg/cm ²	253 Kg/cm ²
90 días	452 Kg/cm ²	320 Kg/cm ²

Tabla 86. Medidas de tendencia central de los resultados obtenidos de esfuerzos a flexión en Kg/cm². (medida, varianza y desviación estandar).
Fibras lisas de 24 mm. de longitud TMA=19 mm.

Relación: A/C	Relación Grava-Arena	Media	Varianza	Desv. Estand.
0.45	30/70	57.86	18.81	4.34
	40/60	71.14	108.14	10.40
	50/50	64.57	55.29	7.44
0.55	30/70	54.29	30.9	5.56
	40/60	57.29	26.9	5.19
	50/50	54.14	30.81	5.55
0.62	30/70	45.14	105.14	10.25
	40/60	48.29	105.57	10.27
	50/50	47.45	143.62	11.98

Tabla 87. Medidas de tendencia central de los resultados obtenidos de esfuerzos a flexión en Kg/cm². (medida, \bar{x} , variancia, y desviación estandar).
Fibras lisas de 28 mm. de longitud TMA-19 mm.

Relación: A/C	Relación Grava-Arena	Media	Varianza	Desv. Estand
0.45	30/70	55.86	18.48	4.30
	40/60	59.57	47.62	6.90
	50/50	57.14	33.48	5.79
0.55	30/70	56.71	35.57	5.96
	40/60	56.29	39.24	6.26
	50/50	50.86	37.48	6.12
0.62	30/70	45.71	38.24	6.18
	40/60	49.14	60.81	7.80
	50/50	47.57	66.62	8.16

Tabla 88. Medidas de tendencia central de los resultados obtenidos de esfuerzos a flexión en Kg/cm^2 . (media, variancia y desviación estandar).
Fibras lisas de 24 mm. TMA=15mm.

Relación A/C	Relación Grava-Arena	Media	Varianza	Desv. Estand.
0.45	30/70	55.57	52.62	7.25
	40/60	68.43	99.95	10.00
	50/50	61.14	120.81	10.99
0.55	30/70	52.51	52.57	7.25
	40/60	51.29	49.90	7.06
	50/50	57.86	39.48	6.28
0.62	30/70	42.14	114.14	10.68
	40/60	44.57	145.95	12.08
	50/50	52.57	79.29	8.9

Tabla 89. Medidas de tendencia central de los resultados obtenidos de esfuerzos a flexión en Kg/cm^2 . (medida, varianza y desviación estándar)
Fibras lisas de 28 mm. TMA=15mm.

Relación A/C	Relación Grava-Arena	Media	Varianza	Desv. Estand
0.45	30/70	47.57	27.95	5.29
	40/60	65.33	29.87	5.47
	50/50	52.86	75.14	8.67
0.55	30/70	51.77	49.86	7.06
	40/60	52.86	54.81	7.40
	50/50	54.00	33.00	5.74
0.62	30/70	41.71	90.24	9.50
	40/60	38.86	101.48	10.07
	50/50	48.43	47.95	6.97

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Anderson, G.L., and Smelser, T.W., "Development Testing and Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete Mine -- Support Members". Report No. RI-8412, U.S. Bureau of -- Mines, Washington, D.C., 1980.
2. Bajon, R.L., "Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete With Aggregate". MS Thesis, Clarkson College of -- Technonology, Potsdam, N.Y., May. 1984.
3. Birkimer, D.L., and Hossley, J.R., "Comparison of Static and Dynamic Behavior of Plain and Fibrous Reinforced Concrete Cylinders". Technical Report No. 4-69, U.S. Corps of Engineers Ohio River Division Laboratories, Cincinnati, Dec. 1969. 91 p.
4. Blood, G.W., "Properties of Fiber Reinforced Concrete". MS Thesis, The University of Calgary, Alberta July 1970.
5. Colin, D.J., and Coleman, R.A., "Strength and Deformation of Steel Fiber Reinforced Mortar in Uniaxial Tension". Fiber Reinforced Concrete, DP-44 American Concrete Institute, Detroit, 1974. pp 177-207.

6. Cook, D.J., and Uher, C., "The Thermal Conductivity of - Fibre-Reinforced Concrete". Cement and Concrete Research, V. 4 No. 4, July 1974. pp 497-509.
7. Corwine, W.J., "Concreto Lanzado Reforzado con Fibras de Acero" Revista INCYC, Vol. 23, No. 172, Agosto 1985 pp 43 48.
8. Edgington, J., "Economic Fibrous Concrete". presented at the Institution of Civil Engineers, Conference, "Fibre - Reinforced Materials: Desing and Engineering Applications" Londo, England, March 1977.
9. Edington, J.; Hannant, D.J.; and Williams, R.I.T., "Steel Fibre Reinforced Concrete". Corrent Paper No. CP69/74. Building Research Establishment, Garston, Watford, 1974-17 p.
10. "Fiber Reinforced Asphaltic Concrete. A Preliminary Study". Informe preparado en Woods Engineering Consulting, - Inc. Longwood, Florida, para Mitchell Fibercon, Inc. - - Pittsburgh, Pennsylvania.
11. "Fibrecrete for swinnubg oiiks., Ubfire de Australian Buil ding Systems Appraisal Council Ltd., June 1983.

6. Cook, D.J., and Uher, C., "The Thermal Conductivity of - Fibre-Reinforced Concrete". Cement and Concrete Research, V. 4 No. 4, July 1974. pp 497-509.
7. Corwine, W.J., "Concrete Lanzado Reforzado con Fibras de Acero" Revista IMCYC, Vol. 23, No. 172, Agosto 1985 pp 43 48.
8. Edgington, J., "Economic Fibrous Concrete". presented at the Institution of Civil Engineers, Conference, "Fibre - Reinforced Materials: Desing and Engineering Applications" Londo, England, March 1977.
9. Edington, J.; Hannant, D.J.; and Williams, R.I.T., "Steel Fibre Reinforced Concrete". Corrent Paper No. CP69/74. Building Research Establishment, Garston, Watford, 1974-17 p.
10. "Fiber Reinforced Asphaltic Concrete. A Preliminary Study". Informe preparado en Woods Engineering Consulting, - Inc. Longwood, Florida, para Mitchell Fibercon, Inc. - - Pittsburgh, Pennsylvania.
11. "Fibrecrete for swimmubg ooliks., Ubfire de Australian Buil ding Systems Appraisal Council Ltd., June 1983.

12. "Fibrecrete Proves Its Durability in Road Construction"
Fibrestell Factsource, Vol. 1 No. 2, October 1986.
13. "Fibresteel Hastens Industrial Development Completion"-
Fibresteel Factsource, Vol. 2, No. 3, August 1987.
14. "Fibresteel Overlay for Wang Computer Floor".
Fibresteel Factsource, Vol. 2, No. 2, May 1987.
15. Frazier, P. Jn., "Steel Fibrous Concrete For Airport -
Pavement Applications". Army Engineer Waterways Exper-
iment Station, Federal Aviation Administration, U.S.A.
No.v. 1974.
16. Gray, B.H., "Fiber Reinforced Concrete Pavement Perfor-
mance Investigation". Construction Engineers Research -
Laboratoy, U.S. Army Corps of Engineers, Champaign, -
Illinois, 1978.
17. Gray, B.H., "Fiber Reinforced Concrete: A General Dis -
cussion of field Problems and Applications". Construc -
tion Engineering Resarch laboratory, D.S. Army Corps of
Engineers, Technical Manuscript M-12, April 1972.
18. Hanna, A.N., "Flexural Strength of "Fibercon" Steel Fi-
ber Reinforced concrete". Construction Technology Labo-
ratories, Skokie, Illinois, April 1984. 9 P.

19. Hannant, D.J., "Fibre Cements and Fibre Concretes". A - Wiley - Interscience Publication, 1978. 209 P.
20. Henager, C.H., "A new wrinkle - Shotcrete Containing - Steel Fibres". Concrete Construction, August 1975.
21. Henager, C.H., "Desing of fibrous Shotcrete for ground-support". Battelle Development Corporation, (articulo - de Michelle Fibercon Stelle Fibers) 22 P.
22. Henager, C.H., "the Techonology and uses of Steel Fibrous Shotcrete - A state of the Art Report". Battelle - Northwest, September 20, 1977, 59 P.
23. Kaden, R.A., "Fibrous Shotcrete and Selected Structural - Applications". presented at the World of Concrete Fiber - Reinforced Concrete Seminar, Las Vegas, January 1976.
24. Kaden, R.A., "Slope Stabilized With Steel Fibrous Shot -- crete". Western Construction, April 1974.
25. Kaden, R.A., "Steel Fibrous Shotcrete". Corps of Eng. - Walle Walle, Wash., West Constr. Vol. 49 No. 4, Apr. 1974 pp 29-30-50.

26. Kesler, C.E. and Halvorsen, G.T., "Fiber Reinforced Concrete-Workable and Economical". The Military Engineer, -
Vo. 71, No. 462, July-Aug., 1979. pp 234-237.

27. Lankard, D.R., et al., "Field Experiences With Steel Fibrous Concrete". presented at meeting of American Ceramic Society, Chicago, 11, April 26, 1971.

28. Lankard D.R. and Walker A.J., "Laboratory and Field Investigations of the durability of Wire and Concrete Exposed to Various Service Environments". Battelle Development Corporation, Columbus, Ohio, June 28, 1978. 26 p.

29. "Long Term Saltwater Corrosion Test on fibrous Concrete Beams". May 1981, Ap. (Articulo de AWI Fibresteel).

30. Mahar, J.W., et al., "Shotcrete Practice in Underground Construction". Report No. FRA OR& D 75-90, Department -
of transportation, Federal Railroad Administration, - -
August 1975.

31. Mahar, J.W., "Strength Test Results on Conventional and Steel Fiber And Mesh Reinforced Shotcrete". United - -
States Steel Corporation, Pittsburg, Pennsylvania, March
25, 1976. 13 p.

32. "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete"
Reported by ACI Committee 544, ACI Journal, July 1978.

33. Opsahl, O.A., "Use of Wet-Process Steel-Fibrous Shotcrete
in Tunnel Linings". Royal Norwegian Council for Scientific
and Industrial Research. 11 P.

34. Opsahl, O.A., "Steel Fiber Reinforced Shotcrete for Rock
Support". Royal Norwegian Council for Scientific and Industrial
Research, Oslo, September 1982. 33 p.

35. Opsahl, O.A., "Wet-Process Steel-Fibrous Shotcrete in
Norway a Brief Summary". Principal Research Engineer.
A.S. Hoyer Ellefsen-Norway 11 p.

36. Palmer, D., "Developments in Sprayde Concrete techniques"
Tennels and Tunnelling, July 1976.

37. Parker, H.W., et al., "Field-Oriented Investigation of
Conventional and Experimental Shotcrete for tennels."
Report No. FRA-ORD-76-06, Department of Transportation -
Federal Railroad Administration, August 1975.

38. Poad, M.E. and Serbousek, M.O., "Engineering Properties
of Shotcrete". N.S. Bureau of Mines Spolane, W.A. Paper
presented at North American Rapid Excavation and tunnelling
conference, Chicago, il. June 1972.

39. Podolny, W. Jr., "Properties of Fiber-Reinforced Concrete". Structural Engineer Bridge Division Washington, D.C. 21 p. (Articulo de Mitchell Fibercon, Inc.).
40. Rice, J.L., "Pavement Design Considerations". Construction Engineering Research Laboratory, U.S. Army Corps of Engineers, Champaign, Illinois, May 1972.
41. Romualdi, J.p., and Mandel J.A., "Tensile Strength of Concrete affected by Uniformly Distributed and Closely - - - Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement. Journal of the ACI, Vol. 61, Title No. 61-38, June 1964.
42. Rose, D., "Linner Introduced in Resarch Tenna" CONCRETE, September 1986.
43. Shah, S.P., and Naaman, A.E., "Mechanical Properties of -- Glass and Steel Fiber Reinforced Mortar". ACI Journal. Proceedings V. 73, No. 1, June 1976, pp 50-53. Also Report No. 75-1, University of Illinois at Chicago Circle.
44. Shroff, J.K., "The Effect of a Corrosive Environment on - the Properties of Steel Fiber Reinforced Portland Cement - Mortar". MS Thesis, Clarkson College of Technology Pots - dan, N.Y., September 1966.

45. Snyder, J.J., and Lanlard, D.R., "Factors Affecting Cracking Strength of Steel Fibrous Concrete".
ACI Journal, Proceedings Vol. 69, No. 2, Feb. 1972. pp. 96-100.
46. "Steel Fibre in Gunite, an appraisal". Tunnels and Tunneling, July 1975.
47. "Steel Fibre Reinforced Concrete Incorporating Enlarged - end Steel Fibre". AMI Fibresteel 1978.
48. Sutcliffe, H., M.C. Clure Cr., "Large Aggregate Shotcrete Challenges steel Ribs as a Tunnel Support". Bechtel - Inc. San Fco. Calif. Civ. Eng. (NY) Vol. 39 No. 11, No. - 1969, pp 5-57
49. "Technical Manual" Fibrecrete Properties, Pavement Design, november 1981, 49 p. (Información Técnica de AMI - FIBRESTEEL).
50. "Trackfast-Built on Fibresteel". Fibresteel Factusource, - Vo.. 2, No. 1 February 1987.
51. Venmesland, O., "Investigation of the Shotcrete used in - the Karsto Tunnel". Consulting Engineers, Noteby Norsk - - Teknisk Byggekontroll A/S, June 20, 1986. 26 p.

52. Weidler, J.B., Jr., "Strength Characteristics of Mortar Containing Fibrous Reinforcement". MS thesis, Rice - - University, Houston, TX, April 1961.

53. Wooldridge, J.F., and Easton, J.A., Development of tests for Stainless Steel Fiber Reinforced Castable Refractories". Industrial Heating, Apr. 1978, pp 44-46.

54. Zollo, R.F., "Fibrous Concrete Flexural Testing Developing Standardized Techniques". ACI Journal Proceedings - V. 77, No. 5, Sep-Oct. 1980, pp 363-368.