



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL – CONSTRUCCIÓN

**ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS CORTAS DE  
ACERO Y MACROFIBRAS DE POLIPROPILENO: INFLUENCIA DEL TIPO Y CONSUMO DE  
FIBRA ADICIONADO.**

**TESIS**  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

PRESENTA:  
**JORGE LÓPEZ ROMAN**

TUTOR PRINCIPAL:  
**M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO, INSTITUTO DE INGENIERÍA**

MÉXICO, D. F. ABRIL 2015



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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 esta 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.

## **JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Aire Untiveros Carlos Máximo

Secretario: M.I. Mendoza Rosas Marco Tulio

Vocal: M.I. Mendoza Escobedo Carlos Javier

1<sup>er</sup>. Suplente: Ing. Cottier Caviedes Juan Luis

2<sup>do</sup>. Suplente: M.I. Candelas Ramírez Luis

Lugar donde se realizó la tesis:

**INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM**

**TUTOR DE TESIS:**

-----  
**M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO**

## **ESTE TRABAJO ESTÁ DEDICADO:**

A DIOS:

Por darme la oportunidad de realizarme profesionalmente y concluir una etapa importante en mi vida, como lo es obtener el grado de Maestro en Ingeniería.

A MIS PADRES:

**ALICIA ROMAN GARCÍA Y PEDRO LÓPEZ COCA**

Por el gran cariño, respeto y admiración que les profeso, y como testimonio de mi gratitud por su amor, apoyo y estímulo a lo largo de mi vida.

A MI HERMANA:

**ROCÍO MELISA**

Por brindarme todo lo que tiene a su alcance, por su confianza y apoyo incondicional.

A MIS SOBRINOS:

**ESTEPHANI Y JOSHET ADÁN**

A MI COMPAÑERA:

**MIRIAM MARCIAL MORENO**

Por los años de convivencia, gracias por las continuas muestras de ánimo, apoyo incondicional y por compartir tanto buenos como malos momentos.

A MI TUTOR Y DIRECTOR DE TESIS:

**M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO**

Por su dedicación, disponibilidad y paciencia en la revisión de esta tesis, por su apoyo brindado para que fuera posible esta investigación y por su ayuda para lograr mi permanencia en el Posgrado y en el Instituto de Ingeniería.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer primeramente a Dios por haberme permitido llegar a esta etapa de mi existencia, gracias por darme la vida y la mano en esos momentos difíciles.

A mi director de tesis, el M.I. Carlos Javier Mendoza Escobedo gracias por la confianza que ha depositado en mí para realizar este proyecto, por su paciencia, buen trato y por estar siempre pendiente de mi trayectoria como estudiante.

Debo hacer mención al Dr. Carlos Aire Untiveros, por su ayuda y apoyo tanto técnico como moral otorgado durante el desarrollo experimental del proyecto.

A mis amigos, colegas y compañeros de trabajo del Instituto de Ingeniería-UNAM, que me apoyaron durante todo o parte del tiempo dedicado a la elaboración de este proyecto de investigación, así como al personal técnico del laboratorio de estructuras y materiales "IINGEN-UNAM".

Como olvidarme de la Mtra. Virginia Corral, del Coordinador del Posgrado en Ingeniería el Dr. Luis A. Álvarez-Icaza y de los profesores que compartieron sus conocimientos y su apoyo incondicional desde el inicio y termino de la maestría.

Agradezco a mis padres Alicia y Pedro, porque sin escatimar esfuerzo alguno han sacrificado gran parte de su vida para mi formación humana y profesional, por esos consejos sabios, por brindarme su amor, comprensión, confianza y por su apoyo en los momentos difíciles.

A mi Alma Mater la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Ingeniería y al Posgrado de Ingeniería, gracias por haberme hecho participe de ella, al Instituto de Ingeniería de la UNAM y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico que me brindó y por la oportunidad de pertenecer a su comunidad.

De todo corazón, a todos, Muchas Gracias.

Jorge López R.  
ABRIL 2015.

# ÍNDICE

ÍNDICE.....	III
RESUMEN .....	1
PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN .....	2
JUSTIFICACIÓN Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN .....	4
<b>1. ESTADO DEL ARTE DE LOS CONCRETOS REFORZADOS CON FIBRA .....</b>	<b>6</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	6
1.2 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS CONCRETOS REFORZADOS CON FIBRAS .....	6
1.2.1 Antecedentes .....	6
1.2.2 Primeras experiencias.....	7
1.2.3 Actualidad .....	8
1.3 CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS (CRF).....	9
1.3.1 Definición .....	9
1.3.2 Componentes del CRF: requerimientos y recomendaciones .....	9
1.4 PROPIEDADES DEL CRF .....	12
1.4.1 Influencia de las fibras en las propiedades del concreto .....	13
1.5 BREVE RESEÑA DE LA APLICACIÓN DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS EN LA INGENIERÍA CIVIL .....	16
1.6 NORMATIVAS EXISTENTES REFERENTES AL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS.....	21
<b>2. LAS FIBRAS EN LA CONSTRUCCIÓN: ASPECTOS FUNDAMENTALES.....</b>	<b>22</b>
2.1 GENERALIDADES.....	22
2.2 DESCRIPCIÓN DE LAS FIBRAS .....	23
2.3 CLASIFICACIÓN DE LAS FIBRAS.....	23
2.3.1 Fibras de acero .....	25
2.3.2 Fibras de polipropileno .....	28
2.4 ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LA TEORÍA DE LAS FIBRAS EMPLEADAS PARA REFUERZO EN EL CONCRETO.....	31
2.4.1 Longitud Crítica de la Fibra.....	33
2.4.2 Eficiencia de las Fibras (S) .....	34
2.4.3 Fracción de Volumen de Refuerzo ( $V_f$ ).....	36
2.4.4 Superficie Específica ( $S_e$ ).....	37
2.5 ASPECTOS RELACIONADOS CON EL DISEÑO ESTRUCTURAL.....	37
2.5.1 Consideraciones de diseño para el empleo de fibras como refuerzo en el concreto .....	37
2.5.2 Propiedades mecánicas utilizadas en el diseño.....	39
2.5.3 Efecto de la relación de aspecto de la fibra sobre la ductilidad del concreto .....	40

<b>3. PRIMERA FASE DE LA INVESTIGACIÓN: CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN EL ESTUDIO .....</b>	<b>41</b>
3.1 CEMENTO .....	41
3.2 AGREGADOS .....	42
3.2.1 Agregado grueso .....	42
3.2.2 Agregado fino .....	45
3.3 AGUA.....	48
3.4 ADITIVO .....	48
3.5 FIBRA CORTA DE ACERO Y MACROFIBRA DE POLIPROPILENO.....	48
<b>4. SEGUNDA FASE DE LA INVESTIGACIÓN: DISEÑO Y ELABORACIÓN DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO Y MACROFIBRAS DE POLIPROPILENO .....</b>	<b>50</b>
4.1 DISEÑO DE LA MEZCLA DE CONCRETO .....	50
4.1.1 Elección de las características de la mezcla .....	51
4.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS ESTUDIADAS.....	51
4.2.1 Dosificación de las fibras de acero y de polipropileno.....	52
4.3 SECUENCIA DE MEZCLADO .....	53
4.4 FABRICACIÓN Y CURADO DE LOS ESPECÍMENES .....	54
4.5 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	55
<b>5. TERCERA FASE DE LA INVESTIGACIÓN: PRUEBAS DE LABORATORIO A REALIZAR.....</b>	<b>58</b>
5.1 CONSIDERACIONES .....	58
5.2 CONCRETO EN ESTADO FRESCO.....	58
5.2.1 Revenimiento.....	59
5.2.2 Contenido de aire y peso volumétrico .....	60
5.2.3 Cono invertido.....	60
5.2.4 Índice de agrietamiento por contracción plástica .....	62
5.3 CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO.....	64
5.3.1 Resistencia a compresión.....	64
5.3.2 Módulo de elasticidad y relación de Poisson .....	65
5.3.3 Resistencia a tensión por compresión diametral .....	67
5.3.4 Resistencia a cortante.....	68
5.3.5 Resistencia a la abrasión .....	69
5.3.6 Resistencia al impacto .....	71
5.3.7 Permeabilidad al agua .....	72
5.3.8 Tenacidad.....	74
5.3.9 Contracción por secado .....	75
5.3.10 Flujo plástico (CREEP) .....	77

<b>6. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS.....</b>	<b>79</b>
6.1 PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO .....	79
6.1.1 Revenimiento .....	79
6.1.2 Peso volumétrico, contenido de aire atrapado y cono invertido .....	81
6.1.3 Contracción plástica.....	83
6.2 PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO .....	85
6.2.1 Resistencia a compresión.....	85
6.2.2 Módulo de elasticidad, relación de Poisson y deformación unitaria máxima .....	87
6.2.3 Resistencia a tensión .....	91
6.2.4 Resistencia a cortante.....	93
6.2.5 Resistencia a la abrasión .....	95
6.2.6 Resistencia al impacto .....	97
6.2.7 Permeabilidad al agua .....	99
6.2.8 Tenacidad.....	102
6.2.9 Contracción por secado .....	106
6.2.10 Flujo plástico (CREEP) .....	109
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>114</b>
<b>PROSPECTIVAS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>117</b>
<b>LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>117</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>118</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>120</b>
ANEXO 1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO (CALIZA 3/8") .....	120
ANEXO 2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO (ARENA ANDESÍTICA)...	123
ANEXO 3. RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGREGADO GRUESO (GRAVA CALIZA 3/8") Y AGREGADO FINO (ARENA ANDESÍTICA) .....	126
ANEXO 4. PÉRDIDA POR LAVADO, MATERIAL QUE PASA POR LA MALLA No. 200 .....	128
ANEXO 5. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ADITIVO POZZOLITH 322N .....	129
ANEXO 6. FICHAS TÉCNICAS DE LA FIBRA CORTA DE ACERO Y MACROFIBRA DE POLIPROPILENO .....	130
ANEXO 7. VALORES DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LAS MEZCLAS ESTUDIADAS .....	132
ANEXO 8. VALORES DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD, RELACIÓN DE POISSON Y DEFORMACIÓN UNITARIA MÁXIMA .....	135
ANEXO 9. RESISTENCIA A TENSIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL (PRUEBA BRASILEÑA).....	136
ANEXO 10. RESISTENCIA AL CORTANTE .....	138
ANEXO 11. EJEMPLO PARA LA OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA ABRASIÓN .....	139
ANEXO 12. EJEMPLO PARA CALCULAR LA PERMEABILIDAD AL AGUA CON EL EQUIPO GWT-4000 .....	140
ANEXO 13. RESULTADOS INDIVIDUALES DE LAS PRUEBAS DE TENACIDAD ASTM C 1609.....	141

## RESUMEN

En el presente trabajo se evalúa mediante los resultados obtenidos de un estudio experimental la influencia que tiene dos tipos particulares de fibras, fibras cortas de acero y macrofibras de polipropileno, en las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto, cuando dichas fibras se emplean en diferentes porcentajes volumétricos iguales o menores al 1% en mezclas de concreto fabricadas con agregados traídos del Edo de México y del Edo de Hidalgo.

El estudio comprende la fabricación de mezclas de concreto con agregado grueso de origen calizo de 3/8" de tamaño máximo, arena andesítica, cemento Portland compuesto resistente a los sulfatos (CPC 40 RS), fibra de acero DRAMIX (RC 65/35 BN) y macrofibra de polipropileno (MAC Matriz). En total se fabricaron ocho mezclas; una sin fibra (mezcla testigo o de referencia), tres con fibras cortas de acero para porcentajes volumétricos de 0.5, 0.75 y 1.0% (0, 40, 60 y 80 kg/m<sup>3</sup>) y cuatro con macrofibras de polipropileno para porcentajes volumétricos de 0.25, 0.5, 0.75 y 1.0% (2.3, 4.6, 7.0 y 9.3 kg/m<sup>3</sup>).

Los parámetros para el diseño de mezclas fueron el revenimiento de 15 cm, un porcentaje de volumen absoluto para los agregados de 52% para la grava y de 48% para la arena, y una relación de agua/cemento de 0.5 para el concreto sin fibra. En el caso de las mezclas con fibras, se mantuvo el diseño de la mezcla del concreto de referencia, más la adición del tipo y consumo de fibra y en todos los casos se añadió un aditivo plastificante compuesto por lingosulfonatos (Pozzolith 322N) para mantener el revenimiento en el rango deseado, mismo que cumple con la Norma ASTM C 494 para aditivos Tipo A.

Se determinaron las propiedades en estado fresco de cada una de las mezclas: revenimiento, masa volumétrica, contenido de aire atrapado, cono invertido y resistencia al agrietamiento por contracción plástica.

Además, en estado endurecido se determinó: resistencia a compresión, tensión, flexión, cortante, impacto, abrasión, módulo elástico, contracción por secado, tenacidad, permeabilidad al agua y flujo plástico (CREEP).

A partir de los resultados experimentales obtenidos y del análisis efectuado, se podrá evaluar la influencia y desempeño del tipo y porcentaje de fibra en las diversas propiedades estudiadas en estado fresco y endurecido del concreto.

**PALABRAS CLAVE:** concreto, fibras de acero, macrofibras de polipropileno, concreto reforzado con fibras, tenacidad, abrasión, permeabilidad, propiedades en estado fresco, propiedades en estado endurecido, absorción de energía.

## PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

El uso de las fibras metálicas y sintéticas como refuerzo del concreto es cada día más frecuente en México, aunque las primeras son de uso más común.

Sus aplicaciones van desde su empleo como refuerzo en pisos industriales, comerciales y pistas de aeropuertos, hasta en el revestimiento de túneles y la estabilización de taludes a través de concreto lanzado por vía húmeda o seca.

Las fibras metálicas y las de polipropileno ofrecen muchos beneficios al concreto. Desde hace más de 18 años de haberse comenzado a utilizar este material en nuestro país, un gran número de constructores, diseñadores, ingenieros, arquitectos y usuarios finales ya incorporan en sus especificaciones este tipo de refuerzo. Sin embargo, pocos comprenden realmente las propiedades que un tipo de fibra aporta al concreto. Entonces ¿Por qué es importante el uso de fibras como refuerzo en el concreto?, ¿Qué propiedades en el concreto se modifican al adicionar fibras?, ¿Cómo influye el porcentaje de fibra en las propiedades del concreto?, ¿Cómo evaluar la influencia de las fibras cuando se adicionan al concreto?, ¿El tipo de fibras influyen en las propiedades del concreto?,

Para contestar las preguntas planteadas, los objetivos específicos de la investigación fueron:

1. Hacer un análisis comparativo entre un concreto sin fibra (concreto de referencia) y los reforzados con dos tipos y diferentes porcentajes volumétricos de fibra; dicho análisis trata de sus propiedades en estado fresco y endurecido.
2. Obtener el porcentaje óptimo de fibras de acero y de polipropileno que se le pueden añadir a la mezcla de concreto con cemento Portland RS, apoyándonos en las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad del concreto reforzado con fibras.
3. Conocer los efectos que tiene la adición de fibras cortas de acero y macrofibras de polipropileno al caracterizar de forma amplia las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido mediante la realización de las diversas pruebas de laboratorio empleando diversos instrumentos novedosos, para así analizar y comprender mucho mejor los efectos de dicha adición.
4. Para la realización de los diversos ensayos experimentales se emplearán los procedimientos y recomendaciones que se encuentran normados por el ACI (American Concrete Institute) y el ASTM International (American Society for Testing and Materials), para cumplir con los requisitos mínimos que demanda un proyecto de investigación.

5. Caracterizar ciertas propiedades del Concreto Reforzado con Fibras de Acero “CRFA” y del Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno “CRFPP” para mostrar que la variación del porcentaje de fibra adicionada mejora de forma notable la durabilidad del concreto.
6. Obtener la resistencia a cortante de los concretos fabricados, empleando un método propio desarrollado en el Laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería-UNAM.

Las metas principales de este proyecto de investigación son:

- Profundizar en la tecnología de las fibras ya que estas se encuentran en un lugar muy destacado para reforzar el concreto.
- Con el análisis de los resultados se pretende promover y explorar nuevos usos en nuestro país como pueden ser: en elementos prefabricados (dovelas, pilotes, muros, etc.), construcción de muros de contención, pavimentos portuarios, estructuras hidráulicas (vertedores, canales, presas etc.), losas de menor espesor, rehabilitación y en todas aquellas estructuras donde se requiera de una adecuada seguridad estructural con espesores y cuantías de refuerzo reducidas.

## JUSTIFICACIÓN Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

Los materiales fabricados a partir de morteros y concretos de cemento portland son atractivos para usarlos como material de construcción porque resultan baratos, durables y tienen resistencia y rigidez adecuados para usos estructurales. Adicionalmente, en estado fresco, son fácilmente moldeables, de manera que pueden adoptar formas tan caprichosas y complejas como se quiera. Su deficiencia estriba en su fragilidad (baja resistencia a tensión e impacto), su permeabilidad y su inestabilidad en el cambio de volumen, siendo esta fuente de importantes problemas patológicos.

El refuerzo con fibras de acero o macrofibras de polipropileno puede constituir un método conveniente, práctico y económico de superar estas deficiencias, particularmente en aplicaciones donde el refuerzo convencional con barras de acero se requiere por cambios volumétricos del concreto. Más aun, disponer de refuerzo de pequeñas dimensiones como parte integral del concreto puede tener ventajas adicionales en la fabricación de productos y componentes con este material.

El Concreto Reforzado con Fibras de Acero “CRFA” y el Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno “CRFPP”, constituye una de las innovaciones más relevantes en el campo de los concretos especiales. El uso de este tipo de concreto está avanzando a gran velocidad debido a las nuevas tendencias constructivas, al diseño y a la fabricación de nuevas fibras que ofrecen a los proyectos beneficios tanto técnicos como económicos.

Al estudiar el CRFA, distintos autores han demostrado que la incorporación de ésta mejora muchas de las propiedades estructurales del concreto, entre ellas la tenacidad, su resistencia a la flexión, tensión, impacto y choque térmico. La adición al concreto de fibras de acero de un tamaño y forma normalizada mejora su capacidad de protección al agrietamiento, lo hace dúctil y mejora de forma notable su durabilidad; por ello, demostradas estas cualidades, los CRFA son de utilización en numerosos países.

En años recientes, el uso de CRFPP ha ganado popularidad, principalmente para mejorar la resistencia del concreto simple al agrietamiento por contracción plástica y a la tenacidad. La principal ventaja de la adición de fibras sintéticas en el concreto es el incremento de la tenacidad y de la resistencia al impacto, en estado endurecido y en el control de la contracción plástica, en estado fresco. Adicionalmente, controla la aparición de fisuras durante la vida útil del elemento y brinda mayor resistencia a la fatiga. Con un adecuado diseño puede reemplazar el uso de las tradicionales mallas electrosoldadas, lo que puede implicar un ahorro en el costo de la mano de obra de una construcción.

El motivo de esta investigación basada en un estudio experimental es presentar de forma muy amplia la caracterización de diversas propiedades del concreto reforzado con fibras de acero y macrofibras de polipropileno que difícilmente se encuentran en otros estudios que se han

realizado; dentro de estas propiedades se encuentran resistencia al agrietamiento por contracción plástica, abrasión, resistencia al cortante, permeabilidad al agua y flujo plástico (CREEP).

El conocer las propiedades del Concreto Reforzado con Fibras (CRF) permite dar nuevos usos y aplicaciones estructurales en nuestro país y como consecuencia, la posibilidad de incluirlo en las normas, tanto de métodos de prueba como en las normas técnicas complementarias para el diseño de estructuras de concreto.

Por lo anterior, en este trabajo se presenta un resumen del estado del arte referente al CRF que se encuentra en la literatura, se realiza una clasificación de las fibras empleadas para refuerzo del concreto y se hace una breve descripción de las fibras de acero y de polipropileno. Una vez revisado este marco teórico, se muestra el análisis de los resultados que se obtuvieron a partir de las pruebas realizadas al concreto en estado fresco y endurecido pertenecientes al estudio experimental realizado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

# 1. ESTADO DEL ARTE DE LOS CONCRETOS REFORZADOS CON FIBRA

## 1.1 INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado con fibras es el concreto formado por un conglomerante hidráulico, generalmente cemento Portland, agregados finos y gruesos, agua y fibras discontinuas y discretas. La proporción adecuada de estas fibras es la que aporta al concreto un mayor o menor refuerzo, que se traduce en una mejora en sus características de tenacidad, control de fisuración y resistencia a flexotensión.

Para que esta adición tenga efectividad, debe producirse adherencia entre la masa del concreto y la fibra añadida, de forma que se genere una mezcla con distribución uniforme que convierta al concreto en un material dúctil que reduzca su agrietamiento. La inclusión de la fibra hace que ésta soporte parte de las tensiones internas generadas por las cargas.

La inclusión de fibras de 25 a 50 mm de longitud, en cantidades menores al 2% en volumen, constituye la aplicación más frecuente en el campo de las estructuras de ingeniería civil.

## 1.2 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS CONCRETOS REFORZADOS CON FIBRAS

### 1.2.1 Antecedentes

El uso de fibras en la construcción no es un concepto nuevo, innumerables evidencias arqueológicas dan fe de que en Babilonia y Egipto las fibras vegetales se combinaron con mezclas de arcilla para fabricar elementos estructurales. Con el paso del tiempo esta técnica cayó en desuso, hasta que ya muy entrado el siglo XX se retomó, primero con un enfoque empírico y más tarde bajo la lente de la investigación.

Las fibras se han utilizado como refuerzo desde la antigüedad. Históricamente, los pelos de caballo se utilizaban en el mortero y la paja en ladrillos de barro. A principios de 1900, las fibras de asbesto (amianto) se utilizaban en el concreto, y, en la década de 1950 surge el concepto de materiales compuestos y el concreto reforzado con fibras fue uno de los temas de interés. Había una necesidad de encontrar un reemplazo para el amianto utilizado en materiales de construcción de concreto y otros, una vez que los riesgos para la salud asociados con la sustancia fueron descubiertos.

Durante años hubo un gran interés por el desarrollo de fibras sintéticas que trataran de copiar a las fibras naturales y cuya aplicación principal fue la fabricación de tejidos.

Las fibras sintéticas han tenido una aplicación en el sector de la construcción más tardía. No obstante, las fibras metálicas sí han tenido una mayor presencia a lo largo de los años como adición a materiales de construcción.

### **1.2.2 Primeras experiencias**

Desde 1847 se inició con un estudio técnico, sobre la adición de fibras de hierro, yute y otras fibras naturales al concreto. El estudio se desarrolló lentamente y fue hasta 1960 que se comenzó a experimentar con el uso de fibras metálicas y fibra de vidrio.

La primera patente de concreto reforzado con elementos metálicos se realizó en California en 1874 por A. Berard. Consistía en una piedra artificial que utilizaba acero granular procedente de desechos para el refuerzo del concreto. A partir de ese momento han aparecido numerosas patentes. En 1911 Graham utilizó por primera vez estas fibras para incrementar la resistencia y estabilidad del concreto reforzado convencional. Cabe destacar la patente de G. Martin en 1927, en California también, que describe la adición de alambres de acero rizados en el concreto empleado en tuberías.

Con el paso de los años, la forma de las fibras se va perfeccionando y en las patentes se emplean parámetros muy similares a los actuales para fibras de acero. Ejemplo de ello es la patente de G. Constantinesco (1954, Estados Unidos) que se refería al uso de fibras helicoidales y espirales para aumentar la resistencia a la fisuración y la absorción de energía en el concreto.

A partir de los años 50 se realizan numerosos trabajos de investigación sobre concretos reforzados con fibras de acero (las fibras metálicas son fundamentalmente de acero en sus variantes de bajo o medio contenido de carbono, acero inoxidable y de acero galvanizado). Entre los estudios realizados cabe destacar los de Romualdi, Batson y Mandel en 1963 (Fernández, 2003) (Rodríguez & Prado, 1984).

Con los estudios llevados a cabo por Romualdi en Estados Unidos, se puede decir que se inicia la verdadera investigación científica de las fibras cortas mezcladas en el concreto. En este momento sucede, de manera interesante, una diversificación mundial de las fibras a estudiar en su interacción con los concretos, basada fundamentalmente por las fibras que geográficamente se encuentren a disposición del hombre. Se validan las ventajas relativas de cada fibra y se despierta el quehacer de muchos científicos como el inglés Swamy y el sueco Gram. Se retoman las fibras orgánicas.

A finales de los años 60's, se llevó a cabo en otros países una evaluación sistemática de las propiedades de ingeniería de las fibras naturales y de los compuestos formados por estas fibras con el cemento. Los resultados de las investigaciones encontraron que las fibras pueden ser usadas con éxito para fabricar materiales de construcción. Posteriormente se desarrollaron

procesos de manufactura apropiados para su producción comercial en varios países de América Central, África y Asia.

Aunque los resultados fueron alentadores, se encontraron algunas deficiencias respecto a la durabilidad de las fibras naturales. Éstas al parecer son resultado de la reacción entre la alcalinidad de la pasta de cemento y las fibras, además de la susceptibilidad al ataque de microorganismos en presencia de la humedad, por lo que se comenzó a optar por el potencial empleo de las fibras sintéticas.

### **1.2.3 Actualidad**

En la década de los 70's en Estados Unidos se hicieron los primeros estudios e investigaciones dirigidos al uso del concreto consolidado con fibras sintéticas, las que desde entonces han sido elementos indispensables en la construcción de pisos industriales de alto desempeño, pavimentos, cubiertas para puentes, concretos lanzados para la estabilización de taludes, revestimientos de túneles, elementos estructurales prefabricados, bóvedas, etc.

Posteriormente, el desarrollo de proyectos de reforzamiento estructural con fibras de carbono, obedece a la investigación en el campo de las estructuras en los años ochenta.

El American Concrete Institute (ACI) en Estados Unidos crea el Comité 544 para el estudio, análisis y seguimiento de los Concreto Reforzados con Fibras (FRC, por sus siglas en inglés) y el Comité 549 para el Ferrocemento. En Europa aparecen grupos de estudios, a principios de los años 90 para el análisis del comportamiento estructural en conglomerados cementicios reforzados con fibras y se trata de normalizar el empleo de los concretos reforzados con fibras.

Las convenciones del ACI en Atlanta (Febrero de 1989) y San Diego (Noviembre de 1989) analizan los resultados presentados por los Comités 544 y 549 y sale a la luz la publicación especializada "Thin-Section Fiber Reinforced Concrete and Ferrocement", recopilada por J. I. Daniel y S. P. Shah como primer, concreto y loable empeño, de confrontación científica de la labor realizada con fibras sintéticas, fibras de vidrio, fibras de acero, ferrocemento y otras secciones compuestas.

A su vez la Universidad Federal de Bahía, Brasil, organiza en 1990 el Segundo Symposium sobre Plantas Vegetales y sus Fibras como Material de Construcción, donde con un sentido dirigido más hacia los países pobres se analizan las propiedades de los materiales compuestos con fibras vegetales, las construcciones realizadas con el empleo de materiales compuestos con fibras, madera, secciones completas de plantas y desperdicios orgánicos. Punto de despegue para el debate público especializado de lo realizado sobre los tópicos denominados Naturals Fibres Reinforced Concrete (NFRC, por sus siglas en inglés).

En los últimos años, el análisis y debate del empleo de los Concretos Reforzados con Fibras (CRF) ha ganado en actualidad y está presente, por derecho propio, en los foros nacionales e internacionales del sector de la construcción.

### 1.3 CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS (CRF)

#### 1.3.1 Definición

Los materiales de concreto reforzado con fibra (CRF) se definen como compuestos con cemento hidráulico, agregados de diferentes tamaños, y la incorporación de fibras discontinuas discretas. En el concreto reforzado con fibra, las fibras pequeñas y discontinuas, están distribuidas más o menos uniformemente en toda la masa del concreto, con orientaciones normalmente aleatorias.

El concreto reforzado con fibras, según la definición del ACI-American Concrete Institute, no es más que concreto hecho a partir de cementos hidráulicos, conteniendo agregados finos, o finos y gruesos, agua y fibras discretas discontinuas cuya misión es contribuir a la mejora de determinadas características de los concretos (ACI544.1R, 1996).

A diferencia del concreto reforzado convencional, en el CRF las propiedades mecánicas tienen más bien un carácter isótropo, no dependiente de la orientación y concentración del refuerzo en determinada zona.

Las fibras, al reducir las pequeñas grietas que siempre se producen en la matriz del concreto, aumentan la resistencia a la fisuración y la ductilidad del material, así como en grado pequeño, la resistencia a tensión. Las ventajas principales del CRF son su resistencia al impacto, su resistencia a esfuerzos térmicos, su resistencia al desgaste y astillamiento y su elevada capacidad de absorción de energía (Sánchez, 1978).

El concreto reforzado con fibras es un material de múltiples fases, que contiene pasta de cemento (partículas hidratadas), agua, agregados, aditivos y fibras. En términos generales, las propiedades mecánicas y físicas de un sistema compuesto dependen de las propiedades de sus componentes y de la interacción mecánica, física y química entre ellos.

#### 1.3.2 Componentes del CRF: requerimientos y recomendaciones

Los concretos reforzados con fibras (CRF) están constituidos esencialmente por los mismos componentes que un concreto convencional su diferencia radica en la adición de algún tipo de fibra para concreto, ya sea natural, artificial o sintética. La inclusión de las fibras, además de alterar el comportamiento del concreto en estado endurecido, también lo hace en estado fresco, por lo que a algunos de sus componentes se les exigen condiciones que en los concretos tradicionales no son necesarias.

En función de la cantidad de fibras que se va adicionar al concreto y de la geometría de éstas, el material compuesto tendrá que sufrir ciertas modificaciones respecto de un concreto convencional. Estas modificaciones pasan principalmente por una limitación en el tamaño máximo del agregado (T.M.A), menores valores de relación grava-arena, mayores cantidades de aditivos reductores de agua, y mayor demanda de finos, entre otros.

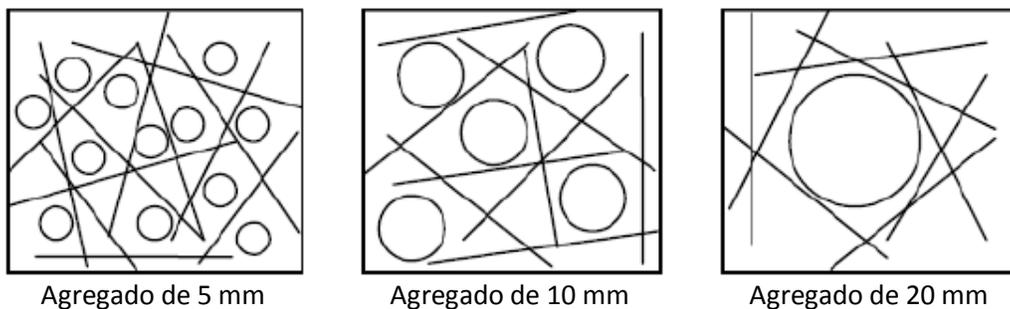
### 1.3.2.1 Agregados

Además de cumplir los requerimientos de composición, resistencia, durabilidad, estabilidad y limpieza establecidos para el empleo en concretos tradicionales, los agregados deben tener unos tamaños de partícula, granulometría y formas adecuadas para la elaboración de un CRF.

Se pueden emplear agregados naturales o triturados, siendo más adecuado el empleo de los primeros (especialmente en la arena) ya que para valores idénticos de relación agua/cemento se obtiene mejor trabajabilidad que con los agregados triturados.

Respecto del contenido de finos, cuando se adicionan fibras de acero es aconsejable incorporar mayor cantidad de finos para reducir el riesgo de segregación, aumentar la cohesión y favorecer la movilidad de las fibras.

La movilidad potencial de las fibras depende de la proporción del agregado grueso y del tamaño máximo de agregado (Figura 1.1). Cuanto mayor sean estos dos parámetros menor será la movilidad potencial de las fibras (Hannant, 1978). La JSCE (Japan Society of Civil Engineers) plantea que el valor óptimo de tamaño máximo de agregado sea inferior a la mitad de la longitud de la fibra.



**Fig.1.1** Ejemplo del efecto del tamaño del agregado grueso en la distribución de las fibras (40 mm de longitud) (Hannant, 1978).

Tamaños máximos de agregados mayores que 20 mm no son recomendados, aunque en algunos estudios se han empleado agregados de hasta 38 mm con resultados satisfactorios (ACI544.3R, 2008). Se recomienda también que el tamaño máximo de agregado no supere:

- 2/3 de la longitud máxima de la fibra.
- 1/5 del lado menor del elemento.
- 3/4 de la distancia libre entre las barras de refuerzo.

La relación agregado grueso/agregado fino (Gr/Ar) suele reducirse respecto de lo especificado para un concreto tradicional con las mismas exigencias de resistencia, ya que un mayor volumen de mortero facilita la movilidad de las fibras. Se debe buscar una relación Gr/Ar óptima que proporcione la docilidad y resistencia deseadas.

### **1.3.2.2 Agua**

Se puede emplear agua que cumpla los mismos requisitos exigidos en el caso de concretos reforzados tradicionales, poniendo especial atención a los agentes que puedan afectar a las fibras. Se debe tener en cuenta que el aumento de la consistencia debido al uso de las fibras debe ser compensado siempre con la adición de aditivos reductores de agua, sin modificar la dosificación prevista de la misma.

### **1.3.2.3 Cemento**

El cemento es un componente decisivo en la trabajabilidad del material en estado fresco y, posteriormente, en las características mecánicas del concreto endurecido. Se puede emplear cualquier cemento que cumpla con los requisitos establecidos para un concreto tradicional, siempre que sea capaz de proporcionar al concreto las características que exige el proyecto.

Cuanto mayor sea el contenido de fibras y menor el tamaño máximo del agregado, será necesario emplear una mayor cantidad de cemento con la finalidad de proporcionar más pasta.

### **1.3.2.4 Aditivos**

En los CRFA se emplean principalmente aditivos reductores de agua (superfluidificantes) y/o inclusores de aire. Al adicionar fibras al concreto (principalmente en altas proporciones), éste sufre una reducción sustancial del revenimiento. Con el fin de no adicionar agua, ni afectar la resistencia y durabilidad esperadas, se emplean superfluidificantes.

De cualquier manera, si se pretende hacer muy fluido un concreto con un volumen de fibras alto y no se controla adecuadamente la granulometría de los agregados y la distribución de las fibras en el concreto, puede producirse apelotonamiento (erizos); esto resulta cuando se emplean fibras de acero. Cuando los CRF van a estar sometidos a ciclos hielo-deshielo, todas las prácticas conocidas para el concreto tradicional son aplicables, por lo que el uso de un aditivo inclusor de aire es una necesidad.

### 1.3.2.5 Fibras

Para concreto de peso normal como el que se emplea en esta investigación, el contenido de fibra de acero varía desde un mínimo de  $30 \text{ kg/m}^3$  hasta un máximo de  $157 \text{ kg/m}^3$ , aunque el límite de alto rango suele ser de  $95$  a  $118 \text{ kg/m}^3$ . Mientras que el contenido de fibras sintética varía desde  $1.8$  a  $10 \text{ kg/m}^3$ , aunque el límite de alto rango suele ser de  $7 \text{ kg/m}^3$ .

La cantidad de fibras que pueden ser utilizados sin pérdida inaceptable de la trabajabilidad del CRF depende del tipo de fibra, las condiciones de colocación, el grado de congestión de refuerzo convencional, la forma de la fibra y la relación de aspecto (L/d) y el tipo y cantidad de aditivos reductores de agua utilizado.

### 1.3.2.6 Adiciones

Las adiciones usualmente empleadas en los CRF son materiales tales como puzolanas naturales, cenizas volantes y humo de sílice. La adición de estos materiales se hace con el fin de reducir la permeabilidad del concreto, aumentar la durabilidad, mejorar la cohesión del material y en consecuencia la adherencia fibra-matriz, controlar la contracción, disminuir el riesgo de segregación y, en el caso particular de los concretos lanzados, disminuir el rebote. Por todo esto y por la formación de silicatos similares a los producidos por el cemento, estos materiales permiten el diseño y la elaboración de concretos con mejores características.

La adición de humo de sílice (HS) al concreto varía de entre un  $7$  a  $10 \%$ ; como sustitución de cemento son recomendables en los concretos proyectados vía seca, no solo por las propiedades puzolánicas del HS sino también por las modificaciones reológicas que produce en el concreto en estado fresco debido a la alta superficie específica del HS, razón por la que reduce el rebote. El HS en CRF proyectados vía seca puede reducir la pérdida de fibras hasta valores de  $20\%$ .

## 1.4 PROPIEDADES DEL CRF

A diferencia del concreto reforzado convencional, en el CRF las propiedades mecánicas tienen más bien un carácter isótropo, no dependiente de la orientación y concentración del refuerzo en determinada zona. Las fibras al reducir las pequeñas grietas que siempre se producen en la matriz del concreto, aumentan la resistencia a la fisuración y la ductilidad del material, así como en grado pequeño, la resistencia a tensión. Las ventajas principales del CRF son su resistencia al impacto, su resistencia a esfuerzos térmicos, su resistencia al desgaste y astillamiento y su elevada capacidad de absorción de energía (Sánchez, 1978).

En términos generales, las propiedades mecánicas y físicas de un sistema compuesto como lo es el CRF dependen de las propiedades de sus componentes, tipo de fibra y de la interacción mecánica, física y química entre ellos.

## **1.4.1 Influencia de las fibras en las propiedades del concreto**

### **1.4.1.1 En estado fresco**

Las propiedades del concreto reforzado con fibras de acero y de polipropileno en su estado fresco están influenciadas por el tipo de fibra, la relación de aspecto de la fibra, la geometría de fibra, su fracción de volumen, las proporciones de la matriz, y las características de los materiales empleados en la mezcla.

Para aplicaciones convencionales la trabajabilidad del CRF debe ser adecuada para asegurar la colocación, consolidación, y terminado con un mínimo de esfuerzo, así como para proporcionar la distribución uniforme de la fibra y reducir la segregación y el sangrado al mínimo. Para una mezcla dada, el grado de consolidación influye en la resistencia, como lo hace para un concreto simple.

La trabajabilidad del concreto recién mezclado es una medida de su capacidad de ser mezclado, manipulado, transportado, y, lo más importante, colocado y consolidado con una pérdida mínima de homogeneidad y una mínima cantidad de aire atrapado.

Mediante ensayos experimentales se ha constatado que la consistencia del CRF resulta restringida con la adición de fibras en función del volumen de fibras adicionado y su esbeltez. La consistencia se puede evaluar con los siguientes métodos: Cono de Abrams (ASTM C 143), Tiempo de Flujo en el Cono Invertido (ASTM C 995) y Consistómetro VeBe (Norma BS 1881).

### **1.4.1.2 En estado endurecido**

#### **1.4.1.2.1 Resistencia a compresión**

Es de común aceptación que la adición de fibras de acero y polipropileno al concreto no conlleva un incremento significativo de la resistencia del concreto a compresión. Suelen producirse ligeros incrementos o decrementos de la misma.

En CRFA con fibras de esbeltez 45, 65 y 80, y volúmenes de fibras de 0.5%, 1.0% y 1.5% encontraron que los incrementos de la resistencia última a compresión está ligeramente afectada por la presencia de las fibras, con aumentos que van de entre 0-15% respecto de concretos idénticos sin fibras (ACI544.3R, 2008). Por otra parte; las fibras de polipropileno en bajas fracciones de volumen no tienen ningún efecto medible sobre la resistencia a la compresión (Banthia, 1994).

Es evidente entonces, que no hay ninguna razón para utilizar las fibras de acero o polipropileno para tratar de aumentar la resistencia a la compresión del concreto. Sin embargo, las fibras conducen a grandes aumentos en la tenacidad del concreto (medida como el área bajo la curva esfuerzo vs deformación), es decir, las fibras tienden a aumentar la deformación a la carga, y

proporcionan una gran cantidad de absorción de energía en la región después de los picos de la curva esfuerzo vs deformación. La presencia de fibras altera el modo de falla de los cilindros haciendo que el concreto sea menos frágil, presentando una falla tipo dúctil.

Es importante notar que las características varían en proporción a la concentración de un alto volumen de fibras. Sin embargo, por razones económicas, la tendencia actual en la práctica es la de minimizar el volumen de las fibras, en cuyo caso las mejoras en las propiedades pueden ser marginales.

#### 1.4.1.2.2 Resistencia a tensión

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

Se ha reportado que para valores del parámetro volumen por relación de aspecto ( $W L/d$ ) inferiores a 25 las fibras no tienen efecto benéfico en la resistencia a tensión, y que este se ve incrementado proporcionalmente al consumo de fibras a partir de este valor (IMCYC, Concreto refrozado con fibras de acero, 1990).

La resistencia a tensión del concreto depende también de las resistencias a tensión propias de la pasta de cemento y de los agregados, y de la adherencia que se genera entre ambos. Para medir la resistencia a tensión indirecta, se llevan a cabo pruebas mediante el ensaye de especímenes cilíndricos, sujetos a la aplicación de una carga de compresión diametral.

#### 1.4.1.2.3 Resistencia al corte

Las fibras de acero como las de polipropileno generalmente aumentan en el concreto la resistencia al corte y a la torsión, aunque hay pocos datos relacionados estrictamente con la resistencia al cortante y a la torsión del CRF.

El aumento del grado de corte puro en el CRFA se ha demostrado que dependen de la técnica de ensayo y el grado consiguiente de la alineación de las fibras en la zona de falla a cortante. Para un 1% en volumen de fibras, los aumentos van desde insignificantes hasta un 30% con respecto a un concreto sin fibras.

#### 1.4.1.2.4 Resistencia a flexión

La influencia de las fibras en el esfuerzo de flexión del concreto y mortero es mucho mayor que para la resistencia a compresión y resistencia a tensión (Hughes & Fattuhi, 1976).

Se ha registrado que la resistencia a flexión del CRFA es de aproximadamente de 50 a 70 por ciento más que la de la matriz de concreto no reforzado en la prueba de flexión con cargas a los tercios del claro, mientras que para un CRFPP es de 20 a 30 por ciento.

El módulo de rotura depende principalmente del volumen de fibras y de la esbeltez de éstas, logrando incrementos de hasta el 100% respecto de la resistencia de la matriz, si se utilizan fibras con extremos conformados.

El empleo de mayores volúmenes de fibras de mayores longitudes con orientación preferencial (cuando el ancho y/o la altura de los espécimen es menor que tres veces la longitud de las fibras) en la dirección longitudinal del elemento, da lugar a mayores incrementos en la resistencia, llegando hasta valores de 150%. Con contenidos de fibras bajos y fibras de esbeltez baja, no es de esperar incrementos significativos en la resistencia a flexión.

#### 1.4.1.2.5 Tenacidad

La tenacidad es una medida de la capacidad de absorción de energía de un material y se utiliza para caracterizar la capacidad del material para resistir la rotura cuando se someten a tensiones estáticas, cargas dinámicas o de impacto. Las dificultades de la realización de pruebas directas de tensión en el CRF impiden su uso en la evaluación de la tenacidad. Por lo tanto, la prueba más simple que se recomienda es la de flexión para la determinación de la tenacidad del CRFA y CRFPP. Además de ser más simple, el ensayo de flexión simula las condiciones de carga para muchas aplicaciones prácticas del CRF. La resistencia a la flexión y la fuerza para la primera grieta pueden ser evaluadas utilizando el ensayo con cargas a los tercios del claro, siempre y cuando cumplan los requisitos para secciones gruesas o delgadas indicadas en la norma ASTM C 1609.

El valor de los tenacidad depende principalmente del contenido de fibras, del tipo y de la esbeltez de éstas y poco o nada de que la matriz sea concreto o mortero, es decir, los índices reflejan principalmente el incremento de tenacidad debido a las fibras y no a cualquier otro mecanismo como por ejemplo el incremento de la resistencia a la primera fisura (ACI544.2R, 1989).

#### 1.4.1.2.6 Resistencia al impacto

Una de las principales características del CRFA es su resistencia a los impactos por su capacidad de absorción de energía, siendo en este caso su resistencia de 3 a 10 veces la resistencia del concreto en masa sin fibras (ACI544.2R, 1989). Además, el CRFA presenta una menor tendencia a la fragmentación y el desprendimiento.

#### 1.4.1.2.7 Módulo de elasticidad y Relación de Poisson

El módulo de elasticidad para los CRF con contenidos usuales de fibras ( $V_f < 1\%$  en volumen) no presenta modificaciones significativas respecto al de los concretos convencionales.

Cuando al concreto se le comprime en una dirección, al igual que ocurre con otros materiales, éste se expande en la dirección transversal a la del esfuerzo aplicado. La proporción en que el espécimen se deforma transversalmente con respecto a lo que se deforma longitudinalmente se conoce como la relación de Poisson. La relación de Poisson varía de 0.11 a 0.27 para concreto convencional. Si el volumen de fibras es menor que 2 por ciento, la relación de Poisson del CRFA y CRFPP generalmente se toma igual a la de un concreto sin fibras de acero.

#### 1.4.1.2.8 Resistencia a la abrasión

La inclusión de fibras de acero proporciona un efecto muy pequeño en la resistencia a la abrasión. Se ha reportado que el desgaste observado varía entre un 1 y 4 por ciento con respecto al de un concreto sin fibras; en cuanto a las fibras de polipropileno, el desgaste supera el 2 por ciento.

## 1.5 BREVE RESEÑA DE LA APLICACIÓN DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS EN LA INGENIERÍA CIVIL

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

En los últimos años nuevas investigaciones han abierto la posibilidad de utilizar otros materiales como son las microesferas de poliestireno, la fibra de vidrio, el polipropileno y los polímeros, los cuales pueden agregarse al concreto en la planta dosificadora o bien en la revolvedora, cuando ésta haya llegado a la obra, después de que se obtiene el revenimiento.

Muchos tipos de fibras se han probado, la gama ha sido amplia y extensa. La ex Unión Soviética probó sin éxito a largo plazo las fibras de cristal. El nylon y el rayón también fueron probados pero no resolvieron las características de funcionamiento requeridas para el refuerzo del concreto.

La aplicación de fibras de carbono para el concreto ha sido un éxito, actualmente en Perú han sido empleadas para reforzar columnas de puentes colgantes, aplicando las películas de carbono en las caras de las columnas. Sin embargo, una desventaja es que necesitan la aplicación de un recubrimiento denominado Top Coat, cuya finalidad es proteger las fibras de los rayos solares, lo que representa un costo elevado para la obra.

Actualmente las fibras de polipropileno son empleadas ampliamente en los Estados Unidos y Canadá en todo tipo de construcciones de concreto (UNE N. , 1989). Entre las diversas aplicaciones de este tipo de concreto, la de construcción de pavimentos y revestimientos de túneles con concreto reforzado con fibras de acero han tenido gran éxito. También cabe destacar su aplicación en el ámbito militar, utilizándose en hangares y recintos protegidos contra el impacto de metralla o proyectiles.

En Estados Unidos, se está realizando varias intervenciones estructurales y el concreto lanzado ha sido la clave para su rehabilitación con eficiencia y calidad; el concreto lanzado también puede ser utilizado en las diversas reparaciones de elementos estructurales, permitiendo su rehabilitación (IMCYC, Concreto lanzado para tuneles y taludes, 2014).

Otros países como Argentina y Chile, continúan realizando investigaciones sobre el comportamiento en el laboratorio de concretos reforzados con fibras (acero y sintéticas).

Chile ya ha aplicado las fibras de acero en la construcción de estabilización de taludes, pavimentos en carreteras, pistas de aeropuertos y hangares, pistas industriales y comerciales, cimentaciones para equipo y maquinaria, etc.

Brasil es otro de los países Sudamericanos que emplea el uso de fibras de polipropileno en diversos sectores de la construcción, y cuenta con la mayor fábrica de América del Sur que produce este tipo de fibras (FITESA), empresa que produce alrededor de 11,000 ton de fibras de polipropileno al año.

Por más de 30 años, Japón ha utilizado diversos tipos de fibras con diversas técnicas, para diferentes estructuras de obra civil incluyendo la técnica de Grid Beam System para estabilizar natural y artificialmente taludes. Aunque Japón tiene muchos años aplicando esta técnica, en México somos los pioneros en introducir esta solución.

Colombia es uno más de los países de América del Sur que realiza investigaciones sobre concretos reforzados con fibras sintéticas.

En México el éxito del concreto reforzado con fibras es generalmente bajo, aunque sus primeros usos en obras de ingeniería civil fueron para estabilizar taludes (carretera Acapulco) y como revestimiento primario en túneles (túnel Loma Larga en Monterrey), su aplicación ha sido aislada ya que el método más usado es el concreto lanzado o proyectado (shotcrete), cabe destacar que otra aplicación común es para la elaboración de pisos industriales (IMCYC, Concreto lanzado para tuneles y taludes, 2014).

En Europa, países como España también utiliza la gama de fibras de polipropileno para refuerzo y prevención de las fisuras por contracción plástica de yesos, morteros y concretos, además, en Oriente, se ha hecho costumbre realizar diversas estructuras con concreto lanzado.

Hoy en día los concretos con fibras han venido revolucionando el mercado, ya que además de disminuir los costos operativos, actúan de manera estructural. El uso de estos concretos está avanzando a gran velocidad debido, por un lado, al constante incremento del precio del acero y de sus derivados estos últimos años y, por otro lado, a las nuevas tendencias constructivas. Ello representa un cambio en algunos de los cálculos tradicionales de los concretos para avanzar en los criterios de diseño con una mayor contribución estructural de las fibras.

En la figura 1.1, se presentan imágenes que ejemplifican los usos y aplicaciones del concreto reforzado con fibras “CRF” en diversas obras de ingeniería.



Pavimento *Ikea La Maxe*  
( Metz, Francia)



Pavimento sin juntas de contracción “*Fercam*”  
(Milán, Italia)



Revestimiento primario-Concreto lanzado  
(Túnel Xicoteppec, México)



Dovelas prefabricadas (EEUU) para T.M.B  
(Tunnel Boring Machine)



Elementos prefabricados  
(EEUU, Colombia)



Tubo de saneamiento (Arlington, EEUU)

**Fig. 1.1** Ejemplo del empleo de concreto reforzado en diversas obras de ingeniería



L'oceanografic de Valencia  
(Valencia, España)



Pantalla de pilotes tipo CPI-8  
(Catalunya, España)



Concreto lanzado- Estabilidad de taludes  
Método Grid Beam System (Ciudad Numazu;  
prefectura Shizuoka, Japón)



Concreto lanzado-Estabilidad de talud  
(Carretera Durango-Mazatlán, México)



**Fig. 1.1** Ejemplo del empleo de concreto reforzado en diversas obras de ingeniería



Concreto lanzado–Revestimiento primario  
(Supevia poniente, Mexico D.F)



Paneles prefabricados para fachadas  
Método SKIN+STUD FRAME (Colombia)



Canales para diversas obras hidráulicas (Colombia, Brasil)



Losas de Cimentación (Colombia, Brasil)

**Fig. 1.1** Ejemplo del empleo de concreto reforzado en diversas obras de ingeniería

## 1.6 NORMATIVAS EXISTENTES REFERENTES AL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS

La ausencia de normativa referente al concreto reforzado con fibras ha generado que durante años haya existido un desconocimiento sobre este tipo de concreto.

Algunas de las Instrucciones existentes que incluyen el tema del concreto reforzado con fibras son: el FIB Model Code, RILEM TC-162-TDF (2003), la Norma alemana DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton (1992/2001), la Norma italiana: CNR-DT 204 (2006) y la normativa española EHE-08.

El FIB, Federación Internacional del Concreto Estructural (Fédération Internationale du Béton) es una organización creada en 1998 de la unión del CEB (Comité Euro-Internacional del Concreto - Comité Euro-International du Béton) y el FIP (Federación Internacional del Pretensado - Fédération Internationale de la Précontrainte).

RILEM, la Unión Internacional de Laboratorios y Ensayos de Materiales de Construcción, Sistemas y Estructuras (RILEM, por su nombre en francés) fue fundada con el propósito de promover la cooperación científica en el área de los materiales de construcción y de las estructuras.

La German Concrete Society fue la propulsora en 1992 de la primera normativa que se apoyaba en una ecuación  $\sigma$ - $\epsilon$  para el diseño de Concreto Reforzado con Fibras de acero (CRFA) (específica para fibras metálicas). Dicha normativa se creó en su momento con el propósito de disponer de un diagrama para el diseño estructural de túneles (DBV, 1992).

El Comité Nacional de Investigación Italiano publicó en 2006 unas recomendaciones para el diseño, ejecución y control de las estructuras de CRF (CNRDT 204/2006). Este documento propone dos relaciones para el comportamiento a tensión del CRF: el modelo elástico-lineal y el modelo rígido-plástico.

A nivel español, el marco normativo referente al concreto reforzado con fibras se basa en los principios definidos en las normas UNE. En ellas se definen, entre otros aspectos, la clasificación y definiciones de las fibras para el refuerzo del concreto, la toma de muestras del concreto en estado fresco, la fabricación de probetas para ensayos de laboratorio, la resistencia a compresión, determinación del índice de tenacidad a compresión, determinación del contenido de fibras, etc.

Actualmente existe el anexo 14 de la Instrucción de Concreto Estructural (EHE- 08) en el que se precisa establecer unas recomendaciones específicas y complementarias cuando, para mejorar algunas prestaciones ya sea en estado fresco, en primeras edades o en estado endurecido, se empleen fibras en el concreto, las cuales pueden modificar algunas de sus propiedades.

## 2. LAS FIBRAS EN LA CONSTRUCCIÓN: ASPECTOS FUNDAMENTALES

### 2.1 GENERALIDADES

El objetivo principal de todo Ingeniero dedicado a la construcción es lograr que sus obras sean resistentes, duraderas y lo más económicas posibles sin olvidar la calidad. Por esto es necesario que las obras estén construidas con materiales de calidad.

El descubrimiento del concreto hidráulico en el siglo XIX ha marcado pautas en el desarrollo constructivo, dadas sus ventajas fundamentales de:

- Poseer alta resistencia a la compresión en estado endurecido.
- Trabajabilidad adecuada que permite su colocación bajo disímiles condiciones de moldeo, con lo que la forma no es un impedimento constructivo.
- Ser económico dada la composición del mismo, con agregados gruesos y finos, un material conglomerante, fundamentalmente el cemento Portland y agua.

Otras muchas ventajas son propias de este material y desde su creación se trabaja, estudia e investiga para lograr mejorarlo. Posee también desventajas, y la fundamental ha sido su baja resistencia a la tensión, lo que planteó un sin número de limitaciones hasta que apareció el concreto reforzado.

El concreto reforzado se convirtió en el material constructivo por excelencia del siglo XX y resuelve un universo grande de problemas, pero aún posee sus restricciones ligadas básicamente a la no homogeneidad del material. Su alto peso específico se convierte en freno básico para su primacía en el siglo XXI.

El empleo de fibras viene a incidir en la búsqueda de soluciones para mejorar la calidad de los concretos a partir de poseer propiedades tenso-mecánicas satisfactorias y ser un material homogéneo. Para que esta adición tenga efectividad, debe producirse adherencia entre la masa del concreto y la fibra añadida, de forma que se genere una mezcla con distribución uniforme que convierta al concreto en un material dúctil que reduzca su fisuración. La inclusión de la fibra hace que ésta soporte parte de las tensiones internas generadas por las cargas.

Desde épocas ancestrales el hombre usó fibras para conseguir abrigo, construyendo sus casas de pajas, luego de adobe, con el empleo de diferentes materiales orgánicos que tomó de la naturaleza, incluyendo la madera, por lo tanto ha estado familiarizado con el uso de fibras y a principios del pasado siglo las retoma, pero esta vez para mejorar propiedades básicas de los concretos.

## 2.2 DESCRIPCIÓN DE LAS FIBRAS

Las fibras son estructuras unidimensionales, largas y delgadas cuya longitud es muy superior a su diámetro y están orientadas a lo largo de un solo eje. Se doblan con facilidad y en las últimas tres décadas ha existido un crecimiento por el interés en el uso de fibras en concreto premezclado, concreto prefabricado y concreto lanzado. Las fibras de acero, polipropileno, vidrio y materiales naturales (celulosa de madera) están disponibles en una amplia variedad de formas, tamaños y espesor; pueden ser cilíndricas, llanas, onduladas (rizadas) y deformadas (conformadas en los extremos) con longitud típica de 60 mm a 150 mm y espesor variando de 0.005 mm a 0.75 mm (Kosmatka S. H., Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Desde siempre las fibras han representado una alternativa para satisfacer diversas necesidades del hombre. Antiguamente se dependía exclusivamente de las fibras encontradas en la naturaleza, las cuales gracias a sus excelentes cualidades, han expandido su gama de utilización.

## 2.3 CLASIFICACIÓN DE LAS FIBRAS

Existen diversas clasificaciones para las fibras, la más viable se divide en tres grupos, los cuales son: fibras naturales, artificiales y sintéticas. Esta clasificación aparece esquematizada en la Figura 2.1.

Las **fibras naturales** son las derivadas de la naturaleza, y pueden ser de procedencia animal, vegetal o mineral. Ejemplos de ellas son las fibras de acero, vidrio, lechuguilla, maguey, bagazo de caña, etc.

La principal ventaja de estas fibras también conocidas como “fibras no procesadas”, es que con ellas se pueden obtener materiales reforzados a un bajo costo, empleando las técnicas adecuadas para su obtención.

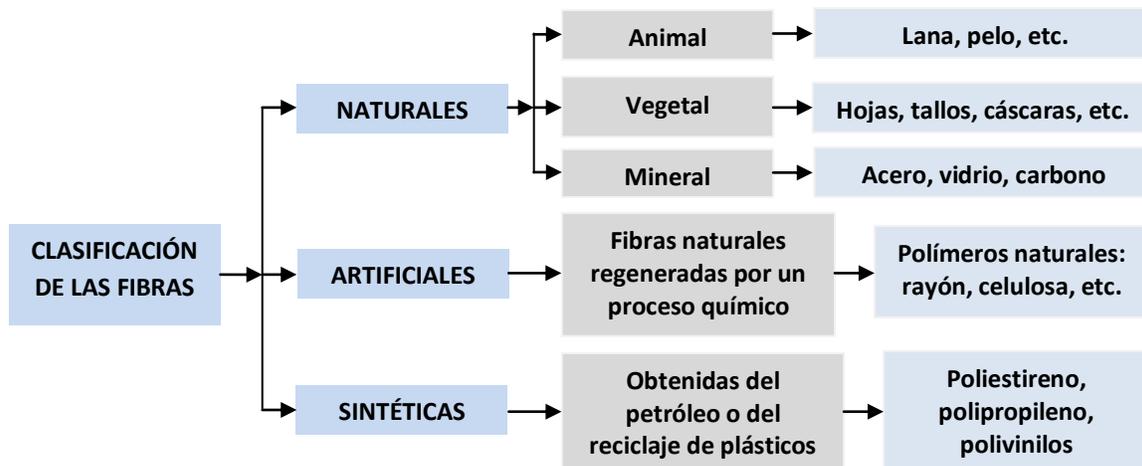


Fig. 2.1 Esquema de la clasificación de las fibras

Aunque históricamente muchas fibras han sido usadas para reforzar los materiales de construcción, ha sido hasta años recientes que se han realizado estudios de la aplicación de las fibras naturales como refuerzo.

Dentro de las fibras naturales, las de origen mineral actualmente se aplican como refuerzo en el concreto y constantemente se mejoran, ejemplos de ellas son las fibras cortas de acero (primer tipo de fibra empleada en esta investigación) y las fibras de carbono, sin embargo, la principal desventaja que presentan es su alto costo, a diferencia de las fibras naturales de origen vegetal las cuales suelen ser muy económicas.

A pesar de que las fibras vegetales están disponibles en grandes cantidades, y en muchos países en desarrollo representan una fuente renovable continua, presentan algunos inconvenientes como el clima o que ciertas condiciones ambientales adversas puedan limitar su producción.

Asimismo, otro de los inconvenientes de las fibras naturales es que la mayoría de ellas como el algodón y lana sufren la carencia de durabilidad al ambiente alcalino de la pasta del cemento Portland.

Las **fibras artificiales** son producidas a partir de elementos naturales pero han sido regeneradas mediante algún proceso químico, por lo que son más uniformes y resistentes a roturas, al fuego y a las arrugas que las fibras naturales. Ejemplo de éstas son el acetato, la viscosa, el rayón y la seda artificial.

Con el tiempo las limitaciones de las fibras naturales y artificiales, dieron origen a las **fibras sintéticas**, cuyo objetivo principal ha sido mejorar las características de las fibras naturales. A medida que sus aplicaciones han ido en aumento, se han convertido en una necesidad, principalmente porque el crecimiento de la población demanda cada vez más servicios.

Estas fibras se obtienen a partir de resinas derivadas del petróleo, pero recientemente se han empezado a obtener del reciclaje de productos plásticos, con lo que su popularidad ha crecido en los últimos años, ejemplos de ellas son el acrílico, el nylon, poliestireno, polipropileno, etc.

Se han probado el polietileno, el nylon y el poliéster, de las cuales el nylon es la que presenta un mejor desempeño, ya que por su textura es más fácil de manejar que las demás fibras. Sin embargo, aunque estas fibras han sido eficientes y presentan algunas mejoras tienen una desventaja, la cual consiste en una tendencia a la segregación.

La principal ventaja de este tipo de fibras es, principalmente, que no se depende de cosechas y el volumen de producción puede ser modificado a voluntad. Sus propiedades también pueden ser modificables a voluntad, así como su resistencia, aunque la mayoría presentan algunas desventajas como la absorción de agua.

Dentro de la amplia gama de las fibras sintéticas, se ha comprobado que las fibras de polipropileno (segundo tipo de fibra empleada en nuestra investigación) son impermeables y no tienen absorción de agua, lo que ayuda mucho en el diseño de la mezcla de concreto debido a que no hay que corregir la relación a/c por absorción, lo que las hacen muy compatibles para mezclarse en matrices de concreto. Adicionalmente a estas propiedades son: químicamente inertes, muy estables y livianas, lo que no incrementa sustancialmente el peso de la mezcla de concreto.

Actualmente, los avances tecnológicos y con ello las exigencias en la modernidad requieren cada vez el mejoramiento de los materiales y sistemas constructivos empleados. Esta es la línea de investigación que sigue la tesis.

Cabe destacar que desde hace algunos años han aparecido en el mercado productos fabricados con materiales provenientes del reciclaje de plásticos, los cuales han ido penetrando el mercado contemporáneo. Algunos de estos materiales son fibras sintéticas cuya aplicación en los sistemas constructivos se han incrementado en los últimos años en diversos países sudamericanos, Estados Unidos, Canadá, México y Europa.

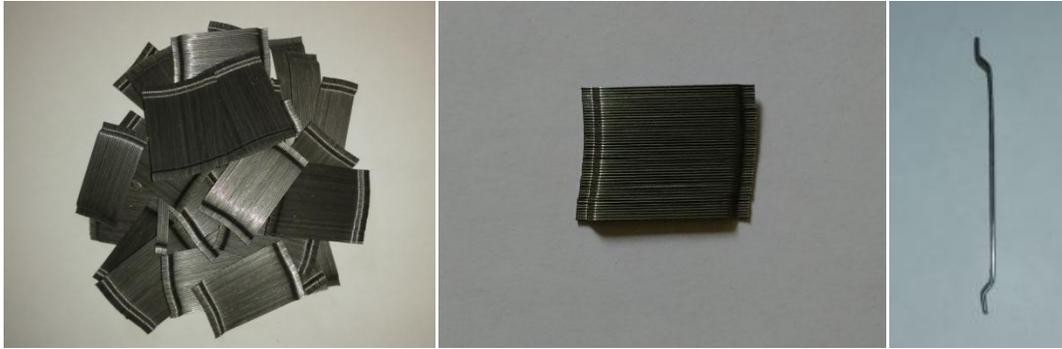
Con el desarrollo de las fibras sintéticas, la industria de la construcción se ha visto beneficiada con su incorporación para mejorar las mezclas de concreto.

Es por esto que en relación al objeto de estudio, se considera conveniente mencionar cuales son las aplicaciones de las fibras para ubicar al lector en la importancia del uso de las mismas dentro de la presente investigación, debido a que estas pueden ofrecer ciertas novedades en el ámbito de la construcción.

### **2.3.1 Fibras de acero**

Dentro de la amplia gama de fibras naturales, las que se aplican actualmente como adición para el concreto son las de origen mineral, como son las fibras de acero, carbono y la tradicional fibra de vidrio. Para el desarrollo de esta tesis las fibras de acero (fibras cortas) se emplean para la primera parte de nuestro estudio por ello a continuación se presenta una breve descripción.

Las fibras de acero destinadas a reforzar el concreto se definen como longitudes cortas y discretas de acero que tiene una relación de aspecto (relación de longitud/diámetro) de aproximadamente 20 a 100, con diferentes secciones transversales, y que son lo suficientemente pequeños para ser dispersadas al azar en una mezcla sin endurecer, utilizando procedimientos habituales de mezclado (ACI544.1R, 1996). En la figura 2.2 se presenta una imagen de las fibras cortas de acero con extremos conformados empleadas en el estudio.



**Fig. 2.2** Fibras cortas de acero con extremos conformados Dramix-BEKAERT (RC 65/35 BN)

La efectividad del refuerzo matriz-fibras, exige a las fibras las siguientes propiedades (Namaan, 2000):

- Una resistencia a tensión significativamente mayor que la del concreto.
- Una adherencia con la matriz del mismo orden o mayor que la resistencia a tensión de la matriz.
- Un módulo de elasticidad significativamente mayor que el del concreto.

Las fibras suponen una mejora ante determinadas propiedades como el control de la fisuración por contracción, y el incremento en la resistencia al fuego, abrasión e impacto, entre otras. Las especificaciones estándar, clasificación y definiciones relativas a las fibras de acero, se encuentran normalizadas en la ASTM A820/A820M-06.

La norma ASTM A 820 clasifica a las fibras de acero en cuanto a su manufactura en cuatro tipos:

- Tipo 1 – las fibras de alambre conformadas en frío son las más fácilmente encontradas en el mercado, fabricadas de alambre de acero conformado.
- Tipo II – las fibras cortadas de chapas se fabrican como el propio nombre dice: las fibras de acero se cortan de las chapas de acero.
- Tipo III – las fibras extraídas de fundición, las cuales se fabrican por técnicas relativamente complicadas donde una rueda en rotación se usa para levantar el metal líquido de una superficie de metal fundido, a través de la acción de capilaridad. El metal fundido extraído se congela rápidamente en forma de fibras y se quita de la rueda por la fuerza centrífuga. Las fibras resultantes tienen una sección transversal en forma de medialuna.
- Tipo IV – otras fibras.

Los volúmenes de fibras de acero usados en concreto normalmente varían de 0.25% a 2%. Volúmenes mayores que 2% generalmente reducen la trabajabilidad y la dispersión de las fibras y requieren un diseño especial de las mezclas o técnicas especiales de colocación.

La presencia de las fibras afecta ligeramente la resistencia a compresión. La adición de 1.5% (en volumen) de fibras de acero puede aumentar la resistencia a tensión directa hasta 40% y la resistencia a la flexión hasta 150%.

Las fibras de acero no afectan la contracción libre. Las fibras de acero retardan la fractura del concreto restringido durante la contracción y mejoran la relajación de tensiones por el mecanismo de fluencia (Altoubat & Lange, 2001).

La durabilidad del concreto reforzado con fibras de acero depende de los mismos factores que el concreto convencional. No se disminuye la resistencia a la congelación-deshielo con la adición de fibras de acero, siempre que haya incorporación de aire, se consolide correctamente el concreto y haya un ajuste de la mezcla para que pueda acomodar las fibras. Si se proporciona y coloca el concreto correctamente, va a ocurrir poca o ninguna corrosión de las fibras. Cualquier corrosión de las fibras en la superficie del concreto es sencillamente un problema de apariencia y no una condición estructural.

Las fibras de acero presentan módulo de elasticidad relativamente alto (Tabla 2.1). Se puede aumentar su adherencia o unión con la matriz de cemento a través del anclaje mecánico o de la aspereza superficial. Las fibras están protegidas de la corrosión por la alta alcalinidad del ambiente en la matriz de cemento (ACI544.1R, 1996).

**Tabla 2.1** Propiedades típicas de las Fibras de Acero

Tipo de fibra	Densidad relativa (gravedad específica)	Diámetro, $\mu\text{m}$ (0.001 pulg.)	Resistencia a la tensión, MPa [ $\text{kg}/\text{cm}^2$ ](ksi)	Módulo de elasticidad, MPa [ $\text{kg}/\text{cm}^2$ ](ksi)	Deformación en la rotura, %
Acero	7.80	100-1000 (4-40)	500-2600 [5,100-27,000] (70-380)	210,000 [2100,000] (30,000)	0.5-3.5

Las fibras de acero se usan comúnmente en pavimentos de aeropuertos y en las capas de revestimiento de las pistas. También se usan en los tableros de puentes (cubiertas para puentes) (Figura 2.3), pisos industriales y pavimentos de autopistas. El concreto con fibras de acero en estructuras sometidas al agua a alta velocidad han mostrado que pueden durar hasta tres veces más que las alternativas fabricadas con un concreto convencional. El concreto reforzado con fibras de acero se emplea en muchas aplicaciones de concreto prefabricado donde sea necesario un aumento de la resistencia al impacto o de la tenacidad. En los tanques sépticos, las fibras de acero sustituyen al refuerzo convencional.

Las fibras de acero también se usan largamente en el concreto lanzado en aplicaciones de capas delgadas, especialmente en la estabilización de taludes de rocas y revestimiento de túneles. El humo de sílice y los acelerantes han permitido que se coloque el concreto lanzado en capas más gruesas. El humo de sílice reduce la permeabilidad del concreto lanzado (Morgan, Neill, McAskill,

& Duke, 1987). El concreto lanzado con fibras de acero se ha empleado con altos volúmenes de fibras (hasta 2%) con éxito.



**Fig. 2.3** Tablero de puente (cubierta para puentes) fabricado con concreto reforzado con fibras de acero

Las fibras aglutinadas en una lechada de cemento (SIFCON), con volúmenes de hasta 20% de fibras, se ha usado desde finales de los años 70. El concreto impregnado por lechada se puede emplear para producir un componente o una estructura con resistencia y ductilidad mucho mayores que las encontradas en el concreto convencional y en concreto lanzado. El concreto con fibras impregnadas por lechada (SIFCON) no es barato y necesita de ajuste fino, pero aún mantiene su potencial para las aplicaciones expuestas a condiciones severas y que requieran alta resistencia y tenacidad. Estas aplicaciones incluyen estructuras resistentes al impacto y a la explosión, refractarias, muros de arrimo y reparaciones de pavimentos y pistas (Figura 2.4).



**Fig. 2.4** En la producción del SIFCON, las fibras de acero se colocan en la superficie antes de colocar la pasta de cemento.

### 2.3.2 Fibras de polipropileno

Las fibras sintéticas son las fibras que se fabrican por el hombre y son resultado de la investigación y el desarrollo de la industria petroquímica. Los tipos de fibras usadas en concreto son: acrílicas, aramida, carbón, nylon, poliéster, polietileno y polipropileno, siendo esta última la de mayor

desarrollo, pues ha permitido mejorar, a un costo razonable, algunas propiedades de morteros y concretos y han facilitado la creación de nuevos materiales de construcción. Para la segunda parte de nuestra investigación se emplearon fibras de polipropileno (Macrofibras), en la Figura 2.5 se muestra el tipo de fibra.



**Fig.2.5** Macrofibra de polipropileno MasterFiber (MAC Matrix-BASF)

Las fibras de polipropileno fueron usadas por primera vez en los años sesentas. El polipropileno es un polímero de hidrocarburo sintético cuya fibra está hecha usando procesos de extrusión por medio de estiramiento en caliente del material a través de un troquel. Es producida como monofilamento de sección circular y se corta según la longitud requerida. Esta fibra es manufacturada también fibrilada o como cinta de sección rectangular (ACI544.1R, 1996).

Corresponden a una nueva tecnología que ofrece ventajas, pueden ser aplicadas en concretos lanzados como refuerzo en estabilizaciones de taludes, soporte para túneles y minas, aseguramiento de tierra y roca artificial. Sin embargo, hasta el momento sólo se suelen utilizar fibras metálicas para estas aplicaciones, desconociendo las virtudes y ventajas que presenta el uso de fibras de polipropileno. En la Tabla 2.2 se presenta de forma resumida las propiedades típicas de estas fibras.

**Tabla 2.2** Propiedades típicas de las Fibras de Polipropileno

Tipo de fibra	Densidad relativa (gravedad específica)	Diámetro, $\mu\text{m}$ (0.001 pulg.)	Resistencia a la tensión, MPa [ $\text{kg}/\text{cm}^2$ ](ksi)	Módulo de elasticidad, MPa [ $\text{kg}/\text{cm}^2$ ](ksi)	Deformación en la rotura, %
Polipropileno	0.90	20-200 (0.8-8.0)	450-700 [4600-7100] (65-100)	3,500-5,200 [36,000-53,000] (500-750)	6-15

Según su proceso de fabricación se pueden clasificar en (UNE N. , 1989):

- Monofilamentos extruidos (tipo I)
- Láminas fibriladas (tipo II)

Hay que destacar las fibras multifilamento, que nacen como reemplazo de las variedades de fibras monofilamento y que están encontrando una gran aceptación en el mercado de las fibras poliméricas dado que parece que con ellas se resuelve la falta de adherencia de las fibras con la matriz.

Las dimensiones de las fibras son variables, igual que su diámetro y forma. Pueden clasificarse en:

- Microfibras / Micro-fibras: < 0.30 mm diámetro
- Macrofibras / Macro-fibras:  $\geq$  0.30 mm diámetro

Las microfibras se emplean en general para reducir las grietas por contracción plástica del concreto, especialmente en pavimentos y losas, pero no asume funciones estructurales. También se utilizan para mejorar el comportamiento frente al fuego, siendo conveniente un elevado número de fibras por kg. Las micro-fibras se caracterizan no sólo por sus características físico-químicas sino también por su volumen de fibra, que indica el número de fibras presentes en un m<sup>3</sup> de concreto, dato que, a su vez, depende de la longitud de la fibra y muy especialmente de su diámetro.

Las macro-fibras pueden colaborar estructuralmente, siendo su longitud variable (desde 20 mm a 60 mm), la cual debe guardar relación con el tamaño máximo del agregado. La adición combinada de micro y macro fibras puede mejorar no sólo la resistencia a tensión del concreto sino también el comportamiento post-fisura de éste (Namaan, 2000).

En el caso de fibras con longitudes relativamente elevadas (alrededor de 50 mm), se observa una importante pérdida de trabajabilidad del concreto, incluso con bajos contenidos de fibras, llegando a afectar los resultados del ensaye en cono de Abrams en hasta 75 mm.

Las fibras de polipropileno al añadirse al concreto se dispersan perfectamente en todo el volumen de éste. Esto confiere a dicha matriz un armado en tres dimensiones. Cabe destacar que, a pesar de ser un elemento discreto, aporta continuidad al volumen de la pieza de modo tal que al fracturarse no se separa. Todo ello, sumado a las características de la fibra (geometría y módulo elástico), repercute en un incremento en la tenacidad (capacidad de absorción de energía) y mejor recuperación en la zona post-elástica.

Otra consecuencia lógica del empleo de fibra de polipropileno en sustitución de las de acero, es el aligeramiento de piezas y estructuras, dada la marcada diferencia entre sus densidades. Esa misma densidad hace que la fibra quede embebida en el concreto durante el vibrado, de forma que no aflora a la superficie en contacto con el molde: la estética de la pieza permanece inalterada.

Por último, como todas las fibras, las de polipropileno confieren una aportación extra resistente a la abrasión e impacto. Ello sigue siendo una consecuencia de su gran capacidad de absorción de

energía, puesto que para extraer una fibra de la matriz se ha de consumir la energía equivalente que active los procesos de desunión, estiramiento y extracción o deslizamiento.

Las fibras sintéticas pueden reducir la contracción plástica y consecuentemente la fisuración y pueden ayudar al concreto después que se fisura. La norma ASTM C 1116 clasifica los concretos y concretos lanzados reforzados con fibras sintéticas, de acero y de vidrio, y plantea, que en el siglo XX, las fibras sintéticas totalmente probadas para ser utilizadas en concretos son las de polipropileno. Las fibras de rayón, acrílico y poliéster se degradan en el medio alcalino de la matriz cementante, por lo que su uso debe ser más estudiado. (ASTMC1116, 2010)

Para otorgarle mayores cualidades al concreto lanzado, las fibras de polipropileno de alta resistencia constituyen una innovadora alternativa al ser más livianas, no sufrir oxidaciones y permitir considerables ahorros de tiempo y de cantidad de concreto lanzado. Asimismo, es un producto que al ser bombeado origina un desgaste pequeño en tuberías y mangueras, a diferencia del desgaste que producen las fibras metálicas. Además, no afecta las cualidades del concreto.

Según reportes, las fibras de polipropileno reducen la contracción no restringida, plástica y por secado del concreto para contenidos de fibra de 0.1 a 0.3 % por volumen.

**Aplicación:** Las fibras inhiben la fisuración intrínseca en todo tipo de concreto, siendo particularmente adecuadas en la industria del concreto premezclado. Aplicaciones frecuentes incluyen pavimentos, carreteras, elementos prefabricados.

Este tipo de fibras se aplica, principalmente, en la construcción de túneles y taludes como refuerzo secundario permitiendo eliminar el uso de mallas, ya que el concreto lanzado con fibras puede seguir la curvatura irregular de una excavación sin que queden espacios vacíos o sombras, como sí ocurre al utilizar mallas, produciendo oxidaciones en ellas y como consecuencia grietas en el concreto lanzado.

## 2.4 ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LA TEORÍA DE LAS FIBRAS EMPLEADAS PARA REFUERZO EN EL CONCRETO

Al usar fibras discontinuas, éstas se dispersan dentro de la matriz de manera casual y tendiendo a la tridimensionalidad, a diferencia de las continuas que requieren una orientación prefijada; también se les denomina fibras cortas y largas.

Como criterio uniformador, el ACI ha propuesto y se ha generalizado la denominada Relación de Forma o Aspecto Definido, que no es más que la relación existente entre la longitud de la fibra y su diámetro equivalente ( $L/d$ ).

La forma tiende a lo circular normalmente, aunque en algunas fibras, como las hechas por el hombre son planas, siendo dicho diámetro el equivalente al circular de la misma área. Como la superficie es básica para la adherencia fibra-matriz, también interesa conocer la naturaleza de la fibra.

Las características físico-mecánicas de un conjunto importante de diferentes tipos de fibras se muestran en la Tabla 2.3. Las consideraciones fundamentales son:

- Los diámetros no son estables, incluso presentan variaciones altas para un mismo tipo de fibras.
- Las densidades están acordes al tipo de material.
- La resistencia a la tensión es casi igual para todas las fibras, observándose los valores mayores en las inorgánicas.
- El módulo de elasticidad de las fibras orgánicas es muy bajo, lo que posibilita que se obtengan grandes deformaciones, aspecto muy vinculado a los altos valores de elongación a la rotura de este tipo de fibras.

**Tabla 2.3** Características físico-mecánicas de las fibras más comunes (ACI544.1R, 1996).

Tipo de Fibra	Diámetro Equivalente (mm)	Densidad Relativa (Kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a Tensión (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Deformación en la Rotura (%)
Acrílico	0.02-0.35	1100	200-400	2	1.1
Asbesto	0.0015-0.02	3200	600-1000	83-138	1-2
Algodón	0.2-0.6	1500	400-700	4.8	3-10
Vidrio	0.005-0.15	2500	1000-2600	70-80	1.5-3.5
Grafito	0.008-0.009	1900	1000-2600	230-415	0.5-1
Aramida	0.01	1450	3500-3600	65-133	2.1-4
Nylon	0.02-0.4	1100	760-820	4.1	16-20
Poliéster	0.02-0.4	1400	720-860	8.3	11-13
Polipropileno	0.02-1	900-950	200-760	3.5-15	5-25
Polivinil alcohol	0.027-0.660	1300	900-1600	23-40	7-8
Carbón	-	1400	4000	230-240	1.4-1.8
Rayón	0.02-0.38	1500	400-600	6.9	10-25
Basalto	0.0106	2593	990	7.6	2.56
Polietileno	0.025-1	960	200-300	5.0	3
Sisal	0.08-0.3	760-1100	228-800	11-27	2.1-4.2
Coco	0.11-0.53	680-1020	108-250	2.5-4.5	14-41
Yute	0.1-0.2	1030	250-350	26-32	1.5-1.9
Acero	0.15-1	7840	345-3000	200	4-10

Los aspectos teóricos que tratan de modelar el comportamiento de las fibras en la matriz están básicamente referidos a: Longitud Crítica de la Fibra, Eficiencia de las Fibras ( $S$ ), Fracción de Volumen de Refuerzo ( $V_f$ ) y Superficie Específica ( $S_e$ ).

### 2.4.1 Longitud Crítica de la Fibra

Al aplicar un esfuerzo de tensión, en los extremos de la fibra no hay transmisión de carga desde la matriz, se genera un patrón de deformación (ver Figura 2.1).

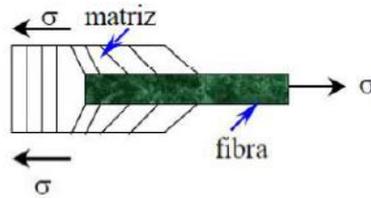


Fig. 2.1 Esfuerzo de tensión en la fibra

Existe una longitud de fibra crítica para aumentar la resistencia y rigidez del compuesto. Esta longitud crítica  $l_c$  depende del diámetro  $d$  de la fibra, de la resistencia a la tensión  $\sigma_f$  y de la resistencia de la unión matriz-fibras (o resistencia al cortante de la matriz),  $T_c$ , de acuerdo con la ecuación:

$$l_c = \frac{\sigma_f \times d}{T_c}$$

Los perfiles esfuerzo-longitud de fibra dependen de que la longitud de la fibra sea mayor o menor que la longitud crítica. En la Figura 2.2 pueden verse los perfiles esfuerzo-longitud de fibra para  $l = l_c$  y  $l > l_c$ . Para el caso  $l < l_c$  puede verse la Figura 2.3.

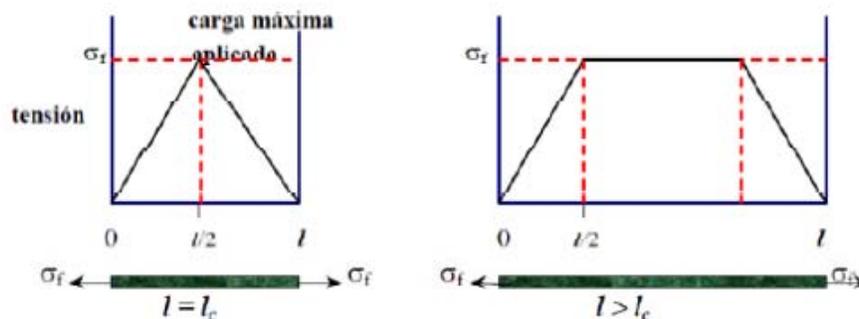
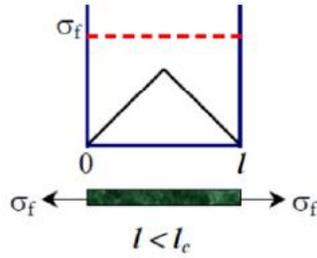


Fig. 2.2 Perfiles esfuerzo-longitud de fibra para  $l = l_c$  y  $l > l_c$

Si  $l = l_c$ : la carga máxima se consigue en el centro de la fibra

Si  $l > l_c$ : el reforzamiento es más efectivo

Si  $l < l_c$ : el reforzamiento es insignificante (la matriz se deforma alrededor de la fibra, casi no existe transferencia de esfuerzo)



**Fig. 2.3** Perfiles esfuerzo-longitud de fibra para  $l < l_c$

Si  $l > l_c$ : (normalmente  $l > 15 l_c$ ) fibras continuas

Si  $l < l_c$ : fibras cortas o discontinuas

### 2.4.2 Eficiencia de las Fibras (S)

Se define como la distancia entre los centros de gravedad de las fibras. Los autores de este concepto demostraron que la resistencia a la tensión en el instante en que aparece la primera fisura para un determinado volumen de fibras es inversamente proporcional con el intervalo geométrico existente entre las fibras.

En 1964 Romualdi y Mandel plantean, para calcular “S”, considerar un volumen de concreto ( $V_b$ ) reforzado con “n” fibras, de manera tal de que para una distribución espacial:

$$S = \sqrt[3]{V_b/n}$$

Llegando a demostrar que el intervalo de las fibras orientadas en la dirección de los esfuerzos a tensión es:

$$S = 13.8d / \sqrt{V_f} \quad \text{siendo } V_f \text{ el porcentaje volumétrico de fibras.}$$

Este análisis es estrictamente geométrico, no real y sólo válido para una respuesta de distribución cuadrática.

Krenchel estudió las diferencias que pueden aparecer con las diferentes orientaciones de las fibras:

\* \* \* \*  
\* \* \* \*  
\* \* \* \*

Cuadrada

$$S_c = \sqrt{1/nx} \quad (12)$$

\* \* \* \*  
\* \* \* \*  
\* \* \* \*

Triangular

$$S_t = 1.075 S_c \quad (13)$$

\*\* \*\*  
\* \*\* \*  
\*\* \*\*

Hexagonal

$$S_h = 0.877 S_c \quad (14)$$

Como puede observarse, la misma cantidad de fibras en una misma área según la orientación difieren. Tomando como base la cuadrada, el intervalo entre las fibras de la triangular es un 7 % superior y el de la hexagonal un 12 % inferior.

El análisis anterior, limitado por consideraciones estrictamente geométricas tampoco da respuesta al comportamiento post-fisura y responde sólo cuando aparece la primera fisura.

Swamy profundiza en el concepto de intervalo -fibras y su dependencia entre las fibras y la matriz, así como el modo de ruptura. Para establecer “S” toma en consideración dos factores:

- Distribución de los esfuerzos unitarios de adherencia.
- Presencia de la fisura.

Introduce entonces la eficiencia de la adherencia a través de los coeficientes:

- $n_l$ : influencia en la longitud de la fibra.
- $n_d$ : influencia del diámetro de la fibra.

Suponiendo una distribución cuadrada de las fibras en la sección transversal de una matriz cúbica con lado L, el intervalo efectivo de fibras que se encuentra en la dirección del esfuerzo unitario es:

$$S = \sqrt{L^2} / n_x \quad \text{donde } n_x \text{ es el número de fibras en la dirección } x.$$

Evaluando para el caso particular de fibras de acero se tiene:

$$S = \alpha \sqrt{d} / V_f l \quad \text{para el estado en que aparece la primera fisura.}$$

$$S = \beta \sqrt{d} / V_f l \quad \text{para el estado de ruptura.}$$

Otros investigadores han expresado sus criterios acerca del intervalo geométrico de las fibras y Mckee lo hizo considerando que las fibras son distribuidas uniformemente en el espacio por lo que S es igual en todas las direcciones siendo:

$$S = \alpha \sqrt{V_l} / u \approx 4.3 \sqrt{d^2} (l) / p$$

Como puede observarse los resultados son disímiles y esto está dado porque fueron estudios realizados estrictamente sobre bases geométricas y de manera aproximada.

Prácticamente se recomiendan los estudios sobre la base de pruebas de rayos x efectuadas a muestras reales y se determina “S” experimentalmente. No obstante los estudios realizados han sido fundamentalmente en Estados Unidos e Inglaterra, con técnicas de ensayos costosas y

enfocadas a las fibras de acero, de ahí que estos estudios se tomen como válidos en una primera aproximación y se extiendan a otros tipos de fibras.

De manera experimental se define el intervalo entre las fibras,  $S_{exp}$ , como la distancia media entre la intercepción de la proyección de las fibras individuales en un plano con base lineal de longitud  $l_b$  dibujada sobre el mismo plano:

$$S_{exp} = l_b / n_b$$

Pudiendo concluir al respecto que:

1ro	La eficiencia de las fibras es un parámetro importante para precisar las características mecánicas del concreto reforzado con fibras.
2do	La forma de cálculo de $S$ no está definida estrictamente, dada en lo fundamental por: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Parámetros de orden geométrico, conocer el porcentaje volumétrico de fibras adicionados, diámetro de la fibra y la orientación de dichas fibras.</li> <li>• Consideraciones de esfuerzos unitarios sobre el material reforzado con fibras. En la realidad, en muy pocos elementos se dan los supuestos de dirección concordante de esfuerzos de tensión y orientación de las fibras.</li> </ul>

### 2.4.3 Fracción de Volumen de Refuerzo ( $V_f$ )

Se define como el resultado de la división del volumen ocupado por el refuerzo, en este caso las fibras, entre el volumen de concreto o mortero.

$$V = (\text{volumen de fibras}) / (\text{volumen de concreto}) \quad (1)$$

Pero, masa de la fibra entre el volumen de concreto es igual a la dosificación de fibra, por tanto:

$$\text{Volumen de concreto} = (\text{masa de fibra}) / (\text{dosificación de fibra}) \quad (2)$$

Además  $PUS = \text{masa de fibra} / \text{volumen fibra}$ , de donde:

$$\text{Volumen de fibras} = (\text{masa de fibras}) / (PUS \text{ fibras}) \quad (3)$$

Sustituyendo (2) y (3) en (1) se obtiene que:

$$V_f = [(\text{dosis de fibra}) / PUS_{\text{fibra}}] * 100 \quad (4)$$

El peso unitario suelto de la fibra resulta de la masa de dicha fibra entre el volumen de la misma.

Por tanto, la fracción de volumen es dependiente del tipo de fibra, en función de su peso unitario y del diámetro de la misma, además de la cantidad de fibras que se adicione a la mezcla; es importante recalcar que no depende de la longitud de la fibra.

#### 2.4.4 Superficie Específica ( $S_e$ )

Se define como la relación existente entre el área superficial del refuerzo, en este caso fibras, y el volumen de concreto o mortero.

$$S_e = A_s / \text{Vol. Concreto} \quad (5)$$

Si el volumen de fibra es el área de una fibra por la longitud total de la fibra, además:

$$l_t = \text{Vol. fibra} / \text{área de una fibra} \quad (6)$$

$$A_s = \pi d l_t \quad (7)$$

Tendremos entonces que:

$$A_s = 4 \text{ Vol. Fibra} / d \quad (8)$$

Trabajando con las ecuaciones (2), (3), (5) y (8) se obtiene:

$$S_e = 4 V_f / d \quad (9)$$

Ecuación coincidente con la planteada para su combinación de un producto ferroso con cemento y donde se destaca que la superficie específica depende del tipo de fibra (en función del diámetro) y de la fracción de volumen, pero es independiente de la orientación del refuerzo.

Los valores recomendados para la superficie específica de los materiales compuestos se encuentran entre  $0.3$  y  $3 \text{ cm}^{-1}$ .

## 2.5 ASPECTOS RELACIONADOS CON EL DISEÑO ESTRUCTURAL

### 2.5.1 Consideraciones de diseño para el empleo de fibras como refuerzo en el concreto

En la actualidad en países como México, este tipo de material habitualmente se utiliza en muy pocas aplicaciones, una vez que los ingenieros tomen conciencia de los beneficios que aportan a las propiedades del concreto y tengan acceso a las procedimientos apropiados de diseño, se desarrollarán muchas más aplicaciones.

El proporcionamiento de los materiales empleados para fabricar mezclas de concreto reforzado con fibras debe ser el adecuado para obtener una buena trabajabilidad y sacar el máximo provecho a las fibras. Esto puede requerir limitar el tamaño máximo del agregado, la optimización del tamaño, aumento del contenido de cemento, y tal vez la adición de cenizas volantes u otros aditivos para mejorar la trabajabilidad.

El diseñador debe tomar en cuenta, que se pueden mejorar las propiedades del concreto; empleando fibras, y conseguir que el concreto tenga una mayor capacidad de deformación, resistencia al impacto, absorción de energía, y resistencia a la tensión. Sin embargo, el aumento de estas propiedades puede variar de sustancial a cero dependiendo de la cantidad y el tipo de fibras utilizadas; además, las propiedades no aumentarán proporcionalmente conforme se incremente el consumo de fibras adicionada.

Un criterio usado para el diseño de elementos de concreto reforzado con fibras de acero, se basa en métodos de diseño de concreto convencional completados con métodos especiales, los cuales modifican las fuerzas internas e incluyen la tensión aportada por las fibras. Cuando existen datos de ensayos de laboratorio, estos criterios pueden proporcionar diseños satisfactorios. La principal diferencia de estos métodos de diseño, está en la determinación del incremento de la magnitud de la resistencia a tensión debido a la adición de la fibra y en la forma en que se calcula la resistencia total. Se pueden aplicar criterios empíricos en algunos casos donde se han obtenido datos de prueba, se deben utilizar de forma conservadora en nuevas aplicaciones, solo después de una investigación adecuada.

Generalmente, para aplicaciones estructurales, las fibras de acero y en algunos casos las de polipropileno (macrofibras) se deben utilizar como un complemento de las barras de refuerzo. Las fibras de acero pueden inhibir el agrietamiento y mejorar la resistencia al deterioro de la estructura como resultado de la fatiga o el impacto. Un enfoque conservador, pero justificable en los elementos estructurales donde se presentan esfuerzos de flexión o tensión, como en vigas, columnas o losas, es que las barras de refuerzo deben ser utilizados para soportar el total de los esfuerzos de tensión que se presenten, esto debido a la variabilidad en la distribución de las fibras; puede ser que un bajo contenido de fibra en áreas críticas podría conducir a una reducción inaceptable en la resistencia.

En aplicaciones donde la presencia del refuerzo continuo no es esencial para la seguridad y la integridad de la estructura, por ejemplo, en pavimentos, pisos, revestimientos, y revestimientos de concreto lanzado, para obtener mejoras en la resistencia a la flexión, resistencia al impacto, y resistencia a la fatiga, se pueden emplear fibras para reducir el espesor de la sección (ACI544.4R, 1988).

Hay algunas aplicaciones en las que se han utilizado fibras de acero sin barras de refuerzo para soportar cargas de flexión, por ejemplo, en el estacionamiento del aeropuerto de Heathrow, se construyeron losas de 1.07 m con espesor de 10 cm, apoyados por los cuatro lados (ACI544.4R,

1988). En tales casos, la seguridad de la estructura debe ser demostrada realizando pruebas de carga a gran escala, y en la etapa de construcción se debe emplear un rígido control de calidad.

Algunas pruebas a gran escala han demostrado que las fibras de acero son eficaces para complementar o sustituir los estribos en vigas (Williamson, 1978) (Craig, 1983) (Sharma, 1986), aunque no es una práctica aceptada en la actualidad, otras pruebas a gran escala han demostrado que las fibras de acero en combinación con barras de refuerzo puede aumentar la capacidad de momento en vigas de concreto reforzado (Henager, Charles, & Doherty, 1976).

## 2.5.2 Propiedades mecánicas utilizadas en el diseño

Las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras están influenciadas por el tipo de fibra, su longitud, diámetro, relación de aspecto ( $L/d$ ), cantidad de fibra adicionada a la mezcla, resistencia de la matriz cementante, tamaño y forma del agregado grueso. Por esta razón, las mezclas propuestas para el diseño deben ser estudiadas, de preferencia en muestras representativas de su uso final, para verificar los valores de las propiedades asumidos en el diseño.

Las fibras modifican las propiedades mecánicas del concreto, y en todos los modos de falla (Gopalaratnam & Shah, 1986), especialmente en aquellos que son inducidos por fatiga, esfuerzos de tensión, flexión, impacto y cortante. El mecanismo de refuerzo de las fibras implica la transferencia de la tensión de la matriz cementante a las fibras mediante adherencia en la interfaz. Los esfuerzos a tensión generados en el elemento se comparten entre la interacción fibra-matriz, una vez que la matriz se agrieta; la tensión se trasfiere totalmente a las fibras.

Aparte de la matriz cementante, las variables más importantes que rigen las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras son la eficiencia de la fibra y el porcentaje de fibra adicionada. La eficiencia de la fibra depende del trabajo en conjunto con la matriz cementante. Para fibras con sección uniforme, la resistencia al deslizamiento aumenta conforme aumenta su longitud de la fibra; entre más larga sea la fibra, mayor será su efecto en el mejoramiento de las propiedades del compuesto.

Para fibras con secciones transversales no redondas y fibras redondas de diámetro pequeño ofrecen más resistencia al deslizamiento debido a que poseen más área superficial por unidad de volumen. Por lo tanto, cuanto mayor sea la superficie de la fibra en la interfaz (o diámetro más pequeño), más eficiente será al interactuar con la matriz cementante.

Por lo anterior, parece que las fibras deben tener una relación de aspecto lo suficientemente alta como para asegurar que el material compuesto falle en tensión, esto no es práctico; muchas investigaciones han demostrado que el uso de fibras con una relación de aspecto mayor que 100 generalmente causan una trabajabilidad inadecuada y una distribución no uniforme en la mezcla de concreto. La mayoría de las mezclas utilizadas en la práctica emplean fibras con una relación de

aspecto de menos de 100, y la falla del material compuesto, por lo tanto, se debe principalmente al deslizamiento de la fibra. Sin embargo, el aumento de la resistencia al deslizamiento (arranque) sin aumentar la relación de aspecto se logra en fibras con superficies deformadas

El comprender las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras (CRF) y su variación con el tipo de fibra, porcentaje de fibra adicionada a la mezcla y su relación de aspecto, es importante para tener un diseño exitoso.

### **2.5.3 Efecto de la relación de aspecto de la fibra sobre la ductilidad del concreto**

Las fibras influyen en todos los modos de falla de las propiedades mecánicas del concreto y, en forma especial, en las inducidas por fatiga, tensión, impacto y esfuerzo de corte. El mecanismo de aumento de la resistencia por el uso de las fibras involucra la transferencia de esfuerzos de la matriz cementante a las fibras mediante adherencia en la interfaz. El esfuerzo se comparte por las fibras y la matriz cementante hasta que la matriz se agrieta, entonces el total del esfuerzo se transfiere progresivamente hacia las fibras.

Las variables más importantes que regulan las propiedades de los concretos reforzados con fibras son la eficiencia y el contenido de fibras. La eficiencia de las fibras es controlada por la resistencia de las fibras a no ser arrancadas del concreto, la cual depende de la adherencia en la interacción fibra-matriz cementante. Para fibras con sección uniforme, esta resistencia aumenta con el largo de la fibra, mientras más larga es la fibra, mayor es su efecto en dichas propiedades. También, fibras con secciones pequeñas y no circulares, son más efectivas debido a que poseen mayor superficie por unidad de volumen.

Una ventaja de la falla por deslizamiento (arranque) de las fibras es que se produce en forma gradual, incrementando la ductilidad del material, la que contrasta con fallas más rápidas y posiblemente catastróficas que podrían ocurrir si las fibras fallaran en tensión. Generalmente, mientras más dúctiles sean las fibras, más dúctil y gradual es la falla del elemento de concreto. Por lo tanto, las características mecánicas de los concretos reforzados con fibras dependen no sólo de las propiedades mecánicas de la fibra, sino también del grado en que una carga aplicada se transmite a la fibra por medio de la matriz cementante. En este aspecto, la interacción fibra/matriz y, por consiguiente, la adherencia entre la pasta y la fibra, juega un rol importante en la disipación de energía, y por ende, en la ductilidad, durante el arranque de la fibra. Además, la disposición u orientación relativa de las fibras y su concentración y distribución influyen radicalmente en la resistencia y en otras propiedades de los materiales compuestos reforzados con fibras (Carmona & Maripangui, 2007).

### 3. PRIMERA FASE DE LA INVESTIGACIÓN: CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN EL ESTUDIO

En este capítulo se describen los materiales empleados como materia prima en el desarrollo experimental de la investigación, así como se citan; las normas ASTM y NMX donde se describen los procedimientos a seguir para obtener las características principales de los agregados que se emplean para el criterio de diseño, corrección y fabricación de las mezclas de concreto.

#### 3.1 CEMENTO

La clasificación de los tipos de cemento está proporcionada por la norma mexicana NMX-C-414-ONNCE-1999 y la ASTM C 150. De acuerdo con la clasificación y composición, para el estudio se empleó cemento Portland compuesto resistente a los sulfatos (CPC 40 RS), constituido básicamente por clinker portland y yeso, adicionalmente puede incluir al menos dos de los siguientes componentes en cantidades que pueden llegar a representar hasta el 50% de la mezcla: escoria granulada de alto horno, materiales puzolánicos, humo de sílice. Las características químicas de este cemento se obtuvieron en laboratorio con la colaboración del Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto (IMCYC), los resultados se presentan en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Características químicas del cemento

Elemento		CPC 40 RS
SiO <sub>2</sub> -Sílice	%	17.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Alúmina	%	5.10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Óxido Férrico	%	2.90
CaO-Cal combinada	%	57.80
CaO-Cal libre	%	0.50
MgO-Magnesio	%	1.40
SO <sub>3</sub> -Trióxido de Azufre	%	4.10
Residuo insoluble	%	5.15
Perdida por calcinación	%	4.70
Suma		98.85
<b>Álcalis</b>		
Na <sub>2</sub> O-Óxido de Sodio	%	0.60
K <sub>2</sub> O-Óxido de Potasio	%	0.70
Total de álcalis (Na <sub>2</sub> O + 0.658 K <sub>2</sub> O)	%	1.06
<b>Compuestos potenciales</b>		
C <sub>3</sub> S-Silicato tricálcico	%	54.48
C <sub>2</sub> S-Silicato dicálcico	%	8.21
C <sub>3</sub> A-Aluminato tricálcico	%	8.60
C <sub>4</sub> AF-Ferro aluminato tetracálcico	%	8.82
Suma		80.11

Por el contenido de aluminato tricálcico, este cemento se puede considerar como moderadamente resistente a los sulfatos. Así mismo, el contenido de álcalis resultó muy superior (1.06%) al límite establecido (0.6%) para evitar el problema de la reacción potencial con los agregados. Este tipo de cemento es adecuado para instalaciones de concreto reforzado que estarán expuestas al ataque de sulfatos, así como de cloruros.

## 3.2 AGREGADOS

### 3.2.1 Agregado grueso

En la fabricación de los concretos se empleó agregado grueso de origen calizo de tamaño máximo de 9.5 mm (3/8”), proveniente del Estado de Hidalgo (Banco Ejido Ignacio Zaragoza).

Para el caso específico de la grava, las normas que rigen al agregado grueso para pruebas de laboratorio son:

- Peso volumétrico seco suelto y compactado de la grava (determinado de acuerdo con la norma ASTM C 29)
- Densidad y absorción de la grava (determinadas de acuerdo con la norma ASTM C 127)
- Granulometría del agregado grueso (realizada de acuerdo con la norma ASTM C 136 y ASTM C 33)

#### 3.2.1.1 Análisis granulométrico (ASTM C 136)

La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado tal como se determina por el análisis de tamices de acuerdo con las especificaciones que se encuentran en la Norma ASTM C 136; este método cubre la determinación de la distribución del tamaño de las partículas mediante tamizado del agregado.

Para efectos de construcción, la grava o agregado grueso es todo el material pétreo que queda retenido en la malla No. 4 hasta la de 6 pulgadas.

Aun cuando la grava no interviene en la misma proporción que la arena, en lo referente a la manejabilidad del concreto, se deben de tener los parámetros para lograr un diseño adecuado de la mezcla ya que es un factor importante por ser la parte que aporta la mayor resistencia.

Es deseable que el agregado grueso posea continuidad de tamaños en su composición granulométrica. Para analizar la composición granulométrica de la grava en conjunto, se le criba por mallas cuyas aberturas se seleccionan de acuerdo con el intervalo dimensional dado por su tamaño máximo, buscando dividir este intervalo en suficientes fracciones que permitan juzgar su distribución de tamaños a fin de compararla con los límites granulométricos que le sean aplicables.

La realización de esta prueba se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería-UNAM.

Se realizaron 3 pruebas para el análisis granulométrico de la grava caliza de 3/8" para obtener un punto de comparación. En la Figura 3.1 se muestra una de las curvas granulométricas obtenidas a partir de uno de los análisis realizados, en el ANEXO 1 se pueden observar todos los resultados realizados para el agregado grueso, así como sus respectivas gráficas que indican los límites inferior y superior del porcentaje que pasa acumulado.

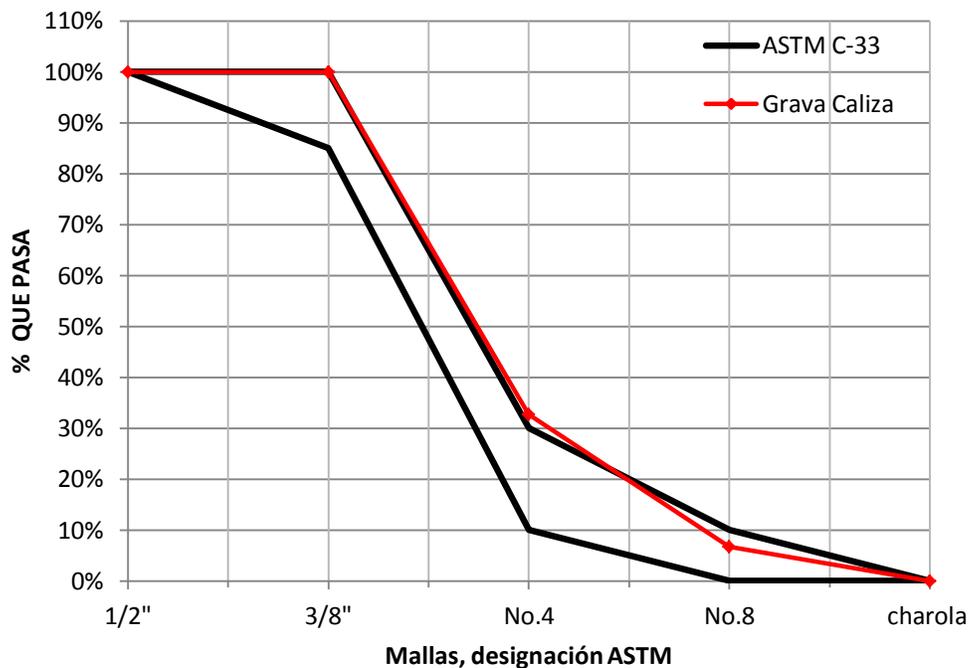


Fig. 3.1 Curva granulométrica del agregado grueso

Como se observa el límite de finos en el agregado grueso se encuentra fuera de los establecidos, por lo que se realizó un diseño para que la mezcla de concreto sea manejable y cohesiva al emplear este tipo de grava.

### 3.2.1.2 Peso volumétrico (ASTM C 29), peso específico y absorción (ASTM 127)

Para realizar un adecuado diseño de concreto con fibras, ha sido necesario evaluar las propiedades físicas de los agregados. Cabe destacar que las pruebas realizadas en laboratorio se llevaron a cabo de acuerdo con las especificaciones de la ASTM para agregado grueso.

El **peso volumétrico** seco o peso unitario, al igual que para el agregado fino, es el peso de agregado necesario para llenar un recipiente de volumen conocido; volumen ocupado por el

agregado y los vacíos entre sus partículas. El ensayo se realiza bajo la norma ASTM C 29, este método cubre la determinación del peso unitario de los agregados fino y grueso.

Se determinó el peso volumétrico seco en estado suelto así como en estado compactado, este último se emplea en el diseño de las mezclas de concreto; el valor de peso volumétrico seco en estado compactado, también se usa para el conocimiento del peso y/o volumen de materiales apilados y que estén sujetos a asentamientos provocados por el tránsito sobre de ellos o por su transporte.

El peso volumétrico aproximado del agregado comúnmente usado en el concreto de peso normal varía de 1200 a 1750 kg/m<sup>3</sup> (Kosmatka S. H., Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

El **peso específico** de un agregado corresponde al peso específico en masa, que es el cociente resultante de dividir el peso en el aire de un cierto volumen de agregado en condición saturada y superficialmente seca, entre el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada libre de aire, el ensayo se realizó siguiendo las indicaciones estandarizadas que se encuentran en la norma ASTM C 127. Este parámetro se requiere para el diseño adecuado de una mezcla de concreto.

Deben emplearse agregados con peso específico comprendido entre 2.4 y 2.8, aproximadamente, para obtener concretos cuyo peso unitario varía entre 2200 y 2550 kg/m<sup>3</sup> (Kosmatka S. H., Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

La **absorción** del agregado grueso se define como el contenido de humedad del agregado en su estado saturado superficialmente seco. Determinar la absorción en los agregados es de suma importancia, pues fija la cantidad de agua en la dosificación de los concretos y morteros, ya que además del agua necesaria para la hidratación de los aglomerantes hay que agregar la que absorberán los agregados, de lo contrario, faltará agua para la reacción de hidratación y fraguado. Los materiales que presentan menor porcentaje de absorción garantizan, mejor control del agua en el proporcionamiento, mayor densidad y más resistencia en los concretos.

La absorción se determina por medio de un periodo de inmersión del agregado durante 24 horas en agua, conforme al método de prueba ASTM C 127 y ASTM C 70. El agregado en condición seca se sumerge en agua, y ésta comienza a penetrar rápidamente en los poros permeables de la roca, desplazando al aire que así tiende a ser expulsado. La absorción se expresa en porcentaje y depende directamente de la porosidad del material y de la intercomunicación de sus poros.

En la Tabla 3.2 se presentan las propiedades físicas del agregado grueso empleado en el estudio, dichas propiedades se obtuvieron de acuerdo con las normas ASTM citadas anteriormente, los ensayos se realizaron en el laboratorio de Estructuras y Materiales de Instituto de Ingeniería de la UNAM.

**Tabla 3.2** Propiedades físicas del agregado grueso

Propiedades	Caliza (Banco Ejido Ignacio Zaragoza)
Tamaño máximo, mm (pulg)	9.5 (3/8")
Peso específico, seco	2.61
Peso específico, SSS	2.65
Absorción, %	1.35
Peso volumétrico seco (suelto), kg/m <sup>3</sup>	1395
Peso volumétrico seco (compactado), kg/m <sup>3</sup>	1597

En el ANEXO 3 se pueden observar detalladamente los resultados de peso volumétrico, absorción y peso específico correspondiente al agregado grueso empleado en el diseño y fabricación de las mezclas de concreto.

### 3.2.2 Agregado fino

Como agregado fino se empleó arena de origen andesítico proveniente de una mina del Estado de México (Santiago, Huixquilucán).

El diseño de las pruebas de laboratorio para los agregados se realizaron de acuerdo con las normas establecidas por la ASTM, la grava y la arena deben cumplir con los requisitos establecidos en la norma ASTM C 33.

Para el caso específico de la arena, las normas que rigen al agregado fino para pruebas de laboratorio son:

- Peso volumétrico seco suelto y compactado de la arena (determinado de acuerdo con la norma ASTM C 29)
- Humedad superficial del agregado fino de acuerdo con la ASTM C 566
- Densidad y absorción de la arena (determinadas de acuerdo con la norma ASTM C 128)
- Granulometría de la arena (realizada de acuerdo con la norma ASTM C 136)
- Módulo de finura del agregado fino (realizado de acuerdo con la norma ASTM C 125)

Otros requisitos de la norma ASTM son:

1. Que el agregado fino no tenga más del 45% retenido entre dos mallas consecutivas
2. Que el módulo de finura no sea inferior a 2.3 ni superior a 3.1

### 3.2.2.1 Análisis granulométrico y módulo de finura (ASTM C 136)

La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado tal como se determina por el análisis de tamices (Norma ASTM C 136), los ensayos se realizaron en el laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería-UNAM.

La granulometría de los agregados finos depende del tipo de trabajo, por ejemplo, para el diseño de una mezcla de concreto, en general si la relación agua/cemento se mantienen constantes y la relación agregado fino a grueso se elige correctamente, se puede tener un amplio rango de granulometría sin tener un efecto apreciable en la resistencia.

Otro parámetro importante en el diseño de un concreto es el módulo de finura, el cual es un índice de la finura del agregado, ya que entre mayor sea el módulo de finura, más grueso será el agregado. Diferentes granulometrías pueden tener igual módulo de finura. Este dato es útil para estimar las proporciones de los agregados finos y gruesos en las mezclas de concreto.

Para obtener la granulometría y módulo de finura (M.F) del agregado fino, se realizaron y analizaron 3 pruebas, en la Figura 3.2 se puede observar la curva granulométrica perteneciente a uno de los ensayos, en el ANEXO 2 se encuentran las curvas granulométricas de los tres ensayos. Para el caso del módulo de finura que se reporta en la Tabla 3.3 es el promedio de los tres ensayos realizados.

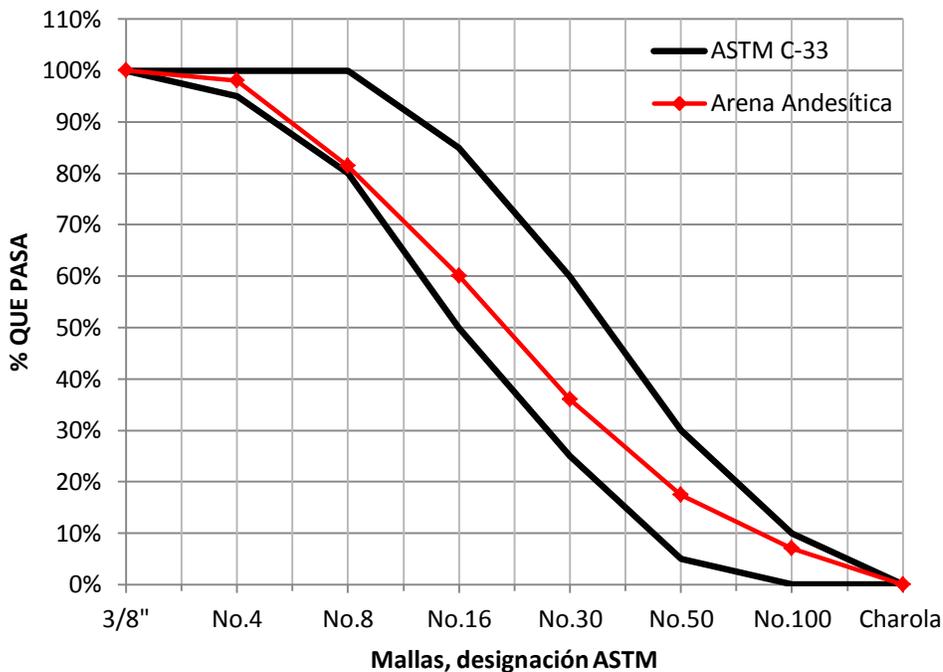


Fig. 3.2 Curva granulométrica del agregado fino

El contenido de finos en la arena está por arriba de los deseables (5% máximo), con una menor densidad y una mayor absorción, lo que implicará un mayor consumo de agua y de cemento para lograr la consistencia y relación A/C especificada.

### 3.2.2.2 Peso volumétrico (ASTM C 29), peso específico y absorción (ASTM C 128)

El **peso volumétrico** es la relación entre el peso de un material y el volumen ocupado por el mismo, expresado en kilogramos por metro cúbico. El ensayo se realizó bajo la norma ASTM C 29.

Existen dos valores para esta relación, dependiendo del sistema de acomodamiento que se le haya dado al material durante la prueba.

El peso volumétrico suelto: se usa invariablemente para la conversión de peso a volumen; es decir, para conocer el consumo de agregados por metro cúbico de concreto.

El peso volumétrico compactado: se usa para el conocimiento de peso y/o volumen de materiales apilados y que estén sujetos a asentamientos provocados por el tránsito sobre de ellos o por su transporte.

El **peso específico** es la relación entre el peso de un volumen dado de material saturado superficialmente seco y el peso del mismo volumen de agua destilada.

Este parámetro es necesario para el diseño de concreto. El ensayo se realizó en el laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería-UNAM, bajo la norma ASTM C 128.

La **absorción** se define como la cantidad de agua retenida por un material, después de estar sumergido en ella durante 24 horas y se expresa como un porcentaje del peso seco del material.

Esta prueba se realizó por la necesidad de conocer la humedad del agregado fino, para hacer ajustes en el agua de la mezcla del concreto con la finalidad de que ésta permanezca inalterable. El Ensayo se realizó bajo la norma ASTM C 128.

En la Tabla 3.3 se presentan las propiedades físicas del agregado fino empleado en el estudio, dichas propiedades se obtuvieron de acuerdo con las normas ASTM citadas anteriormente, los ensayos se realizaron en el laboratorio de Estructuras y Materiales de Instituto de Ingeniería de la UNAM. En el ANEXO 3 se pueden observar detalladamente los resultados de peso volumétrico, absorción y peso específico correspondiente al agregado fino empleado en nuestra investigación.

**Tabla 3.3** Propiedades físicas del arena

Propiedades	Santiago, Huixquilucán
Módulo de finura	3.10
Peso específico, seco	2.19
Peso específico, SSS	2.34
Absorción, %	6.79
Pasa la malla # 200, %	21.75
Peso volumétrico seco (suelto), kg/m <sup>3</sup>	1251
Peso volumétrico seco (compactado), kg/m <sup>3</sup>	1432

### 3.2.2.3 Pérdida por lavado, material que pasa por la malla No. 200 (ASTM C 117)

Este método cubre la determinación del material más fino que el tamiz No. 200 mediante pérdida por lavado, la realización de este ensaye se realizó conforme lo establecido en la norma ASTM C 117. El valor obtenido fue de 21.75%, este valor es el promedio de 3 ensayes realizados (ver ANEXO 4).

## 3.3 AGUA

La importancia de estudiar el agua para el concreto radica en que se pueden presentar impurezas, como azúcar, ácidos, materia vegetal y aceites que retardan o inhiben la hidratación. En general, el agua potable es adecuada para la elaboración del concreto; sin embargo, algunas aguas no aptas para el consumo humano se usan para elaborar concreto

En la investigación se empleó agua para el mezclado del concreto proveniente a la red de agua potable de la Ciudad de México; el agua para la fabricación de concreto debe satisfacer la norma NMX-C-122 “Agua para concreto” donde se establece las cantidades de impurezas máximas que son tolerables en el agua de mezclado en la elaboración del concreto.

## 3.4 ADITIVO

Para la fabricación de los concretos se empleó un aditivo químico para incrementar la fluidez de las mezclas, este aditivo plastificante está compuesto a base de lingosulfonatos (Pozzolith 322N), reductor de agua tipo A, según la norma ASTM C 494. En el ANEXO 5 se integran las fichas técnicas proporcionas por el fabricante sobre el aditivo empleado en la fabricación de las mezclas estudiadas.

## 3.5 FIBRA CORTA DE ACERO Y MACROFIBRA DE POLIPROPILENO

Para el estudio se emplearon dos tipos de fibras; de acuerdo con la clasificación realizada en el capítulo 2 de esta tesis son:

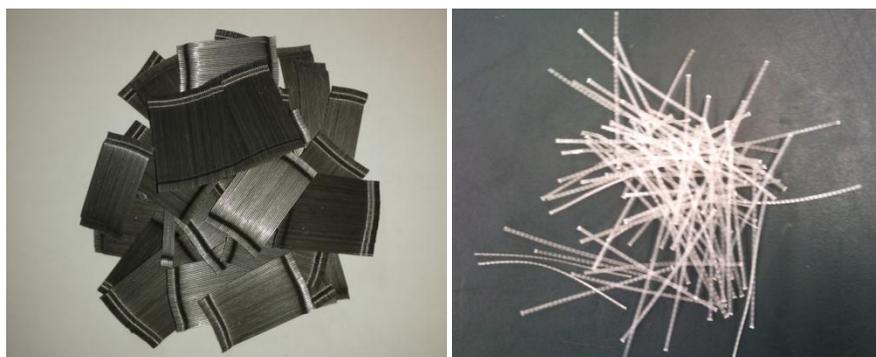
- La primera es una fibra natural de origen mineral; fibra metálica comúnmente conocida como fibra corta de acero por su tamaño y características.
- La segunda es una fibra sintética; fibra de polipropileno que por sus características y geometría se conoce como macrofibra de polipropileno.

Las fibras de acero son filamentos deformados, con extremos conformados y encolado en peines. Las macrofibras de polipropileno, es una fibra sintética de alto desempeño tipo estriada.

En la Tabla 3.4 se presentan las características obtenidas de las fibras usadas en el diseño y fabricación del concreto, el resultado reportado es el promedio obtenido al evaluar 100 fibras escogidas aleatoriamente, el análisis se realizó en el laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería-UNAM. En la Figura 3.3, se muestra la imagen de los dos tipos de fibra empleada en el estudio.

**Tabla 3.4** Características de las fibras

Tipo de fibra		L= longitud promedio, mm	d= diámetro promedio, mm	L/d	Peso, g/mm	Fibras/kg
Fibra corta de acero	Dramix-BEKAERT (RC 65/35 BN)	35.5	0.55	64.5	0.0020	14 331
Macrofibra sintética de polipropileno	MasterFiber MAC Matrix-BASF	53.1	0.96	55.3	0.0008	22 867



**Fig. 3.3** Fibras empleadas en el estudio; a la izquierda fibra corta de acero, a la derecha macrofibra de polipropileno

La fibra corta de acero tiene distintos usos, se emplea en el revestimiento de túneles (concreto lanzado, dovelas), estabilización de taludes, pisos industriales, pavimentos y elementos prefabricados o colados en obras. Las macrofibras de polipropileno proporcionan excelente acabado en aplicaciones del concreto lanzado, pisos industriales y paredes prefabricadas de bajo espesor, proporcionando un óptimo desempeño en ambientes corrosivos. Ambas se utilizan para sustituir eficientemente el refuerzo por temperatura a base de malla electrosoldada, además, las fibras proporcionan un incremento en la durabilidad e integridad del concreto. En el ANEXO 6 se integran las fichas técnicas proporcionadas por los fabricantes de cada tipo de fibra.



La calidad del concreto depende de la calidad de los agregados, la pasta y la adherencia entre ambos. La cantidad de agua usada afecta en gran medida la calidad de la pasta: normalmente, a mejor calidad de pasta, mejor calidad del concreto.

Por lo general se especifica una relación agua/cemento máxima, para evitar el exceso de agua y asegurar una buena calidad de pasta. Sin embargo, un elemento importante en la contracción del concreto es el contenido de agua, cuanto mayor sea el contenido de agua de un concreto, tenderá a contraerse más. Por lo tanto se deberán realizar el proporcionamiento de las mezclas con la menor cantidad de agua posible por metro cúbico de concreto, considerando que uno de los problemas que se busca resolver es el del agrietamiento en las estructuras por contracción.

Las proporciones del diseño de la mezcla del concreto se diseñarán por volúmenes absolutos, siguiendo el esquema de la Figura 4.1, al proporcionamiento de la mezcla testigo se le añadirán el volumen de fibras correspondiente a la mezcla en estudio. La mezcla testigo (sin fibra), servirá de parámetro de comparación.

#### **4.1.1 Elección de las características de la mezcla**

Antes de que se pueda determinar las proporciones de la mezcla, se seleccionan sus características, considerándose el uso que se propone dar al concreto, las condiciones de exposición, tamaño y forma de los elementos y las propiedades físicas del concreto (tales como resistencia a la congelación y resistencia mecánica) requeridas para la estructura. Las características deben reflejar las necesidades de la estructura, por ejemplo, se debe verificar la resistencia a la penetración de los iones cloruros y se deben especificar los métodos de ensayos apropiados para caracterizar su desempeño.

Después de que se hayan elegido las características, se puede proporcionar la mezcla a partir de datos de campo o de laboratorio. Como la mayoría de las propiedades deseadas en el concreto en estado endurecido dependen principalmente de la calidad de la matriz cementante (pasta), la primera etapa para el proporcionamiento del concreto es la elección de la relación agua/cemento apropiada para la resistencia y durabilidad necesarias. Las mezclas de concreto se deben mantener lo más sencillas posible, pues un número excesivo de ingredientes normalmente dificulta el control del concreto. Sin embargo, el especialista en concreto no debe descuidar la moderna tecnología del concreto.

## **4.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS ESTUDIADAS**

Para la fabricación de las mezclas de concreto se utilizó agregado grueso de origen calizo de 3/8" de tamaño máximo, arena andesítica, cemento Portland compuesto resistente a los sulfatos (CPC 40 RS) y dos diferentes tipos de fibra (fibra corta de acero y macrofibra sintética de polipropileno). En total se fabricaron ocho mezclas; una sin fibra (mezcla testigo), tres con fibras cortas de acero para porcentajes volumétricos de 0.51, 0.76 y 1.02% (40, 60 y 80 kg/m<sup>3</sup>) y cuatro con macrofibras

de polipropileno para porcentajes volumétricos de 0.25, 0.51, 0.76 y 1.02% (2.3, 4.6, 7.0 y 9.3 kg/m<sup>3</sup>).

Las cantidades de cemento, agua y agregados se mantuvieron constantes variando únicamente el porcentaje de fibra y el contenido de aditivo, para las mezclas con un porcentaje volumétrico de fibra de 1.02%, se incrementó de 2000 a 3000 ml/m<sup>3</sup>. El proporcionamiento base tuvo un consumo de cemento de 428 kg/m<sup>3</sup>, una relación agua/cemento de 0.5 y el porcentaje del volumen absoluto para los agregados fue de 52% para la grava y de 48% para la arena.

En la Tabla 4.1 se muestra de forma resumida la dosificación por m<sup>3</sup> de cada uno de los componentes empleados para la fabricación de cada mezcla.

**Tabla 4.1** Dosificación por m<sup>3</sup> de cada una de las mezclas fabricadas

Mezclas		Materiales						
		Consumo por m <sup>3</sup>						
Tipo de fibra	Nomenclatura	Fibra	Cemento	Grava Caliza	Arena Andesítica	Agua	Pozzoloth 322N	Relación A/C
		Kg	Kg	Kg	kg	kg	l	
Sin fibra	M1	0	428	855	662	214	2000	0.5
Fibra corta de acero	M2	40	428	855	662	214	2000	0.5
	M3	60	428	855	662	214	2000	0.5
	M4	80	428	855	662	214	3000	0.5
Macrofibra sintética de Polipropileno	M5	2.3	428	855	662	214	2000	0.5
	M6	4.6	428	855	662	214	2000	0.5
	M7	7.0	428	855	662	214	2000	0.5
	M8	9.3	428	855	662	214	3000	0.5

#### 4.2.1 Dosificación de las fibras de acero y de polipropileno

Se elaborará una mezcla testigo sin fibras y a partir de ésta se agregarán diversas dosificaciones de fibras. En la Tabla 4.2 se muestra la cantidad de fibras agregadas en cada una de las mezclas, el porcentaje volumétrico correspondiente, la relación de aspecto de la fibra (L/d) y su volumen por relación de aspecto (parámetro W L/d).

La mezcla M2 y la M6 incluyen un porcentaje volumétrico de fibra de 0.51, la M3 y la M7 de 0.76, la M4 y la M8 de 1.02%, mientras que la M5 tiene un porcentaje de 0.25%.

**Tabla 4.2** Contenido de fibras en la mezcla

Tipo de fibra	Mezcla	Consumo kg/m <sup>3</sup>	Volumen (W), %	L/d	Parámetro W L/d
Sin fibra	M1	0	0	0	0
Fibra corta de acero	M2	40	0.51	64.5	33
	M3	60	0.76	64.5	49
	M4	80	1.02	64.5	66
Macrofibra sintética de polipropileno	M5	2.3	0.25	55.3	14
	M6	4.6	0.51	55.3	28
	M7	7.0	0.76	55.3	42
	M8	9.3	1.02	55.3	56

Para las mezclas M2 a M4 se empleó fibra corta de acero, mientras que para las mezclas M5 a M8 se usó macrofibra de polipropileno, las características de cada fibra se muestran en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3** Características de la fibra

Tipo de fibra		L= longitud promedio, mm	d= diámetro promedio, mm	L/d	Peso, g/mm	Fibras/kg
Fibra corta de acero	Dramix-BEKAERT (RC 65/35 BN)	35.5	0.55	64.5	0.0020	14 331
Macrofibra sintética de polipropileno	MasterFiber MAC Matrix-BASF	53.1	0.96	55.3	0.0008	22 867

Cabe señalar que las fibras de acero tienen dobleces en los extremos que incrementa su resistencia a la extracción de la matriz cementante, las macrofibras de polipropileno son 49% más largas que las de acero, y son de tipo estriada.

### 4.3 SECUENCIA DE MEZCLADO

El concreto deberá ser mezclado de modo que el cemento, agua, agregados, aditivos y adiciones se combinen en una mezcla uniforme. El mezclado y preparación del concreto correspondiente a cada mezcla se realizará en tres tandas, por la capacidad de la mezcladora, donde se evitará incorporar variables o condicionantes adicionales relacionadas con la manipulación y dosificación de los materiales, preparación y vaciado de la mezcla.

Las fibras tanto metálicas como sintéticas pueden venir empacadas, de manera suelta, en peines, o en bolsas degradables que pueden agregarse a la mezcla en la planta de dosificación o echarse al camión revolvedor en el lugar de la obra. Sin embargo, se recomiendan agregar las fibras en una planta de dosificación confiable, al menos por dos razones: primero, se proporciona una medida adicional de control; y segundo, es muy importante que las fibras se mezclen por lo menos de dos a cinco minutos, algo que no siempre es posible en el lugar de la obra. La agitación mecánica apropiada asegura la separación de las fibras, eliminando virtualmente la formación de bolas de

fibras en el concreto. También distribuye las fibras de una manera completa y uniforme en toda la mezcla.



**Fig. 4.2** Ejemplo: mezcla de concreto reforzado con fibras de polipropileno “M5”, con un consumo  $2.3 \text{ kg/m}^3$

Con fines de obtener una muestra de concreto reforzado con fibras perfectamente integrada, el mezclado se realizará bajo el siguiente proceso:

- 1) Preparación de la revolvedora con una lechada de cemento, arena y agua con la misma proporción que la mezcla de diseño, mezclado hasta lograr el recubrimiento total de la superficie interna del tambor, posteriormente se desecha el sobrante.
- 2) Dosificación y homogeneización de los agregados en el siguiente orden: agregado grueso, agregado fino y cantidad de agua de absorción, mezclado durante un minuto.
- 3) Incorporación del cemento.
- 4) Adición del 60% del agua restante y mezcla de todos los componentes.
- 5) Incorporación del resto del agua y mezclado durante dos minutos.
- 6) Se deja reposar la mezcla por un minuto, tapando la boca de la revolvedora con una jerga húmeda, para evitar evaporación de agua; se realiza este proceso con el fin de evitar el fraguado falso.
- 7) Reiniciar el mezclado y dosificar la cantidad de aditivo correspondiente a la mezcla, mezclado dos minutos.
- 8) Incorporación de las fibras y mezclado durante tres minutos.

En el caso de la fabricación de la mezcla testigo se elimina el paso 8). Todas las mezclas fueron fabricadas en tres tandas, empleando una revolvedora con capacidad de 90 litros.

#### 4.4 FABRICACIÓN Y CURADO DE LOS ESPECÍMENES

La fabricación de los especímenes para las diversas pruebas, se realizará de acuerdo con la norma ASTM C 192 (especímenes fabricados en laboratorio), la cual cubre los requisitos para moldes y para la elaboración y curado de especímenes.

Los moldes empleados para la fabricación de los especímenes deberán ser de materiales no absorbentes y deben cumplir con los requisitos de capacidad de absorción y tolerancia en sus dimensiones (ASTM C 470).



**Fig. 4.3** Especímenes recién moldeados

Para cada una de las mezclas fabricadas se realizarán vigas prismáticas 15 x 15 x 60 cm para los ensayos de tenacidad. Se fabricarán también, probetas cilíndricas de 15 x 30 cm para medir la resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y relación de Poisson, resistencia a tensión, abrasión, impacto y permeabilidad al agua. Además se fabricarán especímenes cilíndricos de 10 x 20 cm para la prueba de flujo plástico, especímenes prismáticos de 7.5 x 7.5 x 25 cm para determinar la contracción por secado y especímenes de 20 x 44 x 10 cm para determinar la resistencia a cortante.

El vibrado de las probetas (especímenes), se realizó por medio de vibración externa mediante una mesa vibradora, cada espécimen fue moldeado en tres capas y vibrado en cada una de ellas, posteriormente son enrasados.

Las probetas se mantienen en sus moldes por 24 horas y posteriormente se desmoldan y se introducen a la cámara de curado durante 28 y 90 días de acuerdo con el programa de ensaye, a una temperatura y humedad controlada.

#### **4.5 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Para cada una de las ocho mezclas de concreto realizadas en estado fresco se les determinó:

<b>Ensayo al concreto en estado fresco</b>	
a)	Revenimiento
b)	Contenido de aire atrapado
c)	Peso volumétrico
d)	Cono invertido (tiempo de desplazamiento)
e)	Índice de agrietamiento por contracción plástica

Después de permanecer durante 28 días y otras hasta 90 días dentro de la cámara de curado a una temperatura y humedad controlada, los especímenes elaborados con cada una de las mezclas se ensayaron para determinar las siguientes propiedades del concreto:

Ensayo al concreto en estado endurecido	Edad de ensaye, días	
	28	90
a) Resistencia a compresión	X	X
b) Módulo de elasticidad y relación de Poisson	X	
c) Resistencia a tensión por compresión diametral	X	
d) Resistencia a cortante	X	
e) Resistencia a la abrasión	X	X
f) Resistencia al impacto	X	
g) Permeabilidad al agua	X	X
h) Tenacidad	X	
i) Contracción por secado*	X	
j) Flujo plástico (CREEP)*	X	

\*Estos ensayos se realizan a los 28 días pero la obtención de los datos se recaba en un tiempo mínimo a 180 días después de haber iniciado el ensaye.

El número de ensayos realizados a cada una de las mezclas en estado fresco empleadas en el estudio se muestra a continuación:

Ensayo al concreto en estado fresco	Número de ensayos		
	Tanda 1	Tanda 2	Tanda 3
a) Revenimiento*	3	3	3
b) Contenido de aire atrapado	--	--	1
c) Peso volumétrico	--	--	1
d) Cono invertido (tiempo de desplazamiento)	1	1	1
e) Índice de agrietamiento por contracción plástica	--	--	3

\*Para cada tanda el revenimiento se obtuvo: antes de agregar el aditivo a la mezcla, una vez incorporando y por último después de dosificar la fibra a la mezcla.

Se programaron para cada una de las pruebas en estado endurecido un mínimo de 3 ensayos por mezcla para ambas edades con el fin de obtener el valor promedio y su dispersión; a continuación se presenta el número de ensayos:

Ensayos al concreto en estado endurecido		Número de especímenes ensayados	
		Edad de ensaye, días	
		28	90
a)	Resistencia a compresión	3	3
b)	Módulo de elasticidad y relación de Poisson	3	
c)	Resistencia a tensión por compresión diametral	3	

d)	Resistencia a cortante	3	
e)	Resistencia a la abrasión	4	4
f)	Resistencia al impacto	3	
g)	Permeabilidad al agua	4	4
h)	Tenacidad	3	
i)	Contracción por secado	3	
j)	Flujo plástico (CREEP)	4	

En el capítulo 5; se describe los ensayos y variables a considerar para cada una de las pruebas programadas que se mencionaron de forma resumida anteriormente.

## 5. TERCERA FASE DE LA INVESTIGACIÓN: PRUEBAS DE LABORATORIO A REALIZAR

### 5.1 CONSIDERACIONES

La estructura del concreto no es homogénea, y en consecuencia no es isotrópica, es decir no mantiene las mismas propiedades en diferentes direcciones. Esto se debe principalmente a los diferentes materiales que lo componen y a su variabilidad individual de cada uno de ellos, al proceso de elaboración y al acomodo aleatorio de los diferentes componentes durante su estado frasco hasta su estado endurecido.

Las propiedades del concreto dependen en gran parte del acomodo de estos materiales en la estructura del concreto, y de la porosidad o sistema de vacíos que se forme en ese acomodo.

El presente trabajo se basó en comparar las propiedades de las distintas mezclas de concreto estudiadas, por lo que se realizaron pruebas de laboratorio las cuales permiten medir algunas propiedades del concreto en estado fresco y en estado endurecido.

Como se menciona en el capítulo 4, para la fabricación de las mezclas de concreto se utilizó agregado grueso de origen calizo de 3/8" de tamaño máximo, arena andesítica, cemento Portland compuesto resistente a los sulfatos (CPC 40 RS) y dos diferentes tipos de fibra (fibra corta de acero y macrofibra sintética de polipropileno). En total se fabricaron ocho mezclas; una sin fibra (mezcla testigo), tres con fibras cortas de acero para porcentajes volumétricos de 0.51, 0.76 y 1.02% (40, 60 y 80 kg/m<sup>3</sup>) y cuatro con macrofibras de polipropileno para porcentajes volumétricos de 0.25, 0.51, 0.76 y 1.02% (2.3, 4.6, 7.0 y 9.3 kg/m<sup>3</sup>).

Las cantidades de cemento, agua y agregados se mantuvieron constantes variando únicamente el porcentaje de fibra y el contenido de aditivo; para las mezclas con un porcentaje volumétrico de fibra de 1.02% se incrementó de 2000 a 3000 ml/m<sup>3</sup>. El proporcionamiento base tuvo un consumo de cemento de 428 kg/m<sup>3</sup>, una relación agua/cemento de 0.5 y el porcentaje del volumen absoluto para los agregados fue de 52% para la grava y de 48% para la arena.

### 5.2 CONCRETO EN ESTADO FRESCO

Una de las características del concreto en estado fresco antes de fraguar es la trabajabilidad la cual se define como la mayor o menor dificultad para el mezclado, transporte, colocación y compactación del concreto. Está influenciada por la pasta, el contenido de agua y el equilibrio adecuado entre gruesos y finos, que produce en el caso óptimo una suerte de continuidad en el desplazamiento natural y/o inducido de la masa de concreto. La facilidad de aplicación se define principalmente por la consistencia, que varía por la cantidad de agua que contiene el concreto.

### 5.2.1 Revenimiento

La prueba se realiza para el control de calidad en todo momento; en la fase de diseño preliminar y final en laboratorio, en las plantas de concreto y como inspección de entrada o fabricación del concreto en las obras de construcción.

Cuando se trabajan con concretos reforzados con fibras (CRF) la prueba de revenimiento es una prueba común y conveniente, pero puede que al inicio no sea un buen indicador de la trabajabilidad para CRF. Sin embargo, una vez que se ha establecido que una mezcla de CRF particular es satisfactoria por su fácil manipulación y colocación, la prueba de revenimiento puede ser utilizada como una prueba de control de calidad para controlar la consistencia CRF.

Para medir la trabajabilidad de las mezclas se utilizó la prueba de revenimiento, o asentamiento en el cono de Abrahams, la prueba se hizo siguiendo la norma ASTM C 143. A las ocho mezclas fabricadas se les determinó el revenimiento del concreto antes de incorporar el aditivo; posteriormente, con la incorporación del aditivo y, por último con la inclusión de la fibras. El objetivo de la prueba consistió en determinar como la adición del tipo y cantidad de fibra influyen en la trabajabilidad del concreto.

En la Figura 5.1 la prueba del revenimiento realizada a una de nuestras mezclas estudiadas en el laboratorio.



**Fig. 5.1** Prueba de revenimiento realizada a una mezcla de CRF de Polipropileno

El concreto que tiene un revenimiento alto obtenido por alto consumo de agua, no sólo es poco resistente a la compresión sino también muestra una segregación muy grande de materiales, además de una serie de desventajas, como el aumento de sangrado, la reducción de impermeabilidad por la formación de una membrana acuosa en la superficie inferior de los agregados y el incremento de la contracción por secado.

### 5.2.2 Contenido de aire y peso volumétrico

Para cada una de las ocho mezclas se determinó el contenido de aire y el peso volumétrico. La prueba de contenido de aire se realiza de acuerdo con la norma ASTM C 231 y se basa en la medición del cambio de volumen del concreto sometido a un cambio de presión; mientras que la prueba de peso volumétrico se realiza conforme la norma ASTM C 138.



**Fig. 5.2** Equipo empleado para obtener el contenido de aire y peso volumétrico del concreto

En la Figura 5.2, se muestra el tipo de dispositivo que sirve para determinar el contenido de aire en la mezcla. Para determinar el peso volumétrico se utiliza el llenado del recipiente que se emplea en la prueba de contenido de aire.

En este caso, cuando se hace el llenado del recipiente, se pesa, se obtiene el peso neto de concreto fresco y este se divide entre el volumen del recipiente, obteniendo así el peso volumétrico del concreto en estado fresco.

### 5.2.3 Cono invertido

Esta prueba ha sido desarrollada específicamente para medir la viabilidad del concreto reforzado con fibras (CRF) en estado fresco. Se mide de manera efectiva la movilidad o fluidez del concreto bajo vibración interna. Esta prueba no es recomendable para mezclas fluidas de CRF, debido a que el concreto tiende a correr a través del cono sin vibración.

Se ha demostrado que para un mismo revenimiento en el Cono de Abrams, el tiempo necesario de vibrado en el Cono Invertido de un concreto reforzado con fibras metálicas es menor que el de un concreto convencional; la naturaleza exacta varía de un concreto a otro dependiendo del tamaño

máximo del agregado grueso, volumen de fibra adicionada, tipo de fibra, relación de aspecto y sobre todo del contenido de aire.

Esta prueba se llevó a cabo para las ocho mezclas estudiadas siguiendo la norma ASTM C 995. Para los concretos reforzados con fibras, el método de prueba resulta conveniente para el control de calidad tanto en laboratorio como en obra. En la Figura 5.3 se puede observar la configuración del ensayo.

El método de ensaye consiste en usar el cono de Abrams empleado en la prueba de revenimiento (ASTM C 143); el cual se humedece, fija y coloca de forma invertida sobre un recipiente prismático con una capacidad de 30 litros, entre el fondo del recipiente y el cono debe haber una separación de 10 cm. De la muestra obtenida se llena el cono en tres capas, cada capa representa un tercio del volumen del cono y debe ser nivelada con una cuchara evitando algún tipo de compactación, en la última capa se retiran las fibras que sobresalen con la mano y se enrasa con la varilla usada en la prueba de revenimiento. Se coloca de forma centrada y vertical el elemento vibratorio en la parte superior del cono y se deja descender sin interrupción a una velocidad de entre 3 y 4 segundos al fondo del recipiente, al mismo tiempo con un cronómetro se toma el tiempo que tarda en desplazarse la mezcla; el cronómetro se detiene cuando es visible una abertura en la parte inferior del cono, el elemento vibrador en ningún momento debe tocar las paredes del cono.



**Fig. 5.3** Configuración del método de prueba cono invertido empleado para evaluar los las mezclas de CRF estudiadas

La ventaja de la prueba de cono invertido sobre el ensayo del revenimiento es que toma en cuenta el desplazamiento del concreto, que se produce a causa de la vibración. El objetivo principal de esta prueba es determinar la trabajabilidad de los concretos con fibras, cuando la consistencia de la mezcla hace no aplicable la prueba de revenimiento.

#### 5.2.4 Índice de agrietamiento por contracción plástica

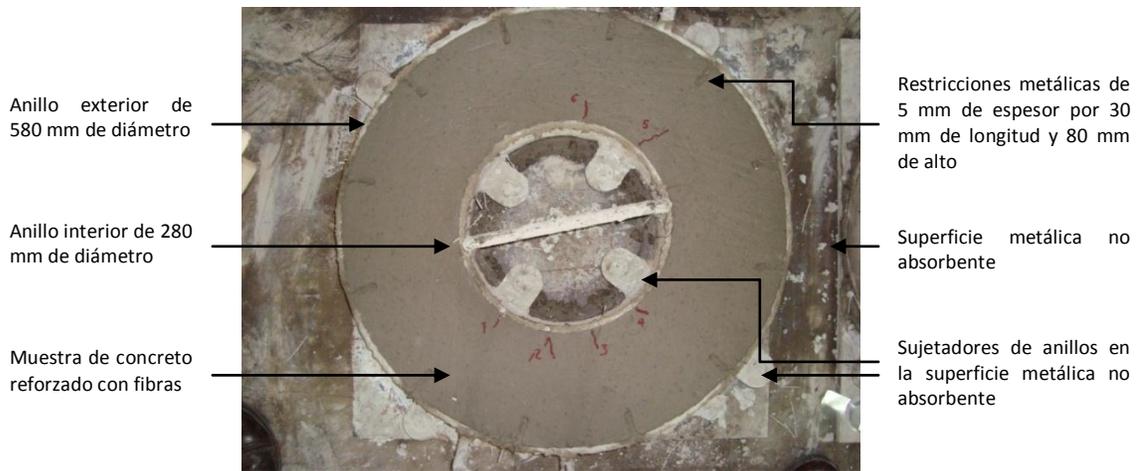
Las grietas por contracción plástica se forman en la superficie del concreto fresco inmediatamente después de ser colocado y mientras permanece en estado plástico. Estas grietas aparecen fundamentalmente en las superficies horizontales. Cuando altas tasas de evaporación provocan que la superficie del concreto se seque antes de que haya fraguado, es muy probable que ocurra el agrietamiento por contracción plástica; la condición crítica existe cuando la tasa o velocidad de evaporación de la humedad superficial excede la tasa del agua de sangrado que sube a la superficie.

El agua que se encuentra por debajo de la superficie del concreto forma un menisco entre las partículas del cemento y agregados causando una fuerza de tensión que se desarrolla en las capas superficiales. Si la superficie del concreto ha comenzado a fraguar y ha desarrollado suficiente resistencia a la tensión para resistir dichas fuerzas, no se forman las grietas. Si la superficie se seca muy rápidamente, el concreto puede permanecer plástico y las grietas no se desarrollan en ese momento, pero se formarán seguramente tan pronto como el concreto se endurezca un poco más. La incorporación de un refuerzo de fibras sintéticas en la mezcla de concreto puede ayudar a resistir la tensión cuando el concreto es aún muy frágil.

Cualquier factor que retrase el fraguado incrementa la posibilidad del agrietamiento por contracción plástica. El fraguado retardado puede ser consecuencia de uno o más de los siguientes factores: alto contenido de agua, bajos contenidos de cemento, retardadores del fraguado, algunos reductores de agua y adiciones de materiales cementantes.

Para llevar a cabo la prueba de contracción plástica se siguieron las recomendaciones y referencias del ACI 544.2R (“Measurements of Properties of Fiber Reinforced Concrete”) y Dahl (Dahl, 1985). La prueba consiste en fabricar anillos, y someterlos a un flujo de viento de 4 m/s que se hace pasar por un túnel de viento (hecho con unicele y lámina de policarbonato) en un ambiente controlado a una temperatura de 20°C y una humedad relativa de 40%.

La prueba se basa en usar anillos de 80 mm de altura y diámetros interior y exterior de 280 y 580 mm, respectivamente, montados sobre una superficie metálica no absorbente. El molde metálico sobre el cual se fabrica el espécimen tiene 12 restricciones metálicas colocadas simétricamente sobre el anillo metálico exterior. Las dimensiones de las restricciones son de 5 mm de espesor por 30 mm de longitud y 80 mm de altura. En la Figura 5.4 se observa uno de los especímenes empleados para obtener el índice de grieta del concreto reforzado con fibras.



**Fig. 5.4** Anillo y espécimen empleado para la prueba de contracción plástica

Para fabricar los especímenes de esta prueba, los anillos se moldean en una sola capa, posteriormente se compacta la mezcla de concreto con una mesa vibradora durante 15 segundos. La prueba consiste en monitorear la aparición de grietas sobre la superficie del concreto; desde la aparición de la primera hasta que ya no se presentan mayor cantidad de ellas o hasta que se detiene el desarrollo de las mismas.

En nuestro caso, para poder comparar los resultados de las ocho mezclas de concreto reforzado con fibras, se estandarizó el tiempo de ensaye con una duración de 6 horas, en la Figura 5.5 se puede observar la configuración de la prueba.



**Fig. 5.5** Configuración para realizar la prueba de contracción por seco

## 5.3 CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

La elaboración de concreto pasa por varias etapas y estados, que se deben tener en cuenta para desarrollar propiedades que le permitan alcanzar los estándares de calidad requeridos. Las propiedades del concreto endurecido más importantes son la resistencia mecánica y la durabilidad.

El concreto en estado endurecido después de su fraguado empieza a adquirir sus propiedades por esto es necesario hacer sus pruebas después de los 28 días de elaborado, aunque en ocasiones es necesario realizar los ensayos a edades de 3, 7 y 14 días, o antes dependiendo de la finalidad del estudio.

### 5.3.1 Resistencia a compresión

La resistencia mecánica del concreto frecuentemente se identifica con su resistencia a compresión, porque ésta representa la condición de carga en que el concreto exhibe mayor capacidad para soportar esfuerzos.

Es la medida de la resistencia del concreto a la carga axial, es decir, es la capacidad de carga a compresión por unidad de área del concreto hidráulico, sus unidades son  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . Depende principalmente de la concentración de la pasta que se expresa en términos de la relación agua/cemento. Influye también la calidad de los agregados, el grado de compactación de la mezcla y las condiciones de curado.

Para determinar la resistencia a compresión del concreto reforzado con fibras se usa el método de prueba que establece la norma ASTM C 39, misma que se utiliza para el concreto convencional. Para esta prueba se fabricaron especímenes cilíndricos de concreto de 150 x 300 mm (6 x 12 pulgadas), moldeados en tres capas y compactados por medio de vibración externa durante 15 segundos. Cuando se trabaja con CRF se recomienda para la fabricación de especímenes usar una vibración externa, ya que un vibrador interno puede influir en la distribución y alineación aleatoria de la fibra (ACI544.2R C. , 1989).

Después de 24 horas de ser colados los especímenes, se desmoldan e identifican; posteriormente son introducidos a una cámara de curado a una temperatura y humedad controlada, donde permanecen hasta la edad de ensayo, tal como lo establece la norma ASTM C 192; en este caso fue 28 y 90 días. Previamente a la prueba cada espécimen se mide y se pesa antes de realizar el cabeceo; este procedimiento se lleva a cabo de acuerdo con la norma ASTM C 617, el objetivo es eliminar defectos que puedan producir concentraciones de esfuerzos en el espécimen que propicie que falle de manera irregular (Figura 5.6).



**Fig. 5.6** A la izquierda prensa universal modelo SATEC utilizada, a la derecha espécimen de CRF listo para hacer ensayo

La prueba consiste en aplicar una carga axial de compresión creciente hasta su ruptura (falla del espécimen); la resistencia a compresión del concreto resulta de la carga máxima alcanzada dividida entre la sección transversal del espécimen. El método de prueba ASTM C 39, establece que el ensayo se realice aplicando los esfuerzos a compresión a una velocidad entre 1.5 y 3.5 kg/cm<sup>2</sup>/s, lo cual representa una velocidad de aplicación de carga entre 16 y 38 toneladas por minuto, para las pruebas se ocupó una velocidad de ensayo de 25 t/min empleando una prensa universal modelo SATEC (Figura 5.6) con capacidad de 250 t.

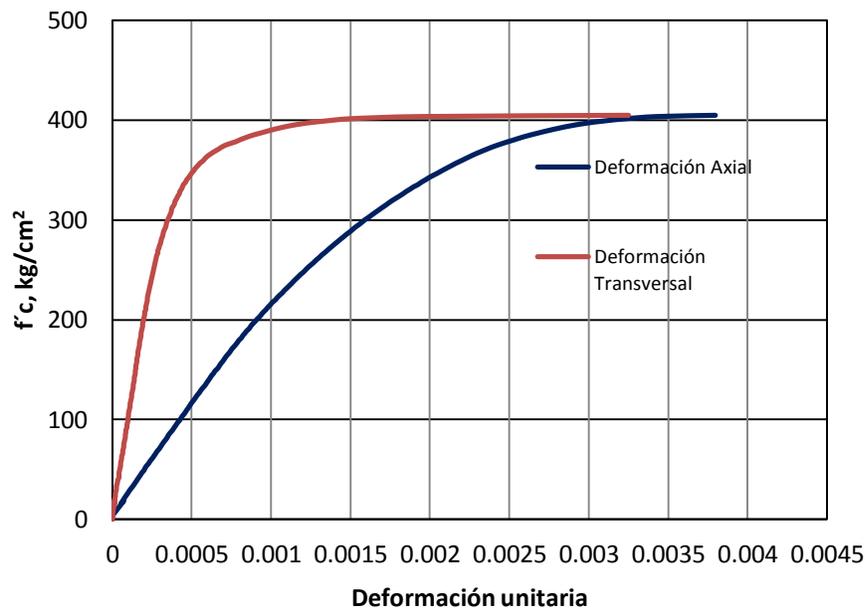
### 5.3.2 Módulo de elasticidad y relación de Poisson

El **módulo de elasticidad** se define como la pendiente de la curva esfuerzo vs deformación unitaria en compresión. Su valor está asociado a la resistencia a compresión, varía con la  $\sqrt{f'_c}$ . Para comparar el módulo de elasticidad de los concretos reforzados con fibras se hicieron ensayos a 28 días, para cada ensayo se fabricaron 3 probetas cilíndricas de 150 x 300 mm. Los ensayos se hicieron siguiendo la norma ASTM C 469; para determinar el módulo elástico se lleva a cabo 5 precargas hasta un nivel de 40% de la carga de rotura de los cilindros ensayados en la prueba de compresión, finalmente, en la última carga se lleva la prueba a la falla. Se utilizó una prensa universal de 250 toneladas de capacidad y la velocidad de carga aplicada fue de 25 ton/min. Se utilizó un compresómetro con transductores de desplazamiento tipo LVDT con rango  $\pm 25$  mm para el registro de las deformaciones axiales y transversales (Figura 5.7). Para la adquisición de datos se utilizó un sistema de captura multicanal TDS-302 conectado por un puerto a una computadora.



**Fig. 5.7** Configuración para realizar la prueba de módulo de elasticidad del concreto reforzado

Con los datos de deformaciones axiales y transversales obtenidos en las pruebas, se calcularon los esfuerzos y deformaciones unitarias para trazar la curva esfuerzo-deformaciones unitarias, en la Figura 5.8 se muestra la curva obtenida para la mezcla M3 que tiene un consumo de  $60 \text{ kg/m}^3$  de fibra corta de acero. El módulo de elasticidad se calculó con la pendiente de la recta que pasa por el 40% del esfuerzo máximo y la deformación unitaria correspondiente a 50 millonésimas.



**Fig. 5.8** Curva esfuerzo-deformación unitario de un espécimen fabricado con concreto reforzado con fibra corta de acero (consumo de fibra  $60 \text{ kg/m}^3$ )

Con las deformaciones axiales y trasversales obtenidas en la prueba de módulo de elasticidad del concreto se puede obtener la relación de Poisson. La **relación de Poisson** es la relación entre la deformación transversal que se genera cuando el espécimen se deforma debido a una carga axial, y la deformación axial. Se calcula dividiendo la pendiente de la recta de las deformaciones

unitarias transversales, dentro de los mismos rangos del módulo de elasticidad, entre el módulo de elasticidad calculado.

### 5.3.3 Resistencia a tensión por compresión diametral

La resistencia a la tensión siempre se ha relacionado con la resistencia a la compresión, como se hace con la mayoría de las otras propiedades del concreto; se relaciona con la raíz cuadrada de la resistencia a compresión  $\sqrt{f'c}$ . En concretos convencionales de cemento portland la relación varía entre 1.33 y 1.99, esto es entre un 8% y 10 % de la resistencia a la compresión.

Para estudiar la resistencia a tensión indirecta por compresión diametral se realizaron pruebas a 28 días, para cada ensayo se fabricaron 3 especímenes cilíndricos de 150 x 300 mm. Las pruebas de resistencia a tensión por compresión diametral (prueba brasileña) se realizaron de acuerdo con la norma ASTM C 496. Se utiliza el mismo equipo empleado en las pruebas de resistencia a compresión, y la velocidad de aplicación de carga es de 7 t/min. Antes de iniciar la prueba los especímenes son pesados, medidos y trazados.



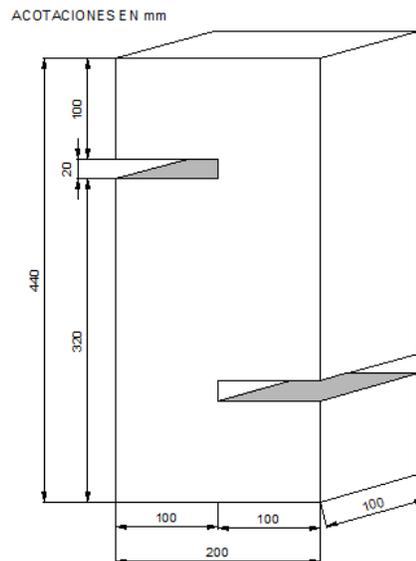
**Fig. 5.9** Configuración de la prueba para obtener la resistencia a tensión por compresión diametral (prueba brasileña), espécimen correspondiente a la mezcla de CRFA con un consumo de fibra de 40 kg/m<sup>3</sup>

La prueba consiste en ensayar los especímenes cilíndricos en posición horizontal, sometiéndolos a la acción de dos fuerzas opuestas de compresión uniformemente distribuidas a lo largo de las generatrices contenidas en su plano vertical de simetría, Figura 5.9. A fin de reducir la concentración de esfuerzos de compresión que se puede generar por la irregularidades a lo largo de las generatrices en que se aplican las cargas, se colocan dos tiras de material compresible (Triplay de madera de 3 mm de espesor) entre la superficie de concreto del espécimen y las placas que transmiten la carga, para evitar la ruptura del concreto por aplastamiento en la zona de contacto, consiguiendo que el espécimen falle por efecto de los esfuerzos de tensión.

### 5.3.4 Resistencia a cortante

En la actualidad no existe un método de prueba normalizado para determinar la resistencia a cortante del concreto reforzado con fibras. Por este motivo diversos investigadores han propuesto diferentes tipos de probetas y ensayos que tienen por objetivo producir esfuerzos de corte en un plano de falla inducido (normalmente cortando las probetas), empleando barras y cargas de compresión (Barragán, Gettu, Agullo, & Zerbino, 2006). Actualmente existe un gran interés en determinar la respuesta del concreto reforzado con fibras frente a esas condiciones de carga.

Para llevar a cabo las pruebas y determinar la resistencia a cortante de las mezclas en estudio de CRF, se diseñó un molde que permitiera obtener el espécimen como se requería para la prueba sin necesidad de realizar algún tipo de habilitado o corte, el resultado fue un espécimen prismático rectangular de 200 x 440 x 100 mm con los detalles tal y como lo muestra la Figura 5.10. Los especímenes prismáticos se moldearon en dos capas, el compactado se realizó por medio de vibración externa, empleando una mesa vibradora durante aproximadamente 10 segundos. Es preferible usar una vibración externa, ya que un vibrador interno puede influir en la distribución aleatoria y la alineación de las fibras de acero.

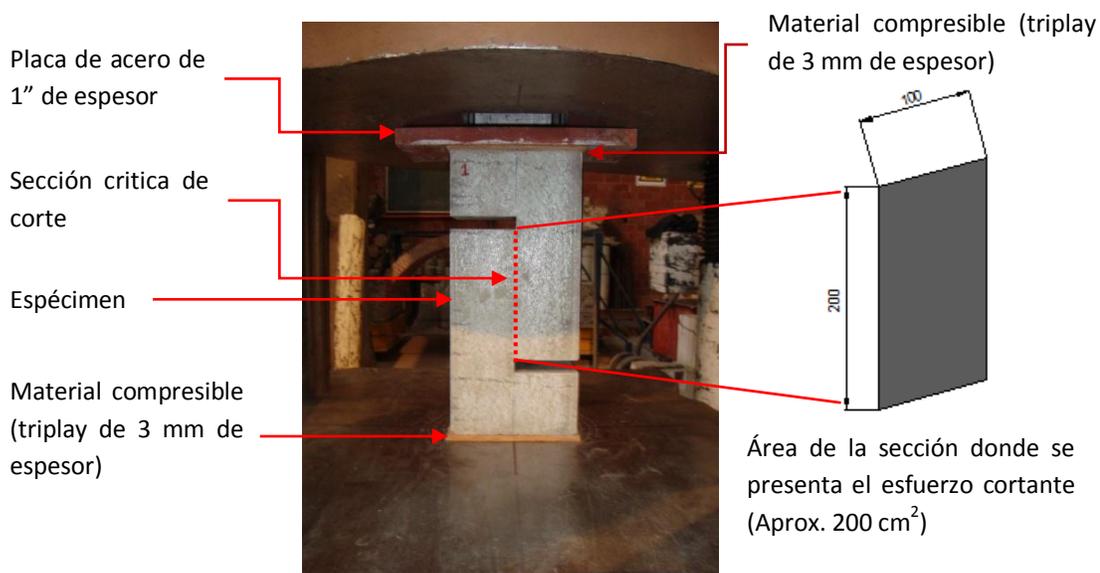


**Fig. 5.10** Especímen empleado para el ensayo de resistencia al corte

Los especímenes son desmoldados después de 24 horas de colado, y colocados en una cámara de curado con humedad y temperatura controladas, donde permanecen hasta la edad de prueba de 28 días. Los prismas son retirados en los días de prueba, medidos en todas sus dimensiones y pesados, para posteriormente ser marcado para poderlos centrar al momento del ensaye.

En los especímenes prismáticos, es muy importante el acondicionamiento de las superficies de las cabezas, a través de las cuales se transmiten las cargas de compresión, este acondicionamiento se logra colocando un triplay (material compresible) de 3 mm de espesor en ambas caras, con esto se

trata de eliminar defectos que puedan producir concentraciones de esfuerzos en el espécimen que lo hicieran fallar de manera irregular. Una vez preparado el espécimen prismático, se coloca en la maquina universal, sin “rotula”, para aplicar una carga axial de compresión creciente hasta su ruptura; la carga máxima que se alcanza dividida entre el área de la sección crítica de corte (Figura 5.11) del espécimen corresponde al esfuerzo máximo aplicado que se define como la resistencia al corte del concreto. Para realizar este ensaye se aplicó los esfuerzos de compresión a una velocidad de  $0.416 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$ , lo cual representa una velocidad de aplicación de carga de 5 t/min, empleando una prensa universal modelo SATEC con capacidad de hasta 250 t. En la Figura 5.11 se puede apreciar que el espécimen está diseñado de acuerdo con su geometría y dimensiones de tal manera que cuando se le aplique una carga axial de compresión la sección crítica de corte se deslice y se presente el fenómeno de cortante. Para asegurar que la carga de compresión sea uniformemente distribuida se usó un la parte superior una placa de acero de 1” de espesor (Figura 5.11).



**Fig. 5.11** Configuración de la prueba para determinar la resistencia al corte

### 5.3.5 Resistencia a la abrasión

Las especificaciones para el diseño de pisos industriales, pavimentos, canales, vertedores de presas y estructuras hidráulicas no solo deben tener en cuenta la resistencia a compresión, también los requisitos de resistencia a la abrasión. Se ha de reconocer que muy frecuentemente existe bastante imprecisión en la identificación de los diversos factores que intervienen en la durabilidad, pero es indudable aceptar que la resistencia a la abrasión, es la variable que más influye en la vida útil en este tipo de obras. Por otra parte es normal encontrarnos, con que el mecanismo de desgaste es influenciado por otros fenómenos físicos y químicos, como el ambiente bajo el cual opera, la corrosión del acero, congelamiento-descongelamiento y la reacción álcali-agregado.

Dado que es difícil evaluar la resistencia del concreto a la abrasión, se ha considerado que ninguno de los procedimientos de prueba actuales toma en cuenta todas las condiciones que intervienen en el fenómeno. Los procedimientos más utilizados son los métodos de prueba de las normas ASTM C 944 “Resistencia a la abrasión de la superficie de concreto por rotación-cortador” y el ASTM C 418 “Resistencia a la abrasión del concreto mediante chorro de arena”.

En este estudio de concretos reforzados con fibras de acero y macrofibras de polipropileno, para realizar las pruebas y determinar la resistencia a la abrasión por desgaste superficial se utilizó la norma mexicana NMX-C-008-1974; en la actualidad esta norma está discontinuada, pero para la investigación cumple con los requerimientos para evaluar la influencia del tipo y consumo de fibra en la resistencia a la abrasión de los concretos en estudio.

A diferencia de otros procedimientos de prueba, la medida de la abrasión en este procedimiento es valorada por el desgaste en mm y por peso en gramos, más no por la profundidad o huella dejada en el espécimen.



**Fig. 5.12** Equipo de prueba para determinar el desgaste en el concreto reforzado con fibras

Para determinar la resistencia a la abrasión de los concretos reforzados con fibras se cortaron cilindros de 15 x 30 cm, especímenes prismáticos de 5 x 5 x 10 cm para someter la cara de corte de 5 x 5 cm a abrasión (aplicando una presión al espécimen de  $250 \text{ g/cm}^2$ ), producida por fricción contra una capa de arena sílica humedecida; después de un lapso de 10 minutos de desgaste a una velocidad de 70 revoluciones por minuto se suspendió el ensayo y por diferencia de longitud del espécimen, medida antes y después del ensayo, se determinó el desgaste superficial experimentado; el ensayo se realizó a los 28 días de edad del concreto, en la Figura 5.12, se muestra la configuración empleada para el desarrollo de la prueba .

### 5.3.6 Resistencia al impacto

Una de las principales características del concreto reforzado con fibras (CRF) es su resistencia a los impactos por absorción de energía, siendo en este caso su resistencia de 3 a 10 veces la resistencia del concreto simple (ACI544.2R C. , 1989). Además, el CRF presenta una menor tendencia a la fragmentación y al desprendimiento.

Varios tipos de pruebas se han utilizado para medir la resistencia al impacto de la CRF. Estos se pueden clasificar, dependiendo del mecanismo de impacto y de los parámetros controlados durante el impacto; para esta investigación se empleará la caída del peso de prueba (impacto repetido). De acuerdo con la prueba, la resistencia al impacto se ha caracterizado por una medida del número de golpes "impacto repetido" para alcanzar un nivel de deterioro prescrito.

De acuerdo con la recomendación del ACI 544.2R (ACI 544.2R "Measurements of Properties of Fiber Reinforced Concrete"), la prueba se realiza sobre una muestra circular de concreto de 150 mm de diámetro y 63.5 mm de espesor, por lo que se fabricaron cilindros de 150 × 300 mm, que posteriormente fueron cortados. En la Figura 5.13 se muestra el espécimen utilizado para realizar el ensaye.



**Fig. 5.13** Espécimen requerido para la prueba de impacto, ejemplo: mezcla testigo sin fibras "M1" (Izquierda primera grieta, derecha última grieta)

La prueba elegida consiste en dejar caer repetidamente un peso de acero de 4.54 kg desde una altura de 457 mm sobre la muestra de concreto, y se registra el número de veces necesario para generar la primera fisura "Primera grieta" sobre la parte superior de la muestra (Resistencia al Impacto para la Primera Grieta) y hasta causar la falla "grieta última" (Resistencia al Impacto Última), debiendo reportarse ambos datos. La falla completa ocurre cuando se llega a aplicar el número de golpes necesarios para extender las grietas lo suficiente, de tal forma que la muestra llegue a tocar los extremos del molde de acero sobre el cual es colocada, para llevar a cabo la prueba. Por lo tanto, la resistencia al impacto último (RIU) corresponde al número total de golpes necesarios para iniciar y propagar las grietas hasta la falla última.



**Fig. 5.14** Configuración para realizar la prueba y determinar la resistencia al impacto de concreto

Para llevar a cabo la prueba, se emplea una placa para sostener al espécimen de concreto (Figura 5.14), posteriormente se coloca un soporte metálico que confina el espécimen sobre el cual el peso se deja caer para generar el impacto; se empleó un pisón el cual cumple con los requisitos de peso (ACI544.2R C. , 1989). El peso de la masa de impacto corresponde a la de un martillo Proctor Modificado que cumple con los requisitos de la norma ASTM D 1557 (empleado para pruebas de consolidación en suelos), y es de 4.54 kg. La altura de caída para la aplicación de los golpes de impacto fue de 457 mm (18"). En la Figura 5.14 se puede observar la configuración completa del equipo necesario para determinar la resistencia al impacto de los concretos fabricados con las mezclas en estudio.

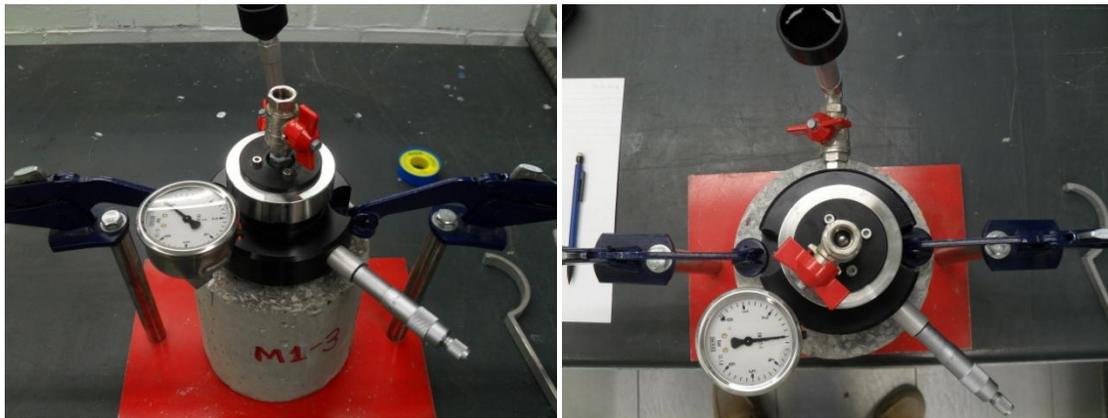
### 5.3.7 Permeabilidad al agua

La permeabilidad se refiere a la cantidad de agua que pasa a través del concreto cuando el agua se encuentra a presión, o a la capacidad del concreto de resistir la penetración de otras sustancias, como sulfatos o cloruros.

Generalmente las mismas propiedades que convierten al concreto menos permeable también lo vuelven más resistente. La permeabilidad total del concreto al agua está en función de la permeabilidad de la pasta, de las características de los agregados, y de la proporción relativa de la masa de pasta con respecto a la de los agregados. La permeabilidad de la pasta depende de una baja relación agua/cemento, del grado de hidratación del cemento y de la duración del curado.

Para determinar la permeabilidad al agua, los ensayos se realizaron con un equipo GWT-4000 fabricado por Germann Instruments A/S el cual permite determinar el flujo de agua en la superficie de la muestra de concreto cuando se aplica una presión constante. Los ensayos se realizaron a una presión de 3 BARES, a una edad del concreto de 28 y 90 días, en la Figura 5.15 se observa el dispositivo y el espécimen empleado en la prueba. Para realizar esta prueba se colaron

y moldearon cilindros de 150 x 300 mm, mismo que posteriormente se cortaron a la mitad, cuya cara de corte fue la sometida a la prueba.



**Fig. 5.15** Equipo empleado para determinar la permeabilidad al agua del concreto

La expresión empleada para calcular el flujo de agua fue:

$$q = \frac{B(g_1 - g_2)}{A * t} = \frac{78.6(g_1 - g_2)}{3018t} = \frac{0.026(g_1 - g_2)}{t} (mm/seg)$$

Dónde:

$q$ = flujo de agua en mm/seg.

$B$ = es el área del tornillo micrométrico que presiona el agua de la cámara, 78.6 mm<sup>2</sup> para un diámetro de tornillo de 10 mm.

$g_1$  y  $g_2$ = lecturas del medidor micrométrico en mm al inicio y al final del ensaye.

$A$ = área de la superficie en que se tiene el agua a presión de ensaye, 3018 mm<sup>2</sup>, para un diámetro interior de la cámara de 62 mm.

$t$ = tiempo durante el cual se realiza el ensaye, en segundos.

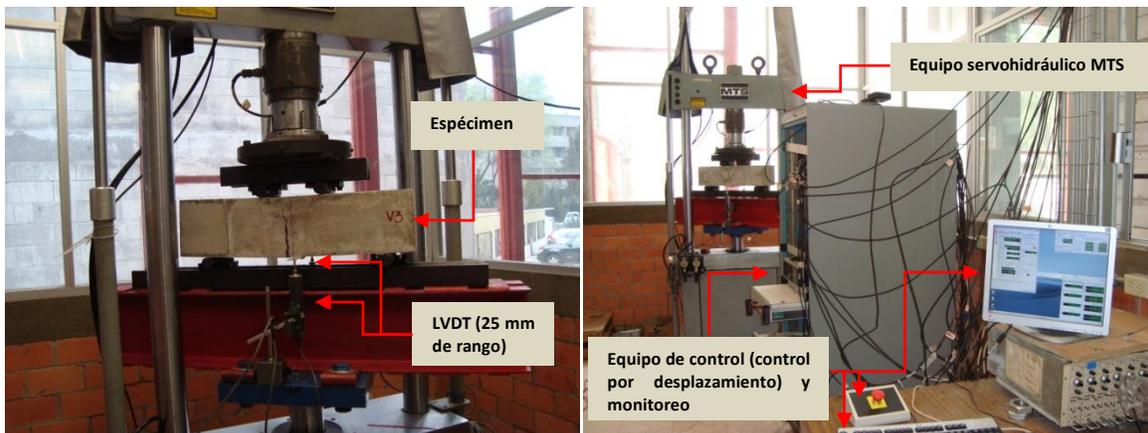
El ensaye se llevó a cabo aplicando el agua en la superficie del espécimen, recién extraído de la cámara de curado, a una presión de 3 BARES por un lapso total de 30 minutos, manteniendo constante la presión mediante la introducción del tornillo micrométrico; durante ese lapso se hicieron lecturas a cada 5 minutos. Se consideró como lectura inicial del ensaye la realizada a los 15 minutos y como lectura final la correspondiente a los 30 minutos. Los primeros 15 minutos de ensaye, que no se tomaron en cuenta para el cálculo, fueron para establecer un flujo de agua constante durante el ensaye.

### 5.3.8 Tenacidad

La tenacidad es la medida de la capacidad de absorción de energía de un material y es utilizada para caracterizar la aptitud para resistir fracturas cuando es sometido a esfuerzos estáticos o dinámicos de impacto.

Para determinar la tenacidad en el concreto con fibras, se utiliza el ensayo de flexión recomendado por el ACI 544.2R, que hace hincapié en la norma del ASTM C 1609, para lo cual se fabricaron vigas de  $150 \times 150 \times 600$  mm, las cuales fueron moldeadas y curadas con el mismo procedimiento que se utilizó para todos los especímenes empleados en las pruebas.

El ensayo consiste esencialmente en colocar la viga en posición horizontal, apoyada libremente en sus extremos, y transmitirle a todo lo ancho de la viga dos cargas iguales en los tercios del claro, para lo cual se utilizó un equipo servohidráulico con capacidad de 25 t, aplicando la carga a una velocidad de desplazamiento al centro del claro de 0.09 mm/min. El equipo consta de un marco rígido el cual se encuentra controlado por un sistema analógico de lazo cerrado MTS que permite el control por desplazamiento, para obtener la respuesta carga – desplazamiento después de que se presenta el primer agrietamiento, los desplazamientos se obtiene instrumentando dos LVDT's de 25 mm de rango al centro del claro de la viga. La falla de la viga debe ocurrir dentro del tercio central. En la Figura 5.16 se presenta la configuración y el equipo empleado para la realizar el ensayo.



**Fig. 5.16** Equipo empleado para realizar la prueba de tenacidad de CRF

Para los concretos con fibra de acero, la información que se obtiene después del agrietamiento, permite calcular la carga al primer pico ( $P_1$ ) y la carga máxima ( $P_p$ ), su resistencia al primer pico ( $f_1$ ) y su resistencia máxima ( $f_p$ ), la flecha para el primer pico ( $\delta_1$ ) y para la carga máxima ( $\delta_p$ ), la carga residual cuando  $\delta = L/600$  ( $P_{L/600}$ ) y  $\delta = L/150$  ( $P_{L/150}$ ) y por último la resistencia residual en  $L/600$  ( $f_{L/600}$ ) y  $L/150$  ( $f_{L/150}$ ).

Para los concretos con macrofibras de polipropileno, el criterio de análisis es el mismo, excepto que la carga al primero pico (primer agrietamiento) es igual a la carga máxima ( $P_p=P_1$ ), por consecuencia las resistencias son iguales ( $f_p=f_1$ ), lo mismo pasa con la flecha al primer pico es la misma que la flecha a la carga máxima ( $\delta_p=\delta_1$ ), esto es porque una vez que se grieta el concreto, la viga se sigue deformando y su resistencia aumenta, pero nunca es superior a la del primer pico, a diferencia de los concretos con fibra de acero.

Para ambos tipos de fibra se calcula la tenacidad del concreto; como el área bajo la curva carga-desplazamiento. El criterio de análisis para las dos tipos de fibra se puede observar en la Figura 5.17.

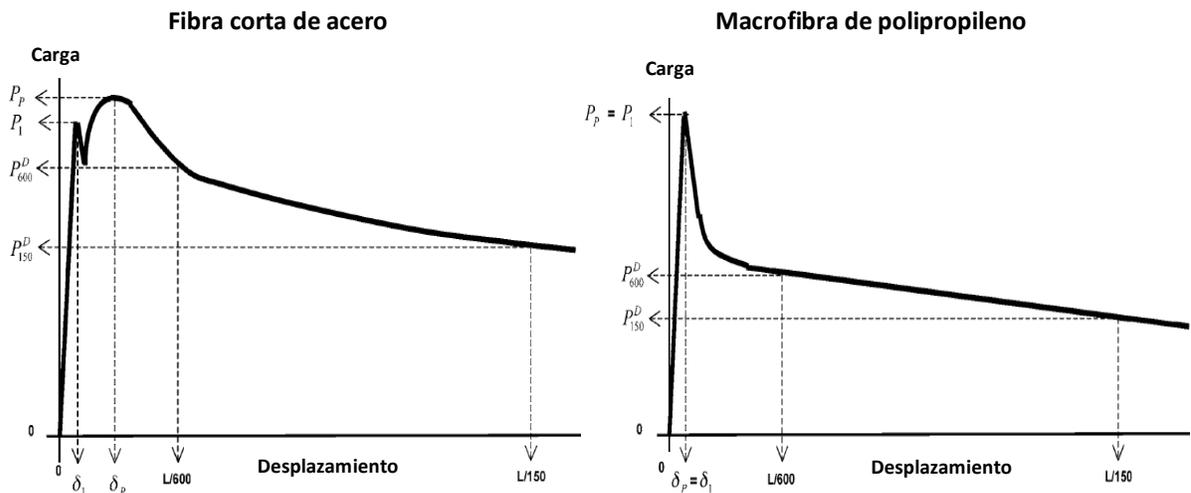


Fig. 5.17 Criterio de análisis de cargas residuales y tenacidad de acuerdo a la norma ASTM C1609.

### 5.3.9 Contracción por secado

La contracción es una de las causas más frecuentes de cambios volumétricos y se puede manifestar de 3 maneras diferentes: Contracción intrínseca o espontánea, contracción por secado, y contracción por carbonatación.

La contracción intrínseca es la contracción de fraguado, producto del proceso químico de hidratación del cemento y su propiedad de disminuir el volumen en este estado. Esta retracción es irreversible y no depende de los cambios de humedad, depende exclusivamente del tipo y características del cemento. El orden de magnitud de la deformación unitaria atribuida a este tipo de contracción oscila entre  $10$  y  $150 \times 10^{-6}$  para concretos con cemento Portland, y en términos generales no produce fisuración pues las tensiones que produce son bajas ( $2$  a  $8 \text{ kg/cm}^2$ ).

La contracción por secado se produce por la pérdida de humedad de la pasta debido a agentes externos como la temperatura, viento, humedad relativa. El mecanismo es físico, causado primero por la pérdida del agua de los poros capilares, cuyo efecto es despreciable, y luego por la

evaporación del agua de adsorción contenida en los poros del gel. Este efecto no es irreversible. Produce deformaciones unitarias que varían desde los 400 hasta  $1100 \times 10^{-6}$  en concretos de cemento Portland sin ningún tipo de control. Las tensiones que producen pueden variar entre 100 y  $275 \text{ kg/cm}^2$ , que superan normalmente la capacidad resistente en tensión y es generalmente la causa principal de fisuración del concreto.

La contracción por carbonatación se produce sólo en el concreto endurecido, por la reacción de los cristales de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de los productos de hidratación del cemento comprimidos por la contracción por secado, con el  $\text{CO}_2$  del ambiente formándose el  $\text{CaCO}_3$  con una reducción de volumen inicial. La humedad durante la exposición al bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es el factor principal que influye en la contracción por carbonatación. Los mayores valores se producen para humedades relativas del orden del 50%, mientras que es despreciable para humedades relativas cercanas al 100% o por debajo del 25% (Verbeck, 1958). Las deformaciones unitarias que produce varían entre 10 a  $100 \times 10^{-6}$ , con tensiones de 2 a  $20 \text{ kg/cm}^2$ , por lo que no ocasiona fisuración en la mayoría de los casos.

Para realizar la prueba y medir la contracción por secado, se fabricaron barras prismáticas de  $7.5 \times 7.5 \times 25 \text{ cm}$  las cuales se curaron por 28 días sumergidas en agua con cal, dentro de un cuarto de curado con temperatura y humedad controladas. La prueba se hizo siguiendo la norma ASTM C 157.



**Fig. 5.18** A la izquierda, comparador de longitudes empleado para determinar la contracción por secado, a la derecha, especímenes resguardados en la cámara seca

Es importante que al momento de preparar los moldes se coloquen los índices cuidadosamente utilizando un comparador de medición. El moldeo de los especímenes se realiza en dos capas, cada capa es vibrada durante aproximadamente 20 segundos, después de 24 horas las barras son desmoldadas y llevadas a la cámara de curado donde son sumergidas en un recipiente con agua y cal donde permanecerán durante 28 días a una temperatura y humedad controlada.

La prueba consiste en sacar los especímenes del agua con cal a los 28 días y llevarlos a la cámara seca donde se mantendrán a una temperatura entre los 20 y 27.5 °C y a una humedad relativa no menor a 50%, posteriormente se toman lecturas durante todos los días empleando un comparador de longitudes previamente calibrado (Figura 5.18). La medición de la contracción por secado se basó en el cambio de longitud de los prismas, que se determina de acuerdo con la norma ASTM C 490.

### **5.3.10 Flujo plástico (CREEP)**

El flujo plástico, es el incremento de la deformación unitaria en el concreto, bajo carga constante y permanente. Es una característica inherente a la pasta de cemento endurecido, se le relaciona con un acomodo interno de las partículas de la pasta.

Se demuestra experimentalmente (Zambetti, 1982) que la deformación plástica bajo carga constante es proporcional a la deformación elástica, y para cargas inferiores a la de rotura, la deformación plástica es proporcional a la carga. El flujo del concreto aumenta con el incremento de la carga continua y es inversamente proporcional a la resistencia a compresión.

El tipo y contenido de agregado, como sucede también en el caso de la contracción, tiene una influencia importante en los valores del flujo.

Otro efecto importante del flujo plástico, aparte del cambio volumétrico que se produce en el concreto, es la relajación o reducción gradual de los esfuerzos en compresión.

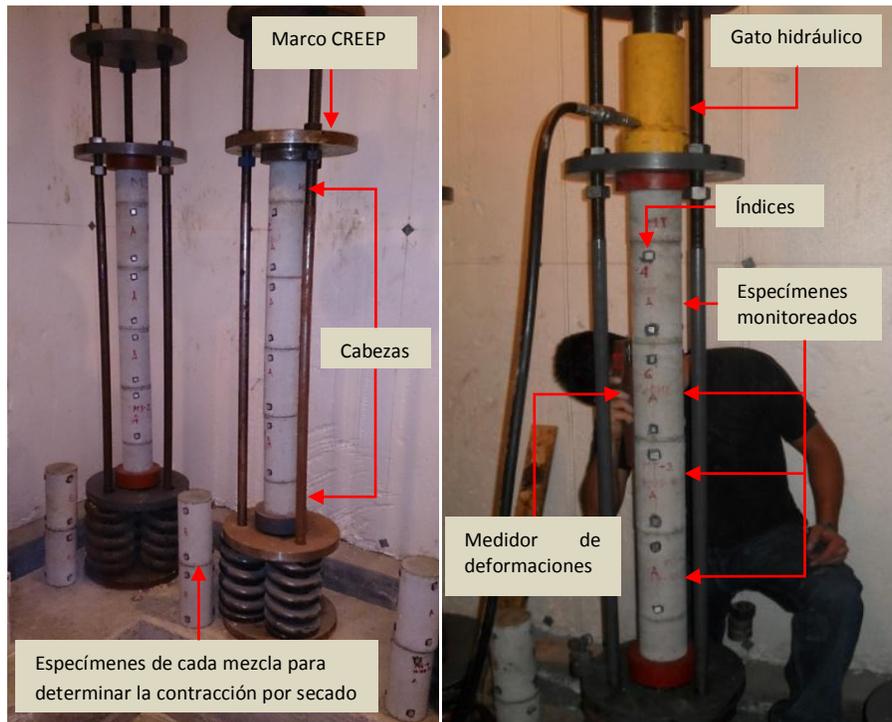
Aunque en términos cualitativos se considera el flujo independiente de la contracción, estos están interrelacionados, por lo que un concreto con valores bajos de contracción, tendrá también deformaciones por flujo bajas.

Para realizar la prueba se elaboraron 7 cilindros de 10 x 20 cm, por cada mezcla, estos son moldeados en tres capas y vibrados; después de 24 horas son desmoldados y llevados a la cámara de curado donde permanecen hasta la edad de ensaye (28 días) con una temperatura y humedad controlada.

La prueba se realizó de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C 512. De los 7 cilindros fabricados, 4 son habilitados; el perímetro de la base del cilindro se divide en tres partes iguales y se traza cada eje perpendicularmente, posteriormente se colocan 2 índices en cada eje, estos se pegan con un adhesivo epóxico (Devcon), los índices son de aluminio con una pequeña perforación en donde se acopla el medidor de deformaciones. Otro cilindro es cortado a la mitad, estas servirán de cabeza en la configuración; los 2 cilindros restantes se dejaron para determinar la contracción por secado, y por diferencia, determinar la deformación diferida del espécimen cargado.

Para poder cargar el marco todos los especímenes debe estar cabeceados perfectamente por ambas caras, se coloca una mitad del cilindro cortado, después se apilan los cuatro cilindro con los índices; todos alineados con sus respectivos ejes y plomeados con el marco, por último se coloca la otra mitad del cilindro. La carga que se aplique a los especímenes, es el 40% de la carga correspondiente a la resistencia a compresión, esta carga se aplica con un gato hidráulico (equipado con manómetro) previamente calibrado y relacionando los  $\text{kg/cm}^2$  a Psi, en la Figura 5.19 se muestra la configuración del ensaye.

Una vez cargado el marco, la carga se debe mantener constante y permanente, se tomaron lecturas en el tiempo, las que se ajustaron con las expresiones para predecir el flujo plástico.



**Fig. 5.19** Configuración y equipo empleado en la prueba para determinar el flujo plástico del concreto reforzado con fibras

## 6. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

### 6.1 PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO

A las mezclas de concreto en estado fresco se les determinó el revenimiento, contenido de aire atrapado, peso volumétrico y tiempo de escurrimiento en cono invertido, además, a cada mezcla se le determinó el índice de agrietamiento por contracción plástica.

#### 6.1.1 Revenimiento

Para las ocho mezclas fabricadas se determinó el revenimiento del concreto antes de incorporar el aditivo; posteriormente, con la incorporación del aditivo y, por último, con la inclusión de la fibra. En la Tabla 6.1 se muestran los resultados de los revenimientos promedio obtenidos.

**Tabla 6.1** Resumen de los revenimiento de cada mezcla

Tipo de fibra	Mezcla	Consumo de fibra, kg/m <sup>3</sup>	W L/d	Revenimiento, cm		
				Concreto simple	Con aditivo	Con aditivo + fibra
Sin fibra	M1	0	0	7.7	15.0	
Fibra corta de acero	M2	40	33	6.2	15.1	9.6
	M3	60	49	7.2	15.7	9.2
	M4	80	66	5.6	17.0	8.8
Macrofibra de polipropileno	M5	2.3	14	8.5	16.2	12.3
	M6	4.6	28	8.7	16.3	11.2
	M7	7.0	42	10.6	18.4	10.6
	M8	9.3	56	9.2	19.5	11.2

En la Figura 6.1 se muestra una representación gráfica entre el parámetro W L/d contra su correspondiente revenimiento promedio del concreto sin aditivo, con aditivo y con su consumo de fibra correspondiente.

El revenimiento obtenido para el concreto sin aditivo y sin fibra es de 8.0 cm en promedio para todas las mezclas, con una desviación estándar de 1.6 cm; una vez agregado el aditivo a la mezcla se obtiene un revenimiento promedio de 16.1 cm; para los valores 56 y 66 del parámetro W L/d, se obtiene un revenimiento mayor para las mezclas con aditivo, con un valor promedio de 18.3 cm, ya que para estas dos mezclas la dosificación del aditivo es también mayor.

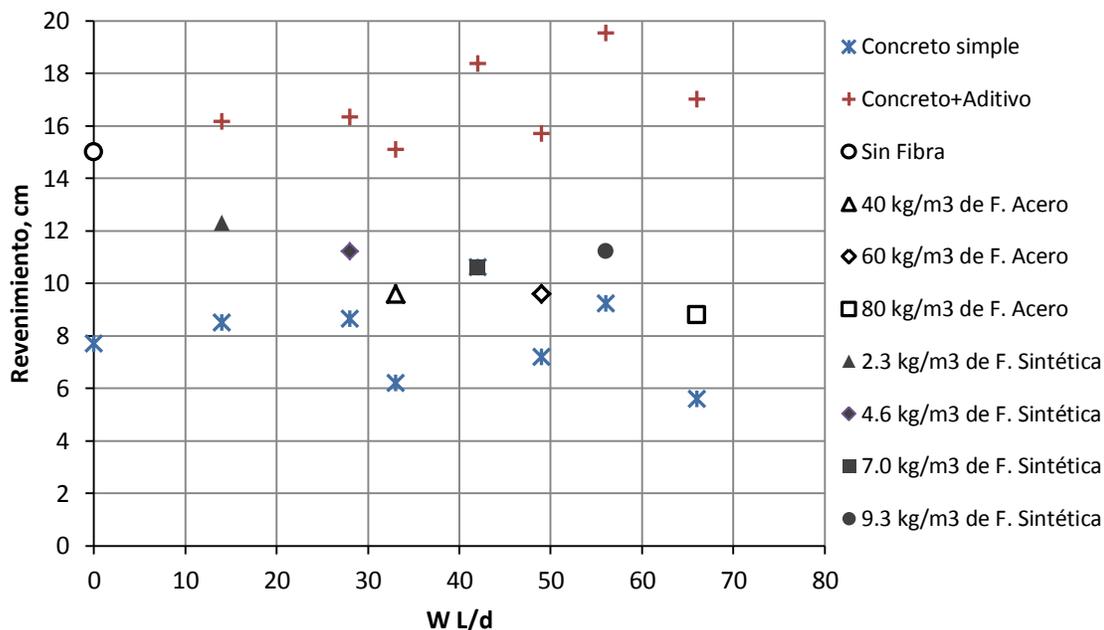


Fig. 6.1 Influencia del parámetro W L/d en el revenimiento

En la Tabla 6.2 se puede apreciar una comparativa realizada entre el revenimiento de la mezcla de concreto con aditivo y el revenimiento final (aditivo + fibras), el porcentaje de disminución del revenimiento muestra la afectación que sufre la trabajabilidad de la mezcla, para porcentajes volumétricos iguales de fibras distintas; las mezclas reforzadas con fibras de acero sufren más esta afectación; entre mayor consumo de fibra menor revenimiento, es decir, mayor porcentaje de disminución.

Tabla 6.2 Comparativa de la disminución del revenimiento de cada mezcla

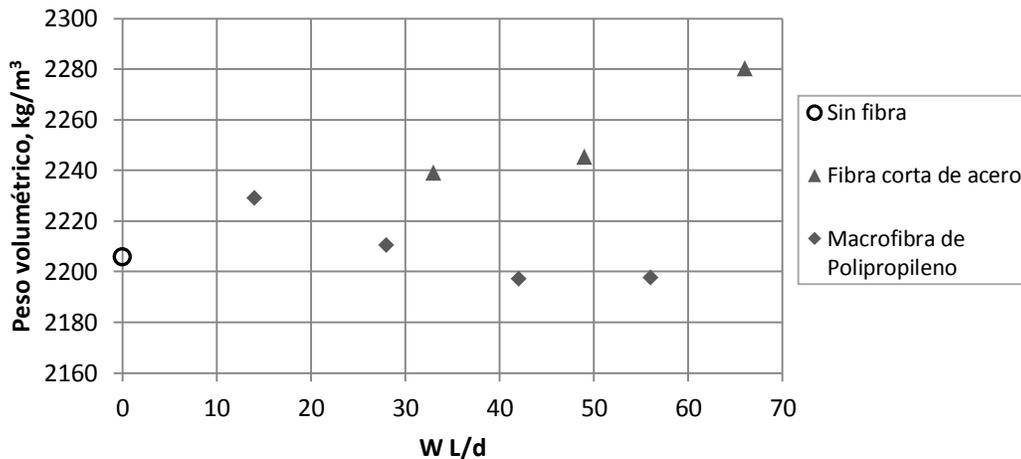
Tipo de fibra	Mezcla	Consumo de fibra, kg/m <sup>3</sup>	Volumen (W), %	Revenimiento, cm		Con aditivo+fibra / Con aditivo	Disminución del revenimiento, %
				Con aditivo	Con aditivo + fibra		
Sin fibra	M1	0	0	15.0	--	--	--
Fibra corta de acero	M2	40	0.51	15.1	9.6	0.64	36
	M3	60	0.76	15.7	9.2	0.59	41
	M4	80	1.02	17.0	8.8	0.52	48
Macrofibra de polipropileno	M5	2.3	0.25	16.2	12.3	0.76	24
	M6	4.6	0.51	16.3	11.2	0.69	31
	M7	7.0	0.76	18.4	10.6	0.58	42
	M8	9.3	1.02	19.5	11.2	0.57	43

### 6.1.2 Peso volumétrico, contenido de aire atrapado y cono invertido

En cuanto al peso volumétrico en la Tabla 6.3 y Figura 6.2 se observa una muy pequeña variación y una distinta tendencia con respecto al concreto sin fibra cuando se incorpora cada tipo de fibras. El peso volumétrico para la mezcla M1, de referencia sin fibra, es de 2205.6 kg/m<sup>3</sup>, para la mezclas con fibras metálicas M2, M3 y M4 se tiene un incremento de 1.5%, 1.8% y 3.4%, respectivamente, respecto al concreto sin fibra. Para las mezclas reforzados con macrofibras, M5 y M6, solo se tiene un incremento de 1.0% y 0.2%, respectivamente, para la mezcla M7 y M8 disminuyó 0.4% con respecto a la mezcla de referencia.

**Tabla 6.3** Resultados de peso volumétrico, contenido de aire atrapado y cono invertido

Mezcla	Consumo de fibra, kg/m <sup>3</sup>	Parámetro W L/d	Peso volumétrico, kg/m <sup>3</sup>	Contenido de Aire, %	Cono invertido, s
M1	0	0	2205.6	2.7	7.73
M2	40	33	2239.0	3.6	8.00
M3	60	49	2245.4	4.0	9.49
M4	80	66	2280.2	3.9	12.70
M5	2.3	14	2229.0	2.4	7.54
M6	4.6	28	2210.5	2.4	7.66
M7	7.0	42	2197.0	2.2	8.37
M8	9.3	56	2197.7	2.2	9.49



**Fig. 6.2** Influencia del parámetro W L/d en el peso volumétrico en estado fresco

Comparando la tendencia del peso volumétrico de las mezclas de concreto reforzado con fibras de acero y con macrofibras de polipropileno con respecto al concreto sin fibras, se observa que en las mezclas con fibras metálicas el peso volumétrico aumenta proporcionalmente al consumo de

fibra, mientras que los reforzados con macrofibras, aumenta cuando el parámetro  $W L/d$  es menor o igual a 28, y para valores mayores que éste, el peso volumétrico disminuye.

En la Figura 6.3 se muestra la representación gráfica del contenido de aire atrapado para todas las mezclas ensayadas, para la mezcla de referencia sin fibra M1 es de 2.7%; conforme se adicionan los diferentes consumos de fibra metálica aumenta de manera significativa, ya que para la mezcla M2 es de 3.6% mientras que las mezclas M3 y M4 su contenido promedio de aire atrapado es de 4%. Por lo contrario para las mezclas con macrofibras sintéticas, el contenido de aire atrapado experimenta una reducción proporcional al consumo de fibra, ya que para la mezcla M5 y M6 es de 2.4% mientras que las mezclas M7 y M8 su contenido promedio de aire atrapado es de 2.2%.

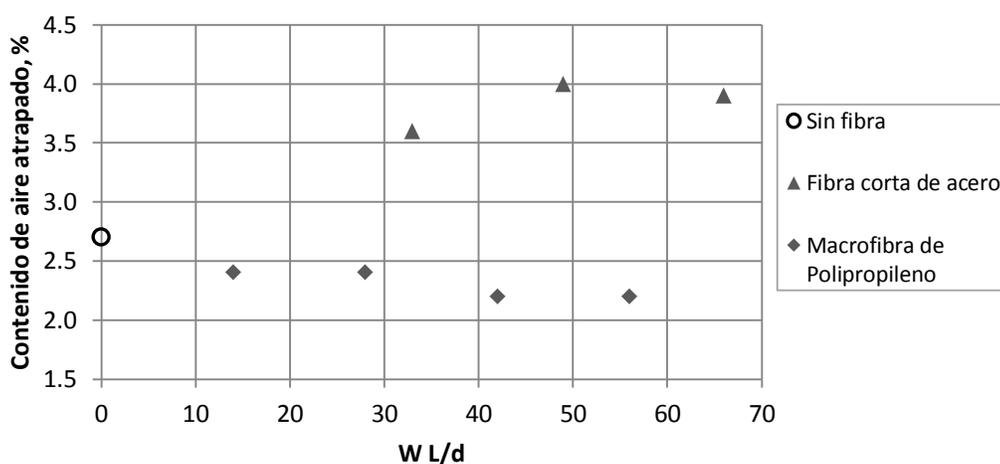


Fig. 6.3 Influencia del parámetro  $W L/d$  en el contenido de aire atrapado

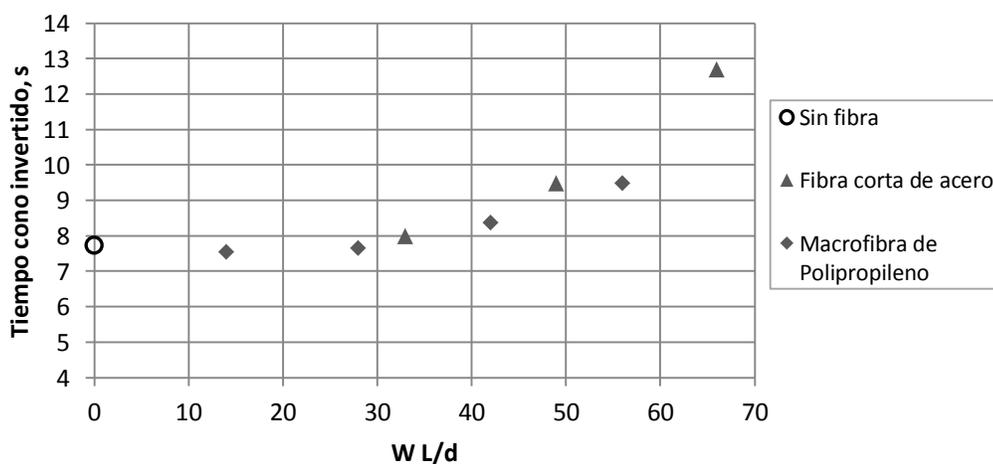


Fig. 6.4 Influencia del parámetro  $W L/d$  en el tiempo para cono invertido

Los resultados obtenidos en las pruebas de cono invertido, Tabla 6.3 y Figura 6.4, muestra que las mezclas con fibras metálicas requieren de más energía conforme va aumentando el consumo de fibra (aumento del parámetro  $W L/d$ ), la mezcla de referencia sin fibra M1 presenta un tiempo para cono invertido de 7.73 segundos, las mezclas siguientes presentan un aumento, por ejemplo la mezcla M4 con mayor consumo de fibra el tiempo para cono invertido es de 12.70 segundos. Con las mezclas reforzadas con macrofibras; M5 y M6 el tiempo de desplazamiento no varía notablemente con respecto a la M1; cuando el valor del parámetro  $W L/d$  es mayor o igual a 42 se requiere de más energía para que la mezcla pueda escurrir.

Para porcentajes de fibras iguales, los concretos con fibra corta de acero requieren de mayor tiempo de escurrimiento que el requerido por los concretos con macrofibra de polipropileno.

### 6.1.3 Contracción plástica

Para esta prueba las condiciones del ambiente se mantuvieron de 20° a 22°C de temperatura, 38% a 40% de humedad relativa y una velocidad de viento de 4 m/s. El objetivo del ensaye es determinar un índice de grieta, el cual se calcula como el promedio de los anchos de grieta sobre la sección 1 y la sección 2. En la Figura 6.5 se puede observar un esquema del desarrollo de las grietas durante la prueba.

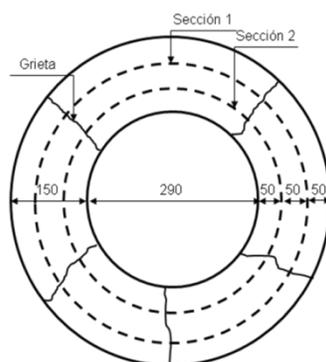


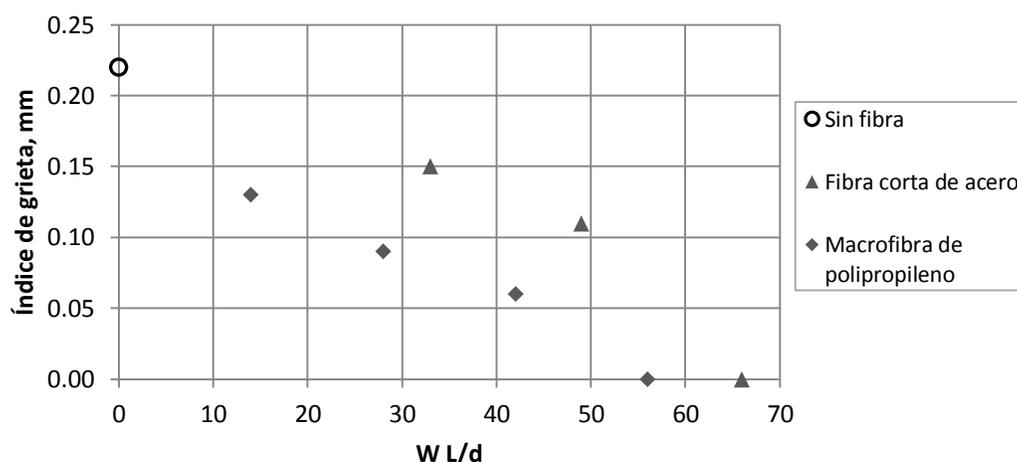
Fig. 6.5 Esquema de desarrollo de las grietas

La Tabla 6.4 muestra de manera detallada los resultados obtenidos para las ocho mezclas fabricadas:

Tabla 6.4 Índice de grietas por contracción plástica

Tipo de fibra	Mezcla	Consumo de fibra, kg/m <sup>3</sup>	Número de grietas		Índice de grieta, mm
			Anillo 1	Anillo 2	
Sin fibra	M1	0	7	15	0.22
Fibra corta de acero	M2	40	9	7	0.15
	M3	60	4	4	0.11
	M4	80	0	0	0.00
Macrofibra de polipropileno	M5	2.3	7	5	0.13
	M6	4.6	6	5	0.09
	M7	7.0	4	--	0.06
	M8	9.3	0	--	0.00

Con respecto al índice de grieta, se puede observar en la Figura 6.6, que a medida que se incrementa el contenido de fibra metálica y el de macrofibra de polipropileno, el índice de grieta experimenta una reducción considerable. El índice de grieta varía de 0.22 a 0, la variación del índice fue como se esperaba ya que conforme se aumenta el consumo de fibra el número de grietas y el ancho de las mismas disminuye considerablemente.



**Fig. 6.6** Influencia del parámetro  $W L/d$  en el índice de grieta por contracción plástica

Con el índice de grieta de cada mezcla, en la Tabla 6.5 se presenta un análisis comparativo del desempeño del concreto con los diferentes consumos y tipo de fibras en relación con el desempeño del mismo concreto pero sin fibras (M1), además se calculó el porcentaje de reducción del índice de grieta de cada mezcla con respecto a la mezcla sin fibras.

**Tabla 6.5** Desempeño del concreto con diferente consumo y tipo de fibra en el índice de grieta

Tipo de fibra						
Fibra corta de acero			Macrofibra de polipropileno			
Porcentaje volumétrico de la fibra en la mezcla (W), %						
M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
0.51	0.76	1.02	0.25	0.51	0.76	1.02
Valores relativos de desempeño con respecto al concreto sin fibras (M1)						
$M_2/M_1$	$M_3/M_1$	$M_4/M_1$	$M_5/M_1$	$M_6/M_1$	$M_7/M_1$	$M_8/M_1$
0.68	0.50	0	0.59	0.41	0.27	0
Porcentaje de reducción del índice de grieta con respecto al concreto sin fibra (M1), %						
M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
32	50	100	41	59	73	100

Analizando la tabla anterior, entre menor sea el valor relativo de desempeño con respecto al concreto sin fibras, el consumo de fibra será más efectivo en la mezcla; por otro lado, comparando

ambos tipos de fibra resulta evidente que la macrofibra de polipropileno es más eficiente para el control de grietas por contracción plástica, esto se demuestra al comparar para porcentajes volumétricos iguales de fibras de acero y de polipropileno, el índice de grieta y el valor relativo de desempeño.

## 6.2 PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO

### 6.2.1 Resistencia a compresión

Los resultados referentes a esta prueba se presentan en la Tabla 6.6 y graficados en la Figura 6.7; es necesario recalcar que estos resultados son el promedio de tres ensayos realizados a cada mezcla. En el ANEXO 7, se muestran los resultados de los especímenes ensayados para cada una de las mezclas estudiadas.

Por una parte la inclusión de las fibras cortas de acero en todas las mezclas de concreto fabricadas no mostró, en general, un efecto benéfico en la resistencia a compresión a 28 días; para la mezcla con consumo de fibra de  $60 \text{ kg/m}^3$  presentó una reducción de la resistencia de 4.6% respecto a la mezcla de referencia y en el caso de la mezcla con consumo de fibra de  $80 \text{ kg/m}^3$  se incrementó un porcentaje muy pequeño de 1 %. En cambio, todas las mezclas de concreto con macrofibras sintéticas de polipropileno, mostraron un incremento en la resistencia; para la mezcla M5 se incrementó un porcentaje de 6%, la M6 de 9%, la M7 de 5% y para la mezcla M8, con el mayor consumo de fibra, se presentó un incremento del 8% respecto a la mezcla de referencia.

**Tabla 6.6** Valores de resistencia a compresión a 28 y 90 días

Tipo de fibra	Mezcla	Consumo de fibra, $\text{kg/m}^3$	W L/d	Resistencia a compresión, $\text{kg/cm}^2$	
				28 días	90 días
Sin fibra	M1	0	0	414	478
Fibra corta de acero	M2	40	33	414	468
	M3	60	49	396	435
	M4	80	66	418	444
Macrofibra de polipropileno	M5	2.3	14	437	496
	M6	4.6	28	451	476
	M7	7.0	42	435	481
	M8	9.3	56	449	492

En la Figura 6.7 se observa que los resultados de resistencia a compresión a los 28 días de los concretos con fibras de acero muestran una tendencia definida con un promedio de  $409 \text{ kg/cm}^2$ , para las macrofibras de polipropileno su resistencia promedio es de  $443 \text{ kg/cm}^2$ . La variación de la resistencia a compresión de las mezclas es muy pequeña ya que para las fibras de acero su desviación estándar es de  $11.7 \text{ kg/cm}^2$  y para las macrofibras de  $8.2 \text{ kg/cm}^2$  con un coeficiente de variación de 2.9% y 1.8%, respectivamente.

Para la edad de 90 días los concretos con fibras de acero tienen en promedio una resistencia de 449 kg/cm<sup>2</sup> y de 489 kg/cm<sup>2</sup> para los concretos con macrofibras de polipropileno, con una desviación estándar de 17.1 kg/cm<sup>2</sup> y 9.3 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente.

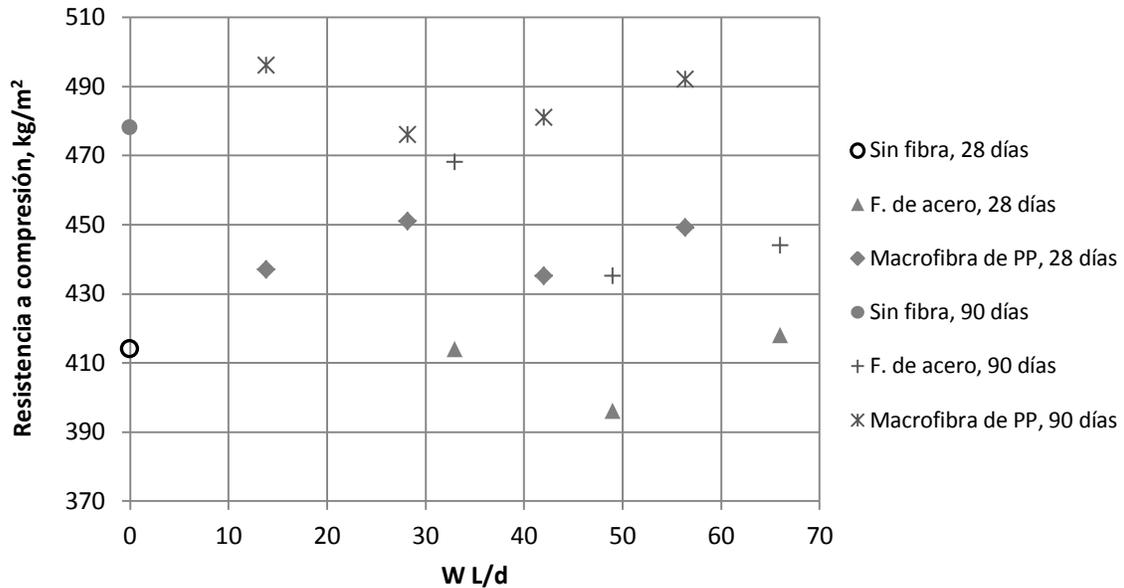


Fig. 6.7 Variación de la resistencia a compresión a la edad de 28 y 90 días con el parámetro W L/d

En la Tabla 6.7 se muestran los resultados de cómo varía la resistencia a compresión del concreto a 90 días de edad en función de la resistencia alcanzada a los 28 días. Como se observa la mezcla de referencia sin consumo de fibra alcanzó un mayor incremento en la resistencia a compresión a los 90 días de edad, con un incremento promedio de 16%; conforme se incrementa el consumo de fibra metálica se reduce el incremento de la resistencia a compresión a los 90 días; en cambio, para los concretos con macrofibras de polipropileno el porcentaje de incremento sigue una tendencia similar, excepto la mezcla M6.

Tabla 6.7 Variación de la resistencia a compresión con la edad del concreto

Tipo de fibra	Mezcla	Consumo de fibra, kg/m <sup>3</sup>	W L/d	Resistencia a compresión, kg/cm <sup>2</sup>		f' c <sub>90 días</sub> /f' c <sub>28 días</sub>
				28 días	90 días	
Sin fibra	M1	0	0	414	478	1.16
Fibra corta de acero	M2	40	33	414	468	1.13
	M3	60	49	396	435	1.10
	M4	80	66	418	444	1.06
Macrofibras de polipropileno	M5	2.3	14	437	496	1.13
	M6	4.6	28	451	476	1.06
	M7	7.0	42	435	481	1.11
	M8	9.3	56	449	492	1.10

**Tabla 6.8** Desempeño del concreto con diferente consumo y tipo de fibra en la resistencia a compresión a 28 y 90 días

Edad, días	Tipo de fibra						
	Fibra corta de acero			Macrofibra de polipropileno			
	Porcentaje volumétrico de la fibra en la mezcla (W), %						
	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
	0.51	0.76	1.02	0.25	0.51	0.76	1.02
	Valores relativos de desempeño con respecto al concreto sin fibras (M1)						
	M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>3</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>4</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>5</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>6</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>7</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>8</sub> /M <sub>1</sub>
28	1.00	0.96	1.01	1.06	1.09	1.05	1.08
90	0.98	0.91	0.93	1.04	1.00	1.01	1.03
	Porcentaje de incremento o disminución (-) de la resistencia a compresión con respecto al concreto sin fibra (M1), %						
	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
28	0	-4	1	6	9	5	8
90	-2	-9	-7	4	0	1	3

En la Tabla 6.8 se muestra una comparativa entre el desempeño del concreto con fibras de acero y macrofibras de polipropileno respecto al mismo concreto pero sin fibras, los porcentajes con signo negativo representan una disminución de la resistencia a compresión. Las fibras de acero no modifican notablemente la resistencia del concreto a 28 días, pero a una edad de 90 días propician una disminución, mientras que las macrofibras proporcionan un aumento para ambas edades, aunque para la edad de 28 días es mayor.

### 6.2.2 Módulo de elasticidad, relación de Poisson y deformación unitaria máxima

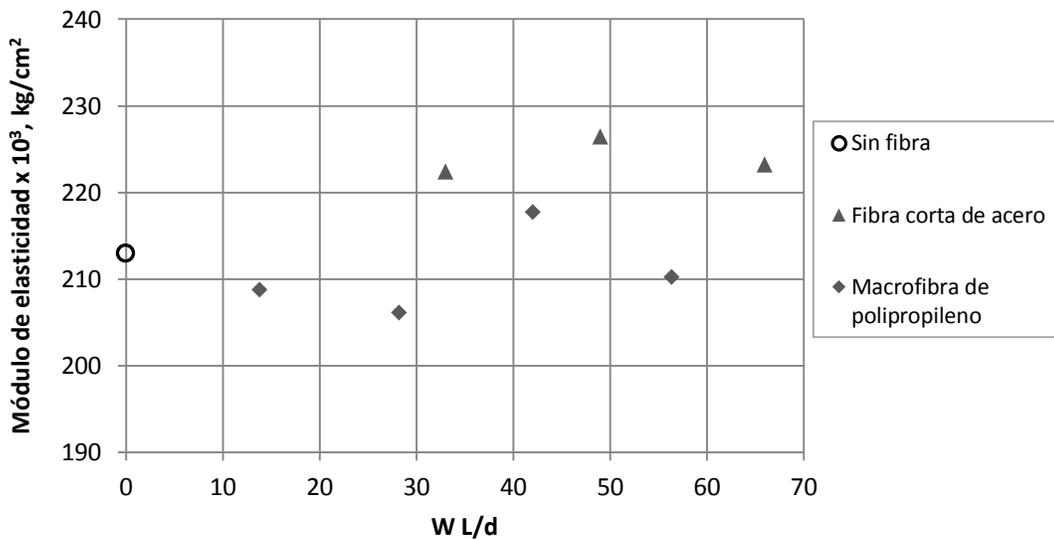
En la Tabla 6.9 se presenta los módulos de elasticidad determinados para cada mezcla a la edad de 28 días, así como la relación que existen entre el módulo de elasticidad y la raíz cuadrada de la resistencia a compresión correspondiente. El módulo de elasticidad determinado en el laboratorio es el promedio del ensayo de tres especímenes (ver ANEXO 8).

En cuanto al módulo de elasticidad a la edad de 28 días, en la Figura 6.8, se puede ver que conforme se incrementa el consumo de fibras metálica, el módulo de elasticidad aumenta; para el concreto de referencia se obtuvo un módulo de elasticidad de 212,913 kg/cm<sup>2</sup>, la mezcla que presentó mayor módulo de elasticidad fue la M3 con un consumo de fibra de 60 kg/m<sup>3</sup>. Para las macrofibras los valores del módulo de elasticidad para la M5, M6 y M8 son inferiores al del mismo concreto sin fibras. Los concretos con fibras cortas de acero presentan una desviación estándar de 2,145 kg/cm<sup>2</sup> mientras que las macrofibras de 4,991 kg/cm<sup>2</sup>.

El módulo de elasticidad promedio para los concretos con fibras de acero es de 224,034 kg/cm<sup>2</sup> es decir 5% más que el mismo concreto pero sin fibras, para los concretos con macrofibras de polipropileno es de 210,687 kg/cm<sup>2</sup>, valor inferior en 1% que el del concreto sin fibras.

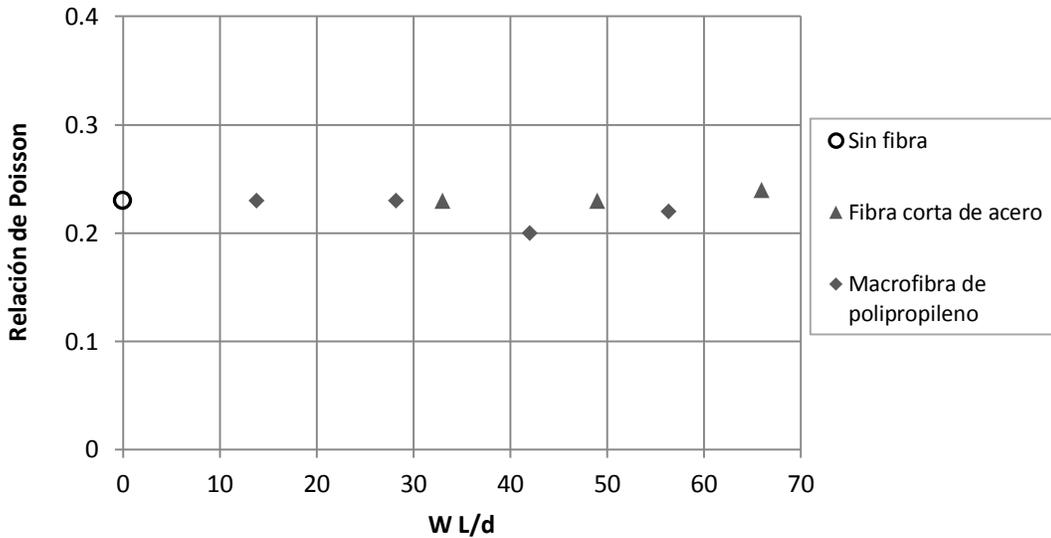
**Tabla 6.9** Variación del módulo de elasticidad con la resistencia a compresión a 28 días, relación de Poisson y deformación unitaria máxima

Mezcla	Consumo de fibra, kg/m <sup>3</sup>	Resistencia a compresión, kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidad, E <sub>c</sub> , kg/cm <sup>2</sup>	Relación de Poisson	Deformación unitaria máxima, ε <sub>o</sub>	E <sub>c</sub> /√f' <sub>c</sub>
M1	0	414	212,913	0.23	0.0034	10464
M2	40	414	222,425	0.23	0.0037	10932
M3	60	396	226,470	0.23	0.0037	11381
M4	80	418	223,208	0.24	0.0038	10917
M5	2.3	437	208,730	0.23	0.0035	9,985
M6	4.6	451	206,077	0.23	0.0035	9,704
M7	7.0	435	217,717	0.20	0.0033	10,439
M8	9.3	449	210,224	0.22	0.0035	9,921



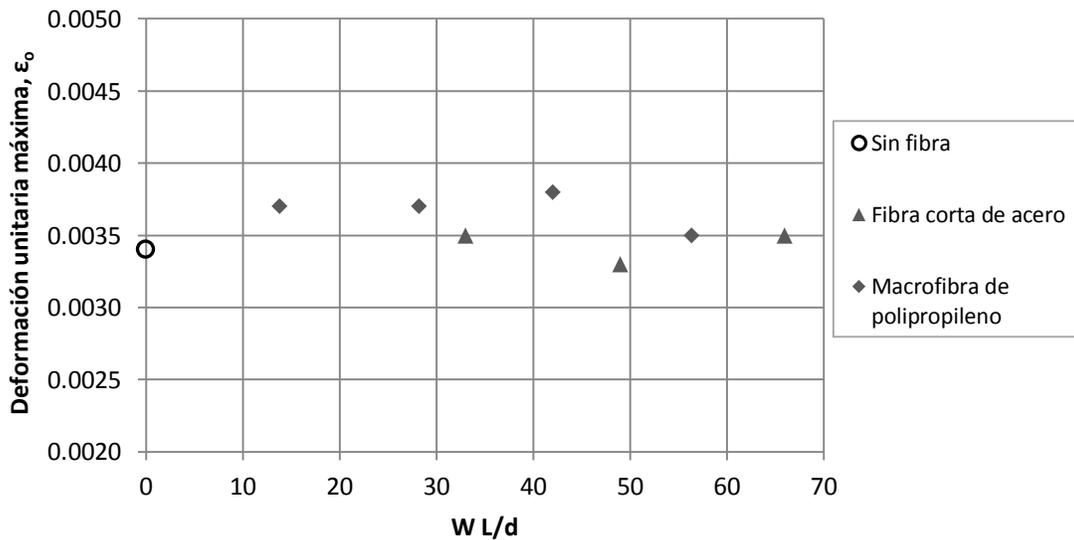
**Fig. 6.8** Influencia de las fibras en el módulo de elasticidad del concreto

En la Tabla 6.9, también se incluye la relación entre el módulo elástico y la raíz cuadrada de su resistencia a compresión a los 28 días, y se observa que los valores más altos pertenecen al concreto sin fibras y a los reforzados con fibras cortas de acero, mientras que los concretos con macrofibras de polipropileno sus valores son inferiores. Para todos los concretos en estudio el módulo de elasticidad alcanzado resulta menor que el que se obtendría en un concreto con agregado grueso similar pero de 19 mm de tamaño máximo y resistencia a compresión comparable.



**Fig. 6.9** Influencia de las fibras en la relación de Poisson

La relación de Poisson relaciona la deformación transversal con respecto a su deformación axial, fue en promedio de 0.23 para las mezclas con fibra de acero y 0.22 para las macrofibras de polipropileno. Los valores obtenidos están dentro del rango esperado (entre 0.11 y 0.27). Como se observa en la Figura 6.9 la inclusión de ambos tipos de fibras en la mezcla de concreto no modifica la relación de Poisson



**Fig. 6.10** Influencia de las fibras en la deformación unitaria máxima

La presencia de las fibras de acero en el concreto hace que cambie el tipo de falla, de frágil a dúctil, presentando deformaciones últimas mayores que las correspondientes a la del mismo concreto pero sin fibras. La deformación unitaria correspondiente al esfuerzo máximo es en promedio,  $3.4 \times 10^{-3}$  para la mezcla de referencia (M1), para las mezclas con fibras de acero es de  $3.7 \times 10^{-3}$  y para las mezclas con macrofibras de polipropileno de  $3.5 \times 10^{-3}$ ; se ve en la Figura 6.10, que al agregar fibras a las mezclas, la deformación al esfuerzo máximo varía poco.

En la Tabla 6.10 se presenta un análisis comparativo del desempeño del concreto con los diferentes consumos y tipos de fibras en relación con el desempeño del mismo concreto pero sin fibras, así como los porcentajes de incremento o disminución en su desempeño para cada ensaye. Para estos tres ensayes, comparando el desempeño para ambos tipos de fibras, resulta que las fibras metálicas tienen una mejor respuesta.

**Tabla 6.10** Desempeño del concreto con diferente consumo y tipo de fibra en módulo de elasticidad, relación de Poisson y deformación unitaria máxima a 28 días

Ensaye	Tipo de fibra						
	Fibra corta de acero			Macrofibra de polipropileno			
	Porcentaje volumétrico de la fibra en la mezcla (W), %						
	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
	0.51	0.76	1.02	0.25	0.51	0.76	1.02
	Valores relativos de desempeño con respecto al concreto sin fibras (M1)						
M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>3</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>4</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>5</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>6</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>7</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>8</sub> /M <sub>1</sub>	
Módulo de elasticidad	1.04	1.06	1.05	0.98	0.97	1.02	0.99
Relación de Poisson	1.00	1.00	1.04	1.00	1.00	0.87	0.96
Deformación Máx. Unitaria	1.09	1.09	1.12	1.03	1.03	0.97	1.03
	Porcentaje de incremento o disminución (-) en su desempeño con respecto al mismo concreto sin fibra (M1), %						
	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Módulo de elasticidad	4	6	5	-2	-3	2	-1
Relación de Poisson	0	0	4	0	0	-13	-4
Deformación unitaria Máx.	9	9	12	3	3	-3	3

### 6.2.3 Resistencia a tensión

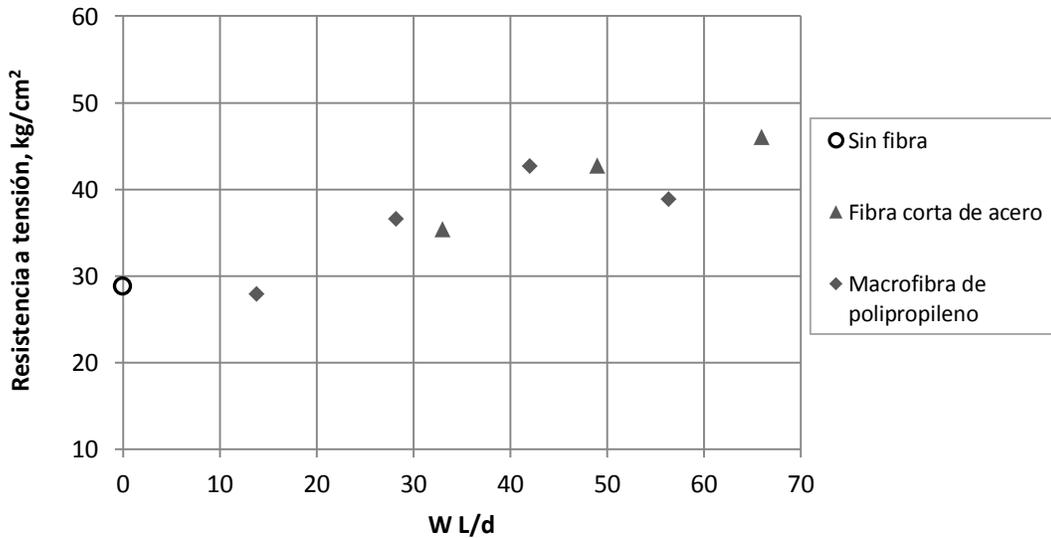
La resistencia a tensión se determinó mediante el ensaye a tensión por compresión diametral (prueba brasileña) a la edad de 28 días. En la Tabla 6.11 se presenta los resultados obtenidos.

**Tabla 6.11** Valores de resistencia a tensión de las mezclas

Mezcla	Consumo de fibra, kg/m <sup>3</sup>	W L/d	Resistencia a tensión, $f_t$ kg/cm <sup>2</sup>
M1	0	0	28.8
M2	40	33	35.4
M3	60	49	42.8
M4	80	66	46.1
M5	2.3	14	27.9
M6	4.6	28	36.6
M7	7.0	42	42.7
M8	9.3	56	38.9

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

En la Figura 6.11, se puede observar que conforme aumentan los valores del parámetro W L/d la resistencia a tensión se va incrementando proporcionalmente al consumo de fibra.



**Fig. 6.11** Influencia de las fibras cortas de acero de acero y las macrofibras de polipropileno en la resistencia a tensión

En la Tabla 6.12 se realiza un análisis comparativo del desempeño del concreto con los diferentes consumos de fibras y el desempeño del mismo concreto pero sin fibras. Para porcentajes volumétricos de 0.51% de fibras en la mezcla, se desempeña mejor la macrofibra de polipropileno; en cuanto se incrementa el porcentaje volumétrico a 0.76% y 1.02%; la fibra metálica se desempeña mejor. Para porcentajes volumétricos mayores a 0.76% de macrofibra de polipropileno la resistencia a tensión tiende a bajar.

**Tabla 6.12** Desempeño del concreto con diferente consumo y tipo de fibra en la resistencia a tensión

Tipo de fibra						
Fibra corta de acero			Macrofibra de polipropileno			
Porcentaje volumétrico de la fibra en la mezcla (W), %						
M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
0.51	0.76	1.02	0.25	0.51	0.76	1.02
Valores relativos de desempeño con respecto al concreto sin fibras (M1)						
M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>3</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>4</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>5</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>6</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>7</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>8</sub> /M <sub>1</sub>
1.23	1.49	1.60	0.97	1.27	1.48	1.35
Porcentaje de incremento o disminución (-) en su desempeño con respecto al mismo concreto sin fibra (M1), %						
M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
23	49	60	-3	27	48	35

En la Tabla 6.13 se presenta las relaciones que existen entre las resistencias a tensión con la de compresión para las mezclas estudiadas. Como se observa, se puede estimar que para el concreto sin fibra la resistencia a tensión es igual a 7% de la resistencia a compresión; conforme se aumenta el consumo de fibra, el porcentaje que representa la resistencia a tensión con respecto a la de compresión aumenta, por ejemplo, para la mezcla con mayor consumo de fibra metálica M4 se tiene que su resistencia a tensión es igual a 11% de la resistencia a compresión. Para las mezclas con macrofibras de polipropileno los porcentajes que representa la resistencia tensión en relación a la resistencia a compresión son menores.

En la Tabla 6.13 se presenta la relación entre la resistencia a tensión por compresión diametral con su correspondiente raíz cuadrada de la resistencia a compresión. Los valores encontrados cambian de manera ascendente conforme se aumenta el consumo de fibra, excepto para la mezcla M5. La mezcla sin fibra tiene un valor de 1.42 y este valor aumenta hasta llegar a 2.25 que corresponde a la mezcla con un consumo de 80 kg/m<sup>3</sup> de fibra metálica. Con estas relaciones se puede calcular la resistencia a tensión a partir de la resistencia a compresión.

En el ANEXO 9, se muestran los resultados de los especímenes ensayados para cada una de las mezclas estudiadas.

**Tabla 6.13** Variación de la resistencia a tensión indirecta con la resistencia a compresión a 28 días

Mezcla	Consumo de fibra, kg/m <sup>3</sup>	Resistencia a compresión, $f'_c$ kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia a tensión, $f_t$ kg/cm <sup>2</sup>	$f_t/f'_c$ , %	$f_t/\sqrt{f'_c}$
M1	0	414	28.8	7.0	1.42
M2	40	414	35.4	8.6	1.74
M3	60	396	42.8	10.8	2.15
M4	80	418	46.1	11.0	2.25
M5	2.3	437	27.9	6.4	1.33
M6	4.6	451	36.6	8.1	1.73
M7	7.0	435	42.7	9.8	2.05
M8	9.3	449	38.9	8.7	1.84

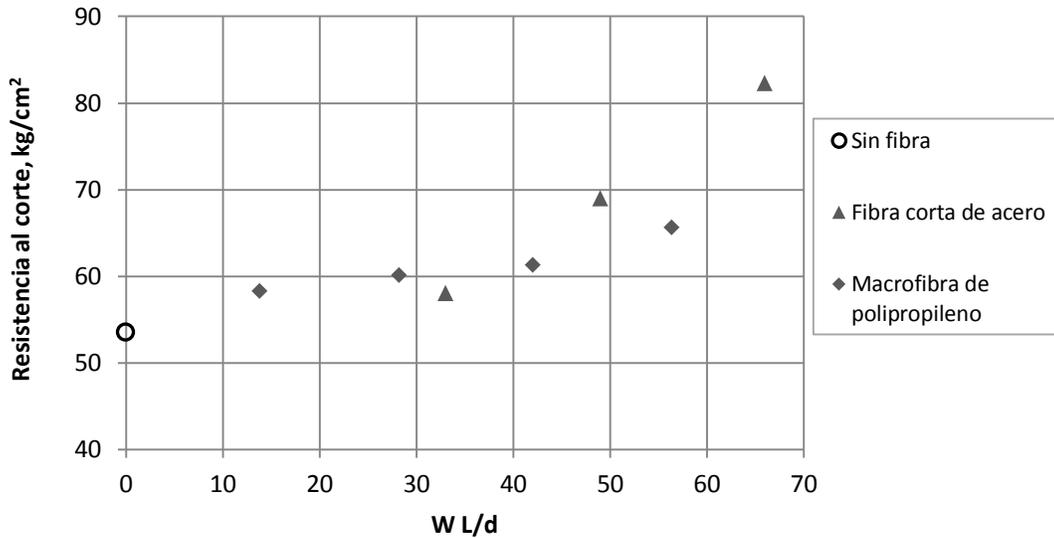
#### 6.2.4 Resistencia a cortante

Los resultados para este ensaye se presentan en la Tabla 6.14 y gráficamente en la Figura 6.12. Para este ensaye se probaron 3 especímenes para cada mezcla, los resultados que se reportan son los promedios (ver ANEXO 10).

**Tabla 6.14** Resultados del ensayes a cortante y variación de la resistencia a cortante con la resistencia a compresión

Mezcla	Consumo de fibra, kg/m <sup>3</sup>	W L/d	Resistencia a compresión, $f'_c$ kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia a cortante, $V_c$ kg/cm <sup>2</sup>	$V_c/f'_c$ , %	$V_c/\sqrt{f'_c}$
M1	0	0	414	53.5	12.9	2.63
M2	40	33	414	58.1	14.0	2.85
M3	60	49	396	69.0	17.4	3.47
M4	80	66	418	82.3	19.7	4.02
M5	2.3	14	437	58.3	13.3	2.79
M6	4.6	28	451	60.1	13.3	2.83
M7	7.0	42	435	61.3	14.1	2.94
M8	9.3	56	449	65.6	14.6	3.10

La influencia de las fibras en la resistencia a cortante del concreto resulta definitiva y como se observa en la Figura 6.12, para cualquier valor del parámetro W L/d se nota un incremento en esa resistencia. Conforme se aumenta el consumo de fibra, el incremento en la resistencia a cortante varía proporcionalmente; para el concreto sin fibras, mezcla M1, se tiene una resistencia a cortante de 53.5 kg/cm<sup>2</sup> y para la mezcla con mayor consumo de fibra metálica (M4) presenta una resistencia al cortante de 82.3 kg/cm<sup>2</sup>, y la mezcla de mayor consumo de macrofibra de polipropileno tuvo una resistencia promedio al corte de 65.6 kg/cm<sup>2</sup>, ambas mezclas contienen un porcentaje volumétrico de fibra en la mezcla de 1.02%; por lo que se obtienen valores mayores de resistencia al corte para el concreto reforzado con fibras cortas de acero.



**Fig. 6.12** Influencia de las fibras cortas de acero y las macrofibras de PP en la resistencia a cortante

La Tabla 6.14 se presenta el porcentaje de resistencia al corte respecto a la resistencia a compresión; para la mezcla de concreto sin fibras este valor es de 12.9%, mientras que para los concretos con fibras cortas de acero, este valor varía entre 14 y 19.7%, y para los concretos con macrofibras de polipropileno resultaron ser de 13.3% para la M5 y M6, 14.1 para la M7 y 14.6 para la M8 de mayor consumo.

La relación de resistencia al corte entre la raíz cuadrada de la resistencia a compresión se emplea para determinar la resistencia al corte en función de la resistencia a compresión por ejemplo: la resistencia al corte de la mezcla M2 es igual a  $2.85\sqrt{f'c}$ .

**Tabla 6.15** Desempeño del concreto con diferente consumo y tipo de fibra en la resistencia al cortante

Tipo de fibra						
Fibra corta de acero			Macrofibra de polipropileno			
Porcentaje volumétrico de fibra en la mezcla (W), %						
M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
0.51	0.76	1.02	0.25	0.51	0.76	1.02
Valores relativos de desempeño con respecto al mismo concreto sin fibras (M1)						
M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>3</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>4</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>5</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>6</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>7</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>8</sub> /M <sub>1</sub>
1.09	1.29	1.54	1.09	1.12	1.15	1.23
Porcentaje de incremento o disminución (-) en su desempeño con respecto al mismo concreto sin fibra (M1), %						
M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
9	29	54	9	12	15	23

Comparando el desempeño entre el concreto reforzado con fibras de acero y macrofibras de polipropileno con el mismo concreto pero sin fibras, se aprecia en la Tabla 6.15 que con porcentaje volumétrico de fibra de hasta 0.51%, las macrofibras tienden a desempeñarse mejor; las fibras de acero tienden a ser más eficientes para porcentajes de fibra superiores al antes señalado.

### 6.2.5 Resistencia a la abrasión

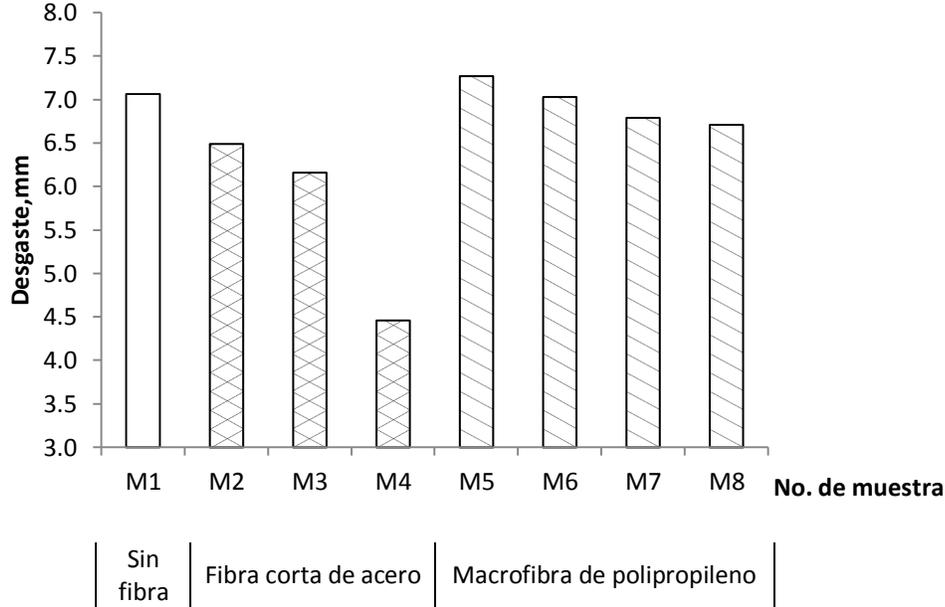
Para determinar la resistencia a la abrasión de los concretos reforzados con fibras se cortaron de cilindros de 15 x 30 cm, especímenes prismáticos de 5 x 5 x 10 cm para someter la cara de corte de 5 x 5 cm a abrasión, producida por fricción contra una capa de arena sílica humedecida; después de un lapso de 10 minutos de desgaste se suspendió el ensaye y por diferencia de longitud y peso del espécimen, medida y pesada antes y después del ensaye (ver ANEXO 11), se determinó el desgaste superficial experimentado; el ensaye se realizó a los 28 días de edad del concreto.

En la Tabla 6.16 se presenta el desgaste superficial experimentado por los concretos a la edad de 28 días, en la Figura 6.13 se puede apreciar el desgaste relativo de las ocho mezclas de concreto.

**Tabla 6.16** Resistencia a abrasión a los 28 días

Tipo de fibra	Mezcla	Consumo de fibra, kg/m <sup>3</sup>	Desgaste en g	Desgaste en mm
Sin fibra	M1	0	43.5	7.06
Fibra corta de acero	M2	40	39.4	6.49
	M3	60	34.8	6.16
	M4	80	24.7	4.46
Macrofibra de polipropileno	M5	2.3	48.3	7.27
	M6	4.6	47.3	7.03
	M7	7.0	46.3	6.79
	M8	9.3	40.3	6.71

Como se puede observar, la mezcla M5 tuvo un desgaste mayor en comparación con el de la mezcla testigo “M1” y el de las demás mezclas que tienen un consumo de fibra más grande, el desgaste fue menor. La mezcla de referencia tuvo un desgaste por abrasión de 7.06 mm en promedio equivalente a 43.5 g del peso inicial del espécimen. A partir de la mezcla M2, conforme se aumenta el consumo de fibra de acero se reduce la abrasión por desgaste. Por otra parte, los concretos con macrofibras de polipropileno a partir de la mezcla M6 la adición de fibra propicia un pequeño aumento en la resistencia a abrasión del concreto, proporcional al consumo de la fibra.



**Fig. 6.13** Desgaste superficial por abrasión a la edad de 28 días

Comparando los resultados obtenidos en los concretos con fibras con la mezcla de referencia, Tabla 6.17, se observa que el desgaste por abrasión de las mezclas reforzadas con fibras cortas de acero tienen un desempeño mejor que el de las macrofibras de polipropileno, ya que logra disminuir la abrasión por desgaste en porcentajes que van de 8 a 37% de acuerdo con el consumo de fibra que se agrega a la mezcla, mientras que las macrofibras de polipropileno proporcionan una reducción máxima de 5%.

**Tabla 6.17** Desempeño del concreto con diferente consumo y tipo de fibra en la resistencia a abrasión (desgaste) a la edad de 28 días

Tipo de fibra						
Fibra corta de acero			Macrofibra de polipropileno			
Porcentaje volumétrico de fibra en la mezcla (W), %						
M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
0.51	0.76	1.02	0.25	0.51	0.76	1.02
Valores relativos de desempeño con respecto al mismo concreto sin fibras (M1)						
M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>3</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>4</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>5</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>6</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>7</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>8</sub> /M <sub>1</sub>
0.92	0.87	0.63	1.03	1.00	0.96	0.95
Porcentaje de incremento o disminución (-) en su desempeño con respecto al mismo concreto sin fibra (M1), %						
M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
8	13	37	-3	0	4	5

### 6.2.6 Resistencia al impacto

Los resultados de este ensaye se presentan en la Tabla 6.18 y gráficamente en la Figura 6.14. Para este ensaye se probaron 4 especímenes para cada mezcla, los resultados que se presentan son los promedios. El ensaye se realizó siguiendo las recomendaciones del ACI 544.2R.

Es posible ver que de acuerdo con los resultados obtenidos, la incorporación de ambos tipos de fibra tiene un efecto muy positivo. Es evidente que a mayor contenido de fibra por metro cúbico, mayor es la resistencia al impacto, para el mismo nivel de resistencia a compresión.

La resistencia al impacto para la aparición de la primera grieta (RIPG), la cual es dada como el número de impactos necesarios para generar la primera fisura, se incrementa cuando se agrega al concreto cualquier porcentaje de fibra; para un porcentaje volumétrico de fibra de 1.02%, se requiere el doble de impactos para generar la primera grieta, en comparación con los impactos requeridos para el concreto sin fibras, como se puede observar en la Tabla 6.18. Del mismo modo, la resistencia al impacto última (RIU), dada como el número de impactos necesarios para generar la falla total, para el porcentaje volumétrico de fibra de 1.02% es de 2.3 y 2.5 veces el requerido para RIPG, al incorporar fibra metálica y macrofibra de polipropileno, respectivamente. En términos numéricos el número de impactos adicionales entre RIPG y RIU es de 1467 para el concreto con fibra metálica y 1658 con macrofibras de polipropileno.

**Tabla 6.18** Resultado de las pruebas de resistencia al impacto

Mezcla	Resistencia al impacto (RI)		
	Número de impactos		
	Primera Grieta (RIPG)	Última Grieta (RIU)	Diferencia (RIPG-RIU)
M1	559	563	4
M2	946	1048	102
M3	921	1323	402
M4	1127	2594	1467
M5	794	908	114
M6	815	971	156
M7	900	1392	492
M8	1107	2765	1658

Gráficamente en la Figura 6.14 se nota que entre mayor sea el consumo de fibra (mayor el parámetro  $W L/d$ ) se requiere mayor número de impactos después de la primera grieta (RIPG) para lograr la última grieta (RIU). Una vez que se presenta la primera grieta las macrofibras de polipropileno requieren de más impactos para lograr la última fisura.

Es evidente el efecto de la inclusión de la fibra en la resistencia al impacto, lo cual puede atribuirse a una buena dispersión de la fibra dentro de la matriz de concreto. Esta mejora en la resistencia al impacto y, por lo tanto, en la resistencia al agrietamiento, permite obtener un material con propiedades adecuadas para diversas aplicaciones donde se requiera de estas cualidades.

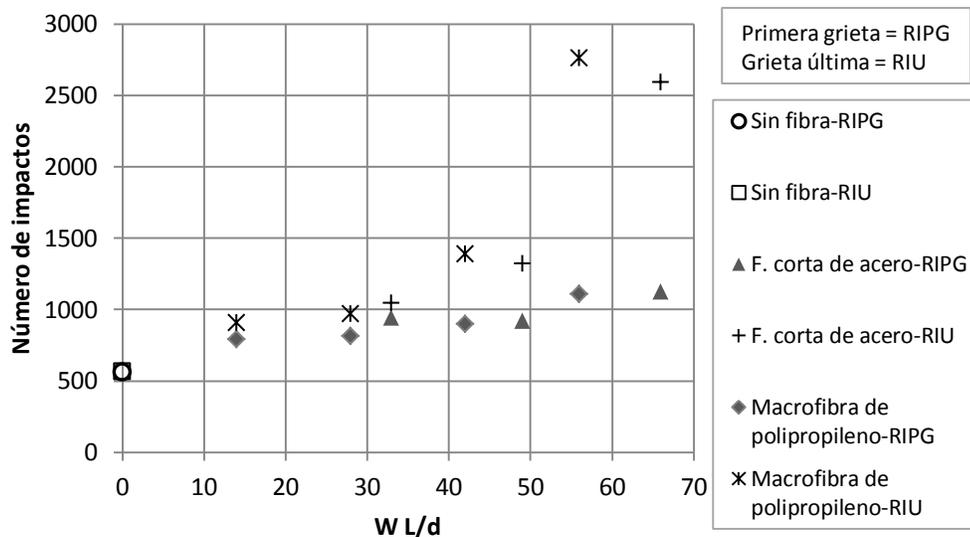


Fig. 6.14 Impactos para la aparición de la primera y la grieta última

Tabla 6.19 Desempeño del concreto con diferente consumo y tipo de fibra en la resistencia al impacto a la edad de 28 días

Número de impactos	Tipo de fibra						
	Fibra corta de acero			Macrofibra de polipropileno			
	Porcentaje volumétrico de fibra en la mezcla (W), %						
	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
	0.51	0.76	1.02	0.25	0.51	0.76	1.02
	Valores relativos de desempeño con respecto al mismo concreto sin fibras (M1)						
	M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>3</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>4</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>5</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>6</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>7</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>8</sub> /M <sub>1</sub>
Primera grieta	1.69	1.65	2.02	1.42	1.46	1.61	1.98
Grieta última	1.86	2.35	4.61	1.61	1.72	2.47	4.91
Porcentaje de incremento o disminución (-) en su desempeño con respecto al mismo concreto sin fibra (M1), %							
	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Primera Grieta	69	65	102	42	46	61	98
Grieta última	86	135	361	61	72	147	391

Comparando el desempeño del concreto reforzado con fibras con el mismo concreto pero sin fibras en cuanto a su resistencia al impacto (Tabla 6.19), se tiene que para porcentajes volumétricos de fibra iguales, los valores relativos de desempeño para la primera grieta tienden a ser un poco mayores para las mezclas con fibras cortas de acero. Para la grieta última y

porcentajes volumétricos de fibras de 0.51%, las fibras cortas de acero tienen un desempeño un 16% mayor que las macrofibras, pero para porcentajes volumétricos de 0.76 y 1.02% el desempeño cambia a favor de las macrofibras. Analizando la diferencia del número de impactos entre la primera y la última grieta (RIPG-RIU), una vez que se presenta la primera grieta las mezclas con macrofibras requieren de mayor número de impactos en comparación con los concretos con fibras de acero; aunque no es mucha la diferencia entre ambas, las macrofibras tienen un mejor desempeño en la resistencia al impacto.

### 6.2.7 Permeabilidad al agua

Los ensayos de permeabilidad al agua se realizaron con un equipo GWT-4000 fabricado por Germann Instruments A/S el cual permite determinar el flujo de agua en la superficie de la muestra de concreto cuando se aplica una presión constante (ver ANEXO 12).

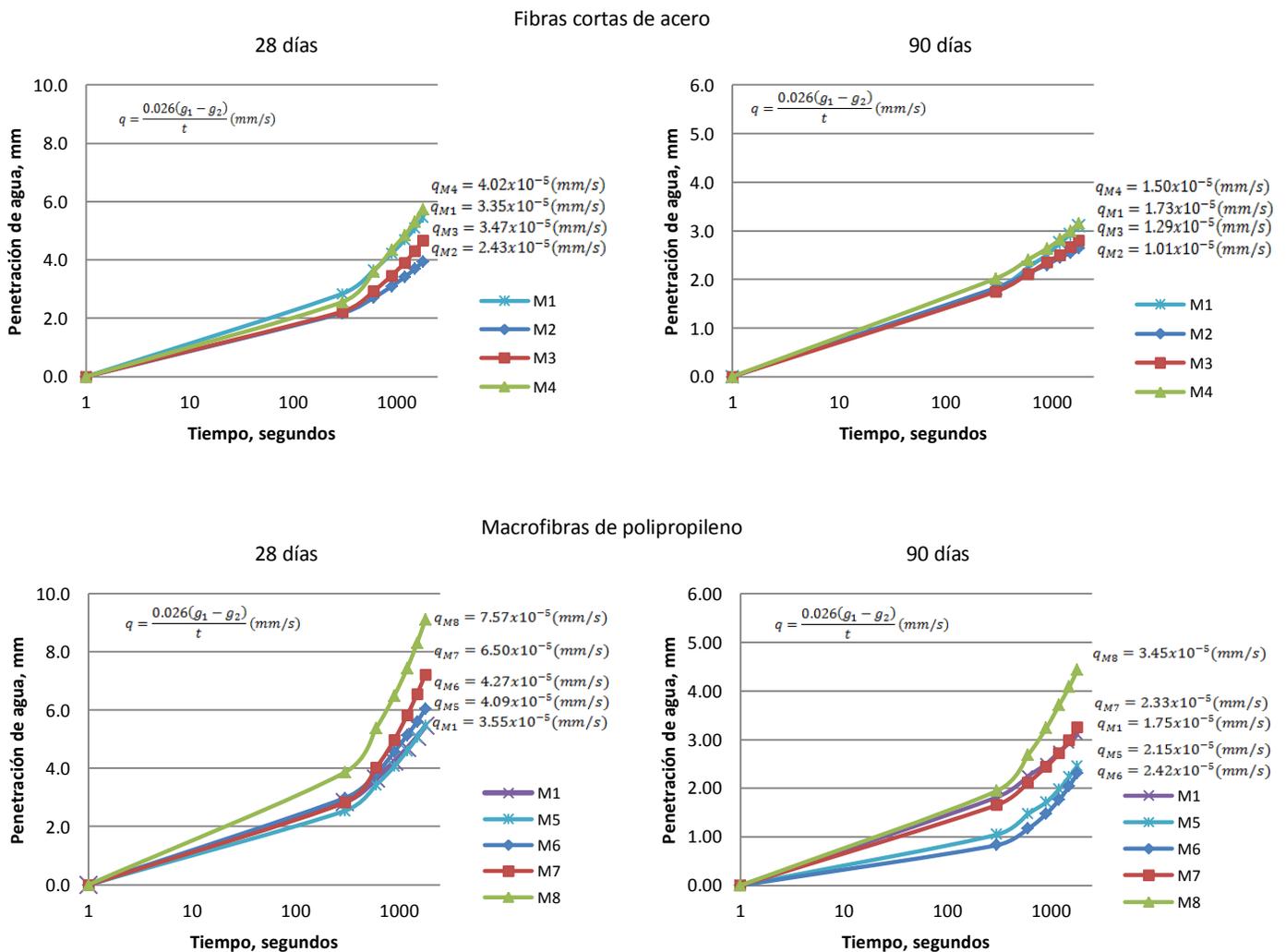


Fig. 6.15 Flujo de agua de las mezclas de concreto ensayadas a las edades de 28 y 90 días

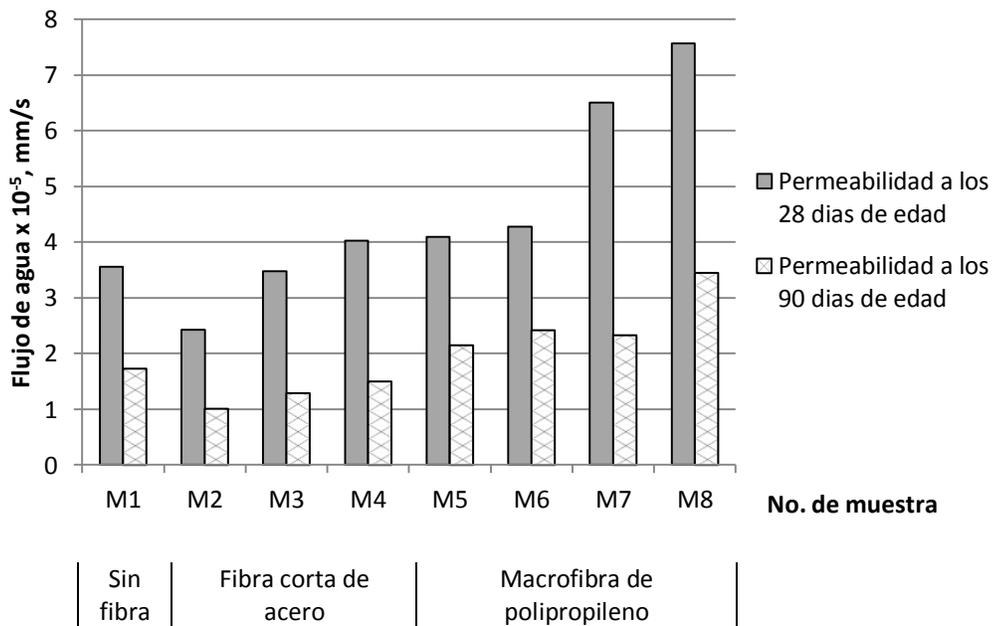
En la Figura 6.15 se ilustra gráficamente el comportamiento de la penetración del agua contra el tiempo de las diferentes muestras de concreto estudiadas a la edad de 28 y 90 días.

La Tabla 6.20 presenta los flujos de agua alcanzados para cada muestra de concreto. Cabe señalar que para cada muestra se realizaron cuatro ensayos y el resultado reportado es el valor promedio.

**Tabla 6.20** Permeabilidad al agua

Tipo de fibra	Mezcla	Consumo de fibra, kg/m <sup>3</sup>	Flujo de agua X 10 <sup>-5</sup> , mm/s	
			28 días	90 días
Sin fibra	M1	0	3.55	1.73
Fibra corta de acero	M2	40	2.43	1.01
	M3	60	3.47	1.29
	M4	80	4.02	1.50
Macrofibra de polipropileno	M5	2.3	4.09	2.15
	M6	4.6	4.27	2.42
	M7	7.0	6.50	2.33
	M8	9.3	7.57	3.45

En la Figura 6.16 se representa gráficamente el desempeño de cada mezcla a las edades de 28 y 90 días. Como se observa, de todas las mezclas estudiadas; la que presenta mayor permeabilidad al agua fue la M8, la cual pertenece al grupo de las mezclas reforzadas con macrofibras de polipropileno con un consumo de 9.3 kg/m<sup>3</sup>, a los 28 días de edad. Esta permeabilidad resulta ser el doble de la que alcanzó la mezcla testigo (M1).



**Fig. 6.16** Permeabilidad al agua a 28 y 90 días de edad

La permeabilidad del concreto sin fibras tuvo un flujo de  $3.55 \times 10^{-5}$  mm/s; para las mezclas con fibras cortas de acero resulta benéfico agregar consumos de 40 y 60 kg/m<sup>3</sup> ya que el concreto tiende a ser más impermeable; si se incrementa el consumo de esta fibra el concreto tiende a ser más permeable. Para el conjunto de mezclas en que se empleó la macrofibra de polipropileno, una vez que se agrega la fibra al concreto, la cantidad de poros aumenta provocando que también la permeabilidad se incremente.

La permeabilidad del concreto a la edad de 90 días disminuye proporcionalmente al valor obtenido a los 28 días. Realizando un análisis entre la permeabilidad a 28 y 90 días de edad se tiene: para el concreto sin fibra la permeabilidad al agua disminuye un 49%, para las fibras metálicas varía de 37 a 39% y por último para las macrofibras hay una variación de 36 a 57%.

En la Tabla 6.21, se presenta el desempeño que ofrece cada tipo y consumo de fibra respecto al mismo concreto sin fibra.

**Tabla 6.21** Desempeño del concreto con diferente tipo y consumo de fibra en la permeabilidad al agua a una edad de 28 y 90 días

Permeabilidad al agua	Tipo de fibra						
	Fibra corta de acero			Macrofibra de polipropileno			
	Porcentaje volumétrico de fibra en la mezcla (W), %						
	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
	0.51	0.76	1.02	0.25	0.51	0.76	1.02
	Valores relativos de desempeño con respecto al mismo concreto sin fibras (M1)						
	M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>3</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>4</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>5</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>6</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>7</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>8</sub> /M <sub>1</sub>
28 días	0.68	0.98	1.13	1.15	1.20	1.83	2.13
90 días	0.58	0.75	0.87	1.24	1.40	1.35	1.99
	Porcentaje de incremento o disminución (-) en su desempeño con respecto al mismo concreto sin fibra (M1), %						
	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
	28 días	32	2	-13	-15	-20	-83
90 días	42	25	13	-24	-40	-35	-99

Cuando el valor relativo de desempeño disminuye, el porcentaje de incremento en el desempeño aumenta, se tiene un concreto más impermeable; porcentajes de desempeño negativos se interpretan como un aumento en la permeabilidad del concreto con respecto al mismo concreto pero sin fibras.

Para porcentajes volumétricos iguales pero con distinto tipo de fibra, las fibras cortas de acero se desempeñan mejor ya que la permeabilidad es mucho menor que la de las macrofibras de polipropileno. Para un consumo de 40 kg/m<sup>3</sup> de fibra de acero en el concreto (M2), se logra

reducir la permeabilidad al agua en promedio 32% a los 28 días de edad y 42% a los 90 días respecto al mismo concreto pero sin fibras.

### 6.2.8 Tenacidad

La tenacidad es la medida de la capacidad de absorción de energía de un material y es utilizada para caracterizar la aptitud para resistir fracturas cuando es sometido a esfuerzos estáticos o dinámicos de impacto.

Para los concretos con fibra de acero, la información que se obtiene después del agrietamiento, permite calcular la carga al primer pico ( $P_1$ ) y la carga máxima ( $P_p$ ), su resistencia al primer pico ( $f_1$ ) y su resistencia máxima ( $f_p$ ), la flecha para el primer pico ( $\delta_1$ ) y para la carga máxima ( $\delta_p$ ), la carga residual cuando  $\delta = L/600$  ( $P_{L/600}^D$ ) y  $\delta = L/150$  ( $P_{L/150}^D$ ) y por último la resistencia residual en  $L/600$  ( $f_{L/600}$ ) y  $L/150$  ( $f_{L/150}$ ).

Para los concretos con macrofibras de polipropileno, el criterio de análisis es el mismo, excepto que la carga al primero pico (primer agrietamiento) es igual a la carga máxima ( $P_p = P_1$ ), por consecuencia las resistencias son iguales ( $f_p = f_1$ ), lo mismo pasa con la flecha al primer pico es la misma que la flecha a la carga máxima ( $\delta_p = \delta_1$ ), esto es porque una vez que se agrieta el concreto, la viga se sigue deformando y su resistencia aumenta, pero nunca es superior a la del primer pico, a diferencia de los concretos con fibra de acero.

Para ambos tipos de fibra se calcula la tenacidad del concreto; como el área bajo la curva carga-desplazamiento. El criterio de análisis para las dos tipos de fibra se puede observar en la Figura 6.17.

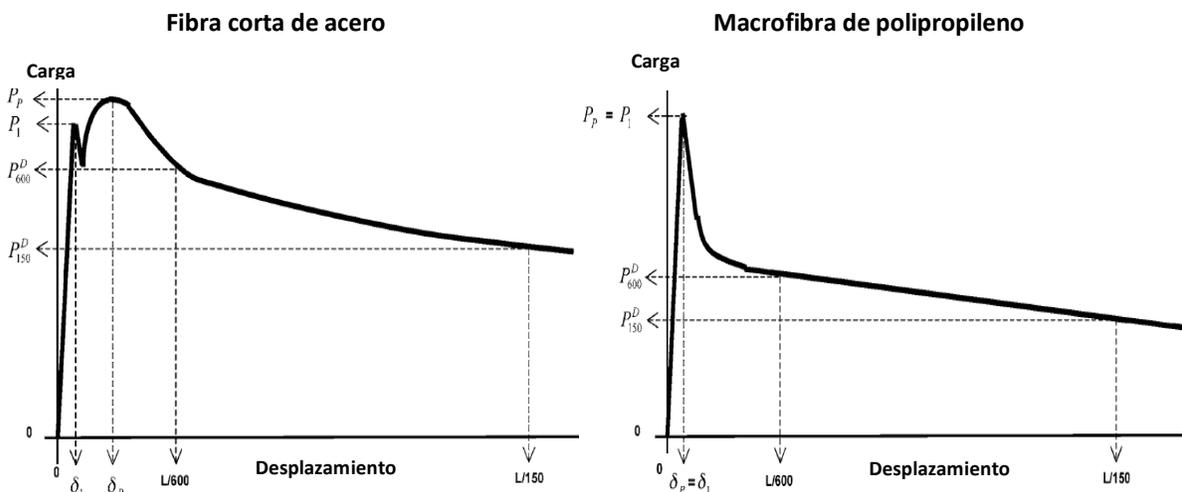


Fig. 6.17 Criterio de análisis de cargas residuales y tenacidad de acuerdo a la norma ASTM C1609

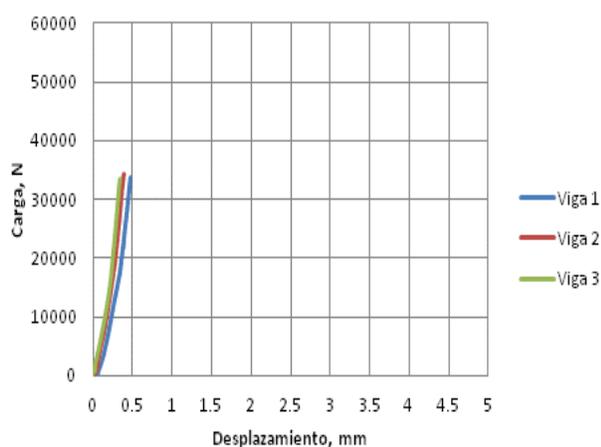
El resumen de los resultados se muestra en la Tabla 6.22 y en la Figura 6.18 se muestra gráficamente el comportamiento carga-desplazamiento registrado para cada uno de los concretos

fabricados con las mezclas en estudio; mezcla testigo sin fibra (M1), tres consumos de fibra corta de acero (M2, M3 y M4) y cuatro de macrofibra de polipropileno (M5, M6, M7, y M8).

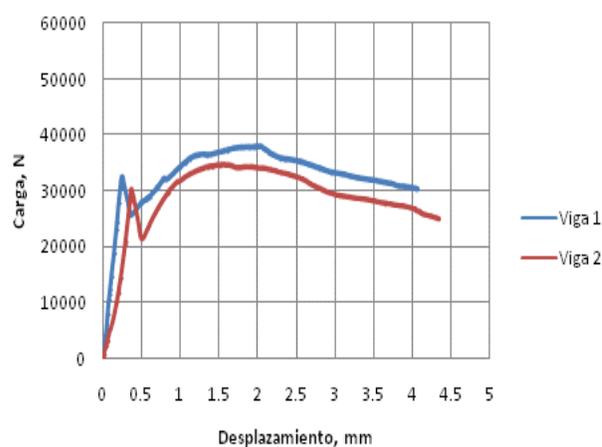
En la Tabla 6.22 se puede observar los resultados de la tenacidad. A medida que se incrementa el consumo de fibra en la mezcla, la tenacidad aumenta proporcionalmente respecto a la de un concreto sin fibra; los valores de tenacidad más altos son lo que se obtienen con los concretos fabricados con fibra de acero. Cuando se adiciona un porcentaje volumétrico de 0.51% de fibra de acero, la tenacidad aumenta 18 veces más, mientras que con macrofibras de polipropileno 10.5 veces más.

**Tabla 6.22** Resultados de las pruebas de tenacidad para las mezclas en estudio

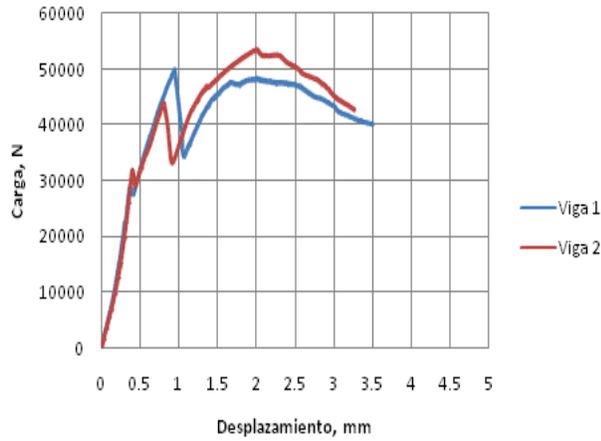
Mezcla	Carga, N		Resistencia, MPa		Flecha, mm		Carga residual, N		Resistencia residual, MPa		Tenacidad, JOULES
	Primer pico	Máxima	Primer pico	Máxima	Primer pico	Carga máxima					
	$P_1$	$P_p$	$f_1$	$f_p$	$\delta_1$	$\delta_p$	$P_{L/600}$	$P_{L/150}$	$f_{L/600}$	$f_{L/150}$	
M1	33725.07	--	4.35	--	0.40	--	--	--	--	--	5.20
M2	31429.75	36420.84	4.07	4.71	0.30	1.79	29669.30	31255.43	3.84	4.05	93.47
M3	46877.49	50884.71	6.07	6.59	0.98	1.94	42601.69	44140.20	5.51	5.71	122.27
M4	34163.14	53925.57	4.48	7.07	0.55	2.20	37482.67	47888.92	4.92	6.27	123.28
	Primer pico = Máxima		Primer pico = Máxima		Primer pico = Máxima						
	$P_1=P_p$		$f_1=f_p$		$\delta_1=\delta_p$						
M5	34404.73		4.58		0.63		8081.66	6555.91	1.07	0.87	32.30
M6	26207.99		3.48		0.35		17141.02	17557.47	2.27	2.33	54.52
M7	27293.33		3.66		0.35		24147.32	19827.75	3.24	2.66	67.35
M8	36986.11		4.91		0.44		28235.45	27220.19	3.75	3.61	81.75



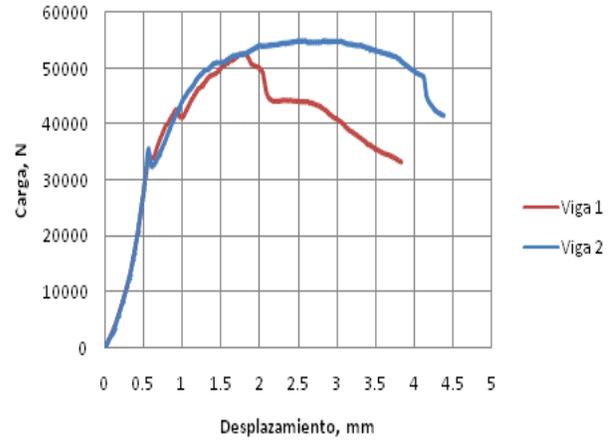
M1, sin fibra



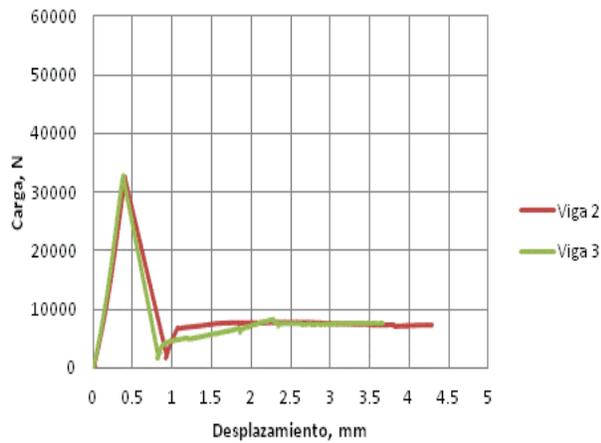
M2, consumo de 40 kg/m³ de fibra corta de acero



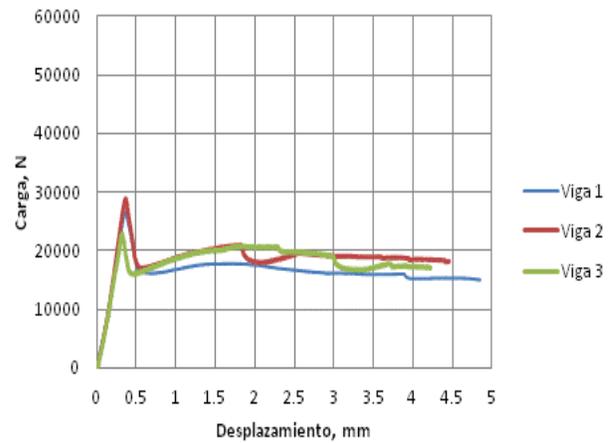
M3, consumo de 60 kg/m<sup>3</sup> de fibra corta de acero



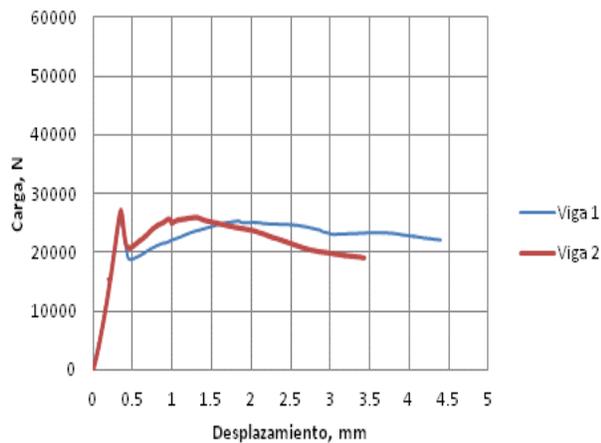
M4, consumo de 80 kg/m<sup>3</sup> de fibra corta de acero



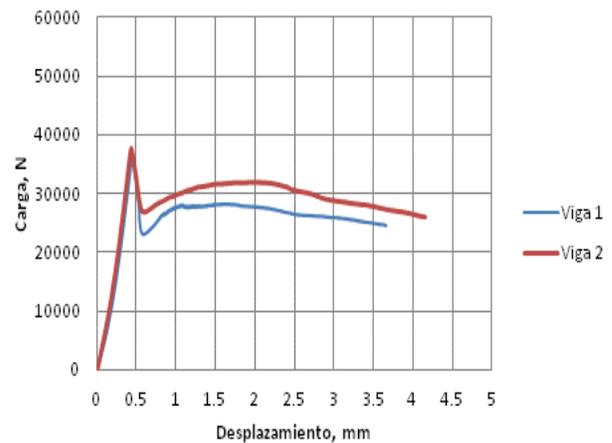
M5, consumo de 2.3 kg/m<sup>3</sup> de macrofibra de PP



M6, consumo de fibra 4.6 kg/m<sup>3</sup> de macrofibra de PP



M7, consumo de fibra 7.0 kg/m<sup>3</sup> de macrofibra de PP



M8, consumo de fibra 9.3 kg/m<sup>3</sup> de macrofibra de PP

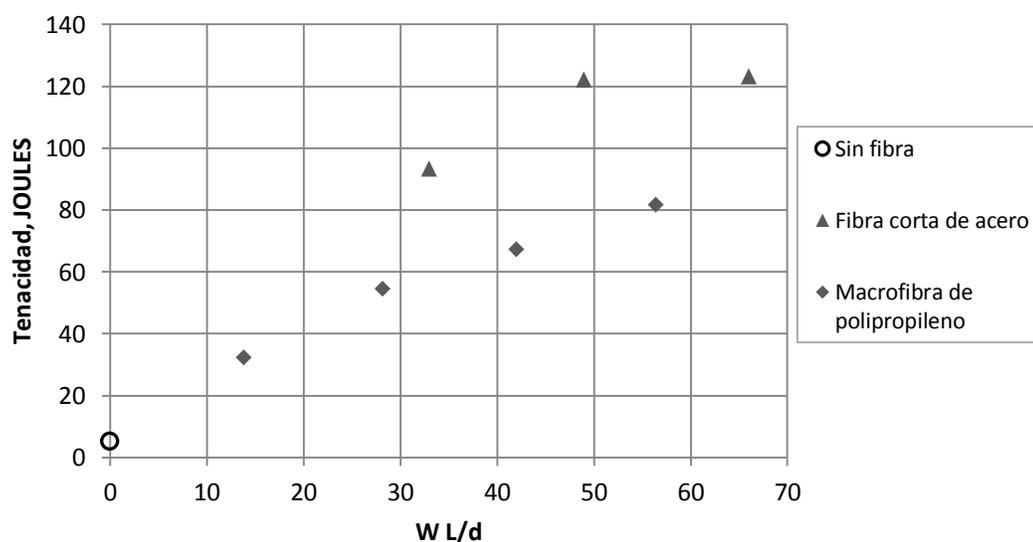
**Fig. 6.18** Comportamiento carga-desplazamiento para la mezcla testigo y para las reforzadas con fibras cortas de acero y macrofibras de polipropileno

En la Figura 6.18, se presenta el comportamiento de la mezcla testigo y de las siete mezclas que contienen fibras; se puede apreciar que las cargas residuales aumentan ya que la curva una vez que desciende cuando se presenta la primera grieta, se recupera, soportando carga adicional. Después de la primera grieta, los concretos con fibra de acero pueden alcanzar una carga mayor que la carga pico, los concretos con macrofibras de polipropileno esta carga nunca alcanza la carga pico.

Para la mezcla sin fibras solo se tiene la carga pico, ya que cuando se presenta la primera grieta el elemento falla completamente; de la misma manera que para las mezclas con fibras, el área bajo la curva, representa la tenacidad de este concreto.

Al adicionar fibra al concreto, las flechas correspondientes a las cargas pico y máxima varían, disminuyendo o aumentando su valor de acuerdo con el tipo de fibra, su consumo y con la aleatoriedad en la cantidad y reacomodo de las fibras en el concreto.

La Figura 6.19 muestra gráficamente que para cada valor del parámetro  $W L/d$  se obtiene valores de tenacidad muy por encima de la del concreto sin fibra; la tenacidad es proporcional al consumo de fibra pero las fibras cortas de acero brindan al concreto una mayor capacidad de absorción de energía, capacidad que se refleja en el valor de la tenacidad.



**Fig. 6.19** Variación de la tenacidad con el parámetro  $W L/d$

En el ANEXO 13, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los especímenes ensayados correspondientes a las 8 mezclas estudiadas.

Comparando el desempeño de los concretos reforzados con fibras y el del mismo concreto pero sin fibras (Tabla 6.23), para porcentajes volumétricos iguales de distinto tipo de fibra, los valores relativos son mayores para los concretos reforzados con fibras cortas de acero, por ejemplo; con un porcentaje volumétrico de fibra de 0.76%, la tenacidad correspondiente a un desplazamiento de L/150 es, para el concreto con fibra metálica de 122.3 JOULES y para el de macrofibras de polipropileno de 67.35 JOULES, un 45% menor.

**Tabla 6.23** Desempeño del concreto con diferente consumo y tipo de fibra en la tenacidad a la edad de 28 días

Tipo de fibra						
Fibra corta de acero			Macrofibra de polipropileno			
Porcentaje volumétrico de fibra en la mezcla (W), %						
M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
0.51	0.76	1.02	0.25	0.51	0.76	1.02
Valores relativos de desempeño con respecto al mismo concreto sin fibras (M1)						
M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>3</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>4</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>5</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>6</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>7</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>8</sub> /M <sub>1</sub>
17.98	23.51	23.71	6.21	10.48	12.95	15.72

### 6.2.9 Contracción por secado

La contracción por secado se determinó en prismas de concreto de 7.5 x 7.5 x 25 cm, los cuales se curaron en agua con cal durante 28 días, en un ambiente controlado de temperatura, 23±1.5 °C, de acuerdo con la norma ASTM C 157.

En la Tabla 6.24 se presentan las contracciones últimas calculadas a partir de los resultados obtenidos durante los primeros 211 días de exposición para las fibras cortas de acero y 141 días para las macrofibras de polipropileno; en un ambiente controlado a 43% de humedad relativa y 23°C de temperatura. Así mismo, se incluyen las expresiones que permiten estimar la contracción que se alcanza a cualquier edad t, en días, a partir de la contracción última para cada mezcla. En la Figura 6.20 se presenta las gráficas correspondientes a la contracción por secado a través del tiempo de las mezclas en estudio.

Estos valores son calculados después del ajuste que se hace a los datos obtenidos para cada una de las mezclas con la ecuación de la forma:

$$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{a+t} \right) \varepsilon_u$$

Dónde:

$\varepsilon_t$ : deformación unitaria de contracción por secado a la edad "t".

t: tiempo.

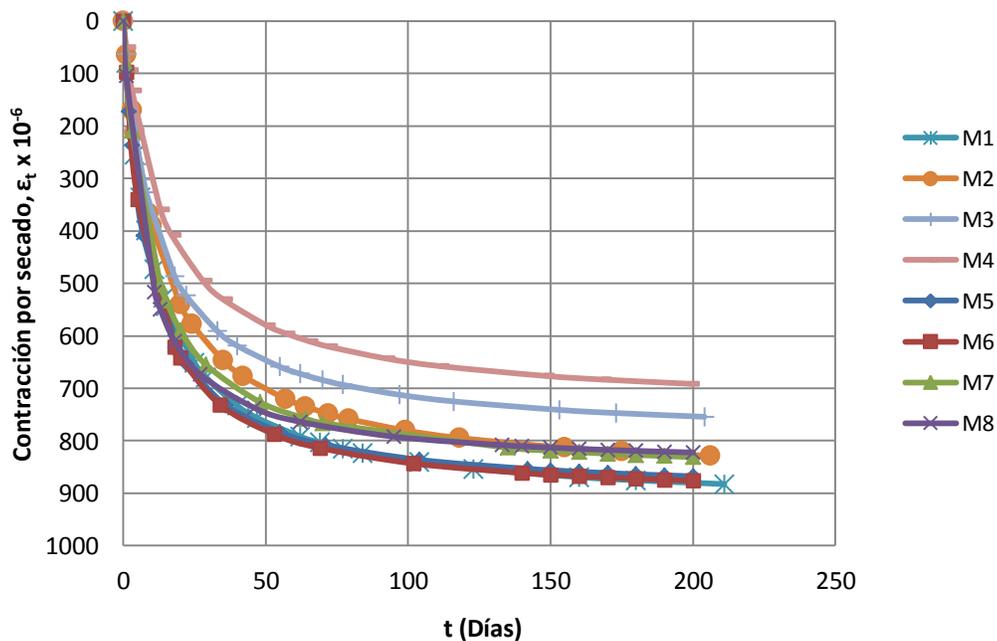
a: constante que depende de las características de cada mezcla.

$\varepsilon_u$ : contracción por secado última.

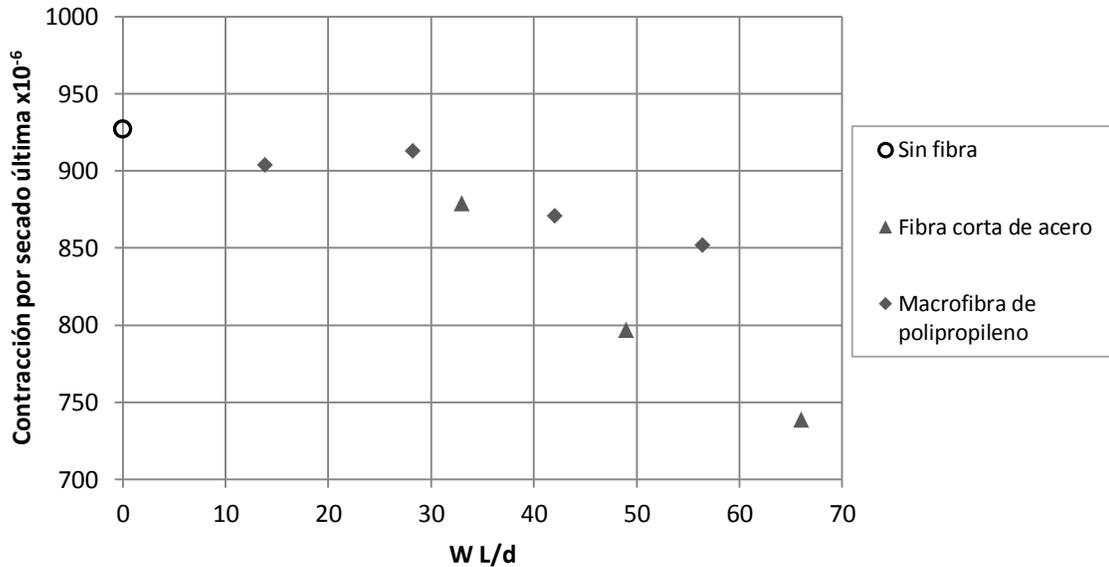
Como se puede observar en la Figura 6.21, al comparar las contracciones últimas alcanzadas para cada mezcla, la contracción por secado para la mezcla sin consumo de fibra es mayor; conforme se incrementa el consumo de fibra a la mezcla, se registra un decremento en la contracción por secado. El empleo de las macrofibras cortas de polipropileno resulta benéfico para reducir la contracción por secado en el concreto.

**Tabla 6.24** Contracción por secado

Tipo de fibra	Mezcla	Consumo de fibra, kg/m <sup>3</sup>	Parámetro W L/d	Contracción por secado última x 10 <sup>-6</sup>	Expresión para estimar la contracción a diferentes edades, t en días
Sin fibra	M1	0	0	927	$\varepsilon_t = \left(\frac{t}{10.57 + t}\right) 927x10^{-6}$
Fibra corta de acero	M2	40	33	879	$\varepsilon_t = \left(\frac{t}{12.58 + t}\right) 879x10^{-6}$
	M3	60	49	797	$\varepsilon_t = \left(\frac{t}{11.49 + t}\right) 797x10^{-6}$
	M4	80	66	739	$\varepsilon_t = \left(\frac{t}{13.79 + t}\right) 739x10^{-6}$
Macrofibra de polipropileno	M5	2.3	14	904	$\varepsilon_t = \left(\frac{t}{8.47 + t}\right) 904x10^{-6}$
	M6	4.6	28	913	$\varepsilon_t = \left(\frac{t}{8.44 + t}\right) 913x10^{-6}$
	M7	7.0	42	871	$\varepsilon_t = \left(\frac{t}{9.54 + t}\right) 871x10^{-6}$
	M8	9.3	56	852	$\varepsilon_t = \left(\frac{t}{7.14 + t}\right) 852x10^{-6}$



**Fig. 6.20** Contracción por secado a través del tiempo de las mezclas estudiadas



**Fig. 6.21** Variación de la contracción por secado última con el parámetro W L/d.

Para valores del parámetro W L/d menores o igual a 28, la adición de la macrofibra, reduce la contracción por secado un 3% en promedio. La disminución de la contracción es más notoria al adicionar la fibra metálica, alcanzando una reducción de 20% con un consumo de 80 kg/m<sup>3</sup> de fibra. En general, el empleo de las fibras resulta benéfico para reducir la contracción por secado en el concreto.

**Tabla 6.25** Desempeño del concreto con diferente consumo y tipo de fibra en la contracción por secado

Tipo de fibra						
Fibra corta de acero			Macrofibra de polipropileno			
Porcentaje volumétrico de fibra en la mezcla (W), %						
M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
0.51	0.76	1.02	0.25	0.51	0.76	1.02
Valores relativos de desempeño con respecto al mismo concreto sin fibras (M1)						
M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>3</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>4</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>5</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>6</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>7</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>8</sub> /M <sub>1</sub>
0.95	0.86	0.80	0.98	0.98	0.94	0.92
Porcentaje de incremento o disminución(-) en su desempeño con respecto al mismo concreto sin fibra (M1), %						
M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
5	14	20	2	2	6	8

Analizando el desempeño de ambas fibras en el concreto respecto al mismo concreto pero sin fibras (Tabla 6.25), se tiene que para valores relativos de desempeño menor la eficiencia de la fibra en la reducción de la contracción es mayor.

Con distinto tipo de fibra, pero con porcentajes volumétricos iguales, los valores más altos de los porcentajes de incremento en el desempeño pertenecen a los obtenidos con las mezclas de concreto con fibra corta de acero. Para las macrofibras de polipropileno la reducción de contracción por secado es de 2% a 8%, mientras que para las fibras cortas de acero es de 5% a 20%.

### 6.2.10 Flujo plástico (CREEP)

Para realizar los ensayos de flujo plástico en el concreto reforzado con fibras, se siguió la norma ASTM C 512.

Se estudió la mezcla de referencia y las siete mezclas con los diferentes consumos y tipo de fibra. Se fabricaron 7 cilindros de concreto de 10 x 20 cm para cada mezcla y se curaron durante 28 días en un ambiente controlado de humedad y temperatura. Cinco cilindros se cargaron en los marcos a una edad de 28 días; el marco se cargó al 40% de su resistencia a compresión obtenida de cada mezcla de concreto a la edad de 28 días, los dos cilindros restantes se dejaron para determinar la contracción por secado, y por diferencia, determinar el flujo plástico del espécimen cargado.

**Tabla 6.26** Coeficientes de flujo plástico últimos

Tipo de fibra	Mezcla	Consumo de fibra, kg/m <sup>3</sup>	Parámetro W L/d	Coeficiente de flujo plástico último	Expresión para estimar el coeficiente de flujo plástico a diferentes edades, t en días
Sin fibra	M1	0	0	4.86	$C_t = \left( \frac{t^{0.6}}{8.21 + t^{0.6}} \right) 4.86$
Fibra corta de acero	M2	40	33	4.15	$C_t = \left( \frac{t^{0.6}}{9.45 + t^{0.6}} \right) 4.15$
	M3	60	49	4.80	$C_t = \left( \frac{t^{0.6}}{7.22 + t^{0.6}} \right) 4.80$
	M4	80	66	4.51	$C_t = \left( \frac{t^{0.6}}{8.20 + t^{0.6}} \right) 4.51$
Macrofibra de polipropileno	M5	2.3	14	3.80	$C_t = \left( \frac{t^{0.6}}{7.94 + t^{0.6}} \right) 3.80$
	M6	4.6	28	4.36	$C_t = \left( \frac{t^{0.6}}{9.37 + t^{0.6}} \right) 4.36$
	M7	7.0	42	5.00	$C_t = \left( \frac{t^{0.6}}{8.89 + t^{0.6}} \right) 5.00$
	M8	9.3	56	5.91	$C_t = \left( \frac{t^{0.6}}{7.41 + t^{0.6}} \right) 5.91$

Al igual que en la prueba de contracción por secado, a partir de las lecturas obtenidas durante más de 211 y 141 días de observación para las fibras de acero y las macrofibras, respectivamente, y con el ajuste de dichas lecturas a unas curvas, se estimó el coeficiente de flujo plástico último para todas las mezclas. En la Tabla 6.26 se puede observar los valores alcanzados para todas las mezclas, así como la expresión para determinar dicho coeficiente a diferentes edades.

En la Figura 6.22 se presentan las gráficas correspondientes a la variación del coeficiente de flujo plástico a través del tiempo de las mezclas en estudio.

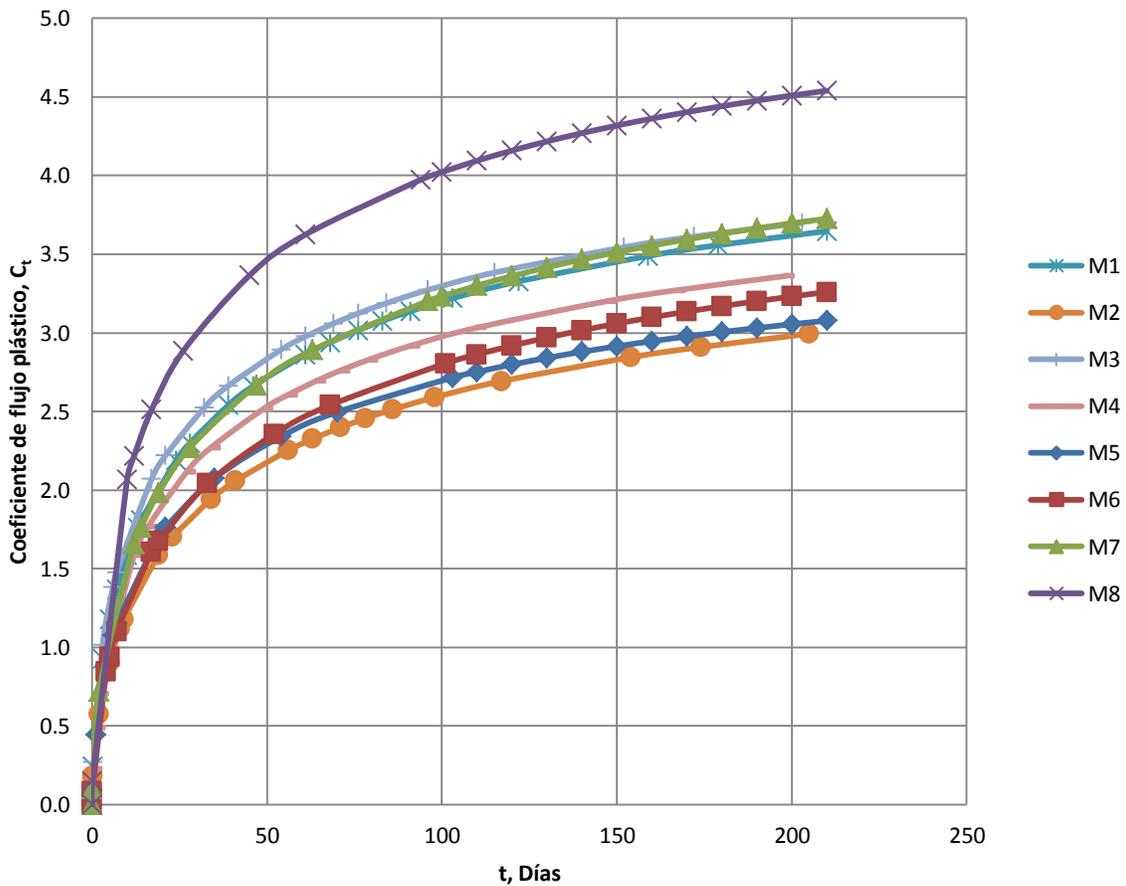
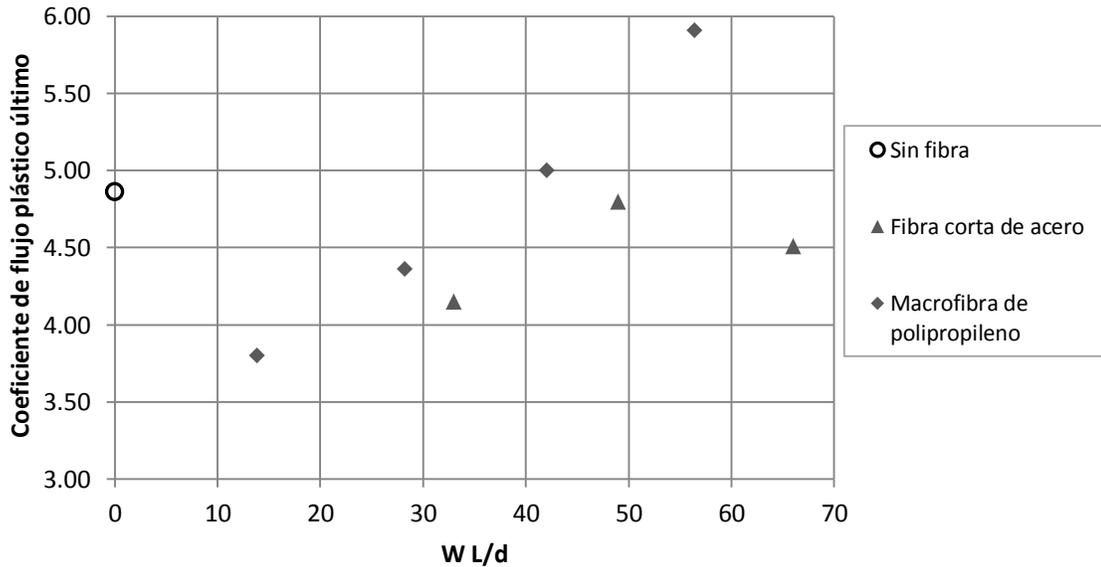


Fig. 6.22 Variación del coeficiente de flujo plástico con el tiempo

En la Figura 6.23, se aprecia que para cualquier dosificación de fibras de acero el coeficiente de flujo plástico es inferior al del mismo concreto pero sin fibras; cuando se agregan macrofibras de polipropileno, para valores del parámetro  $W L/d$  menores a 40 el coeficiente disminuye un 22% para M5 y 10% para M6; cuando este parámetro es mayor a 40 el coeficiente de flujo plástico se incrementa 3% para M7 y 22% para M8 con respecto al mismo concreto pero sin fibras.



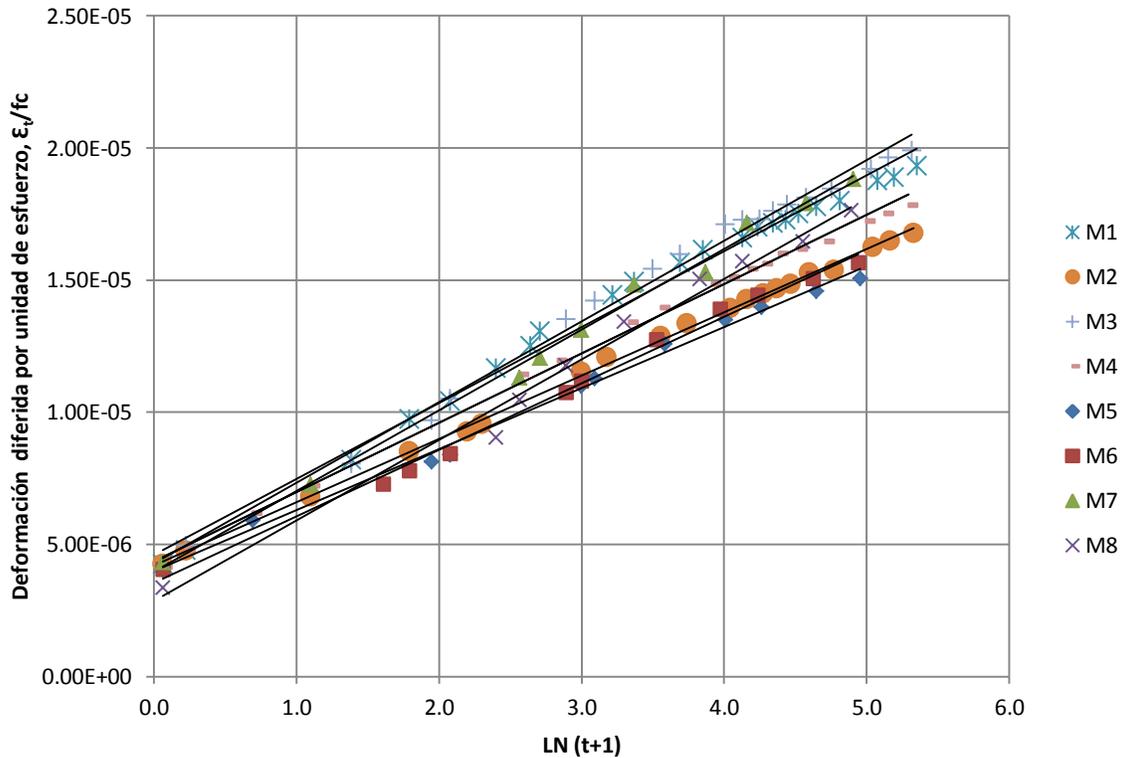
**Fig. 6.23** Variación del coeficiente de flujo plástico último con el parámetro  $W L/d$ .

El ensaye de flujo plástico también nos permite determinar la deformación por unidad de esfuerzo. En la Tabla 6.27 se encuentran las expresiones de cada una de las mezclas para determinar la deformación por unidad de esfuerzo para un determinado tiempo.

Gráficamente la Figura 6.24 muestra la variación de la deformación por unidad de esfuerzo, así como la recta que define la tendencia de los datos obtenidos y con la que se obtiene la expresión para determinar los valores de  $\epsilon_t/f_c$ .

**Tabla 6.27** Expresiones para determinar la deformación diferida por unidad de esfuerzo

Mezcla	Consumo de fibra, kg/m <sup>3</sup>	Expresión para estimar la deformación diferida por unidad de esfuerzo, t en días
M1	0	$\frac{\varepsilon_t}{f_c} = (4.60 + 2.87\text{LN}(t + 1)) \times 10^{-6}$
M2	40	$\frac{\varepsilon_t}{f_c} = (4.20 + 2.39\text{LN}(t + 1)) \times 10^{-6}$
M3	60	$\frac{\varepsilon_t}{f_c} = (4.27 + 3.05\text{LN}(t + 1)) \times 10^{-6}$
M4	80	$\frac{\varepsilon_t}{f_c} = (4.36 + 2.62\text{LN}(t + 1)) \times 10^{-6}$
M5	2.3	$\frac{\varepsilon_t}{f_c} = (3.99 + 2.31\text{LN}(t + 1)) \times 10^{-6}$
M6	4.6	$\frac{\varepsilon_t}{f_c} = (3.55 + 2.52\text{LN}(t + 1)) \times 10^{-6}$
M7	7.0	$\frac{\varepsilon_t}{f_c} = (3.96 + 3.05\text{LN}(t + 1)) \times 10^{-6}$
M8	9.3	$\frac{\varepsilon_t}{f_c} = (2.85 + 3.05\text{LN}(t + 1)) \times 10^{-6}$



**Fig. 6.24** Variación de la deformación diferida por unidad de esfuerzo con respecto al tiempo

Comparando el desempeño del concreto con ambos tipos de fibras se puede ver que mientras más pequeños sean los valores relativos de desempeño, mejor será la efectividad de la fibra (Tabla 6.28).

**Tabla 6.28** Desempeño del concreto con diferente consumo y tipo de fibra en función del coeficiente de flujo plástico último

Tipo de fibra						
Fibra corta de acero			Macrofibra de polipropileno			
Porcentaje volumétrico de fibra en la mezcla (W), %						
M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
0.51	0.76	1.02	0.25	0.51	0.76	1.02
Valores relativos de desempeño con respecto al mismo concreto sin fibras (M1)						
$M_2/M_1$	$M_3/M_1$	$M_4/M_1$	$M_5/M_1$	$M_6/M_1$	$M_7/M_1$	$M_8/M_1$
0.85	0.99	0.93	0.78	0.90	1.03	1.22
Porcentaje de incremento o disminución(-) en su desempeño con respecto al mismo concreto sin fibra (M1), %						
M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
15	1	7	22	10	-3	-22

Para las fibras cortas de acero los porcentajes de incremento en el desempeño son positivos aunque no proporcionales al consumo de la fibra, para cualquiera de los consumos se reduce el coeficiente de flujo plástico último, en cambio, el desempeño de las macrofibras de polipropileno es favorable hasta para porcentajes volumétricos de fibra de 0.51%; para porcentajes mayores se tiene una baja en el desempeño de la fibra, reduciendo su desempeño un 3 y 22% para consumos de fibra de 0.76 y 1.02%, respectivamente, en comparación con el mismo concreto pero sin fibra.

Para porcentajes volumétricos iguales pero con distinto tipo de fibra, la fibra de acero se desempeña mejor en comparación con el del mismo concreto pero sin fibras (M1).

## CONCLUSIONES

Se cumplió con los objetivos planteados al inicio de la investigación, el programa experimental permitió determinar a cada una de las mezclas sus propiedades en estado fresco; revenimiento, masa volumétrica, contenido de aire atrapado, tiempo de desplazamiento en el cono invertido y el índice de grieta por contracción plástica. Además, en estado endurecido se determinó: resistencia a compresión, tensión, cortante, impacto, abrasión, módulo elástico, contracción por secado, tenacidad, permeabilidad al agua y flujo plástico.

La trabajabilidad del concreto se reduce de forma proporcional al consumo de fibras, tanto de acero como de polipropileno, sin embargo, la trabajabilidad es menor cuando se adicionan fibras cortas de acero. La prueba de cono invertido resulta adecuada para controlar en campo la trabajabilidad de estas mezclas.

La inclusión de fibras de acero y de macrofibras de polipropileno en las mezclas de concreto ayuda de manera sustancial a disminuir la aparición de grietas por contracción plástica; conforme se aumenta el consumo de fibra se logra disminuir en número, espesor y longitud las grietas. Para porcentajes volumétricos iguales de ambas fibras resulta evidente que la macrofibra de polipropileno tiene un mejor desempeño que la fibra de acero para el control de grietas.

Comparando el desempeño en cuanto a resistencia a compresión del concreto con los diferentes tipos y consumos de fibras con el del mismo concreto pero sin fibras, a la edad de 28 días, la resistencia a compresión no se modifica en forma importante al agregar las fibras de acero; para 90 días de edad, la resistencia disminuye hasta un 9% para la mezcla con un consumo de fibra de  $60 \text{ kg/m}^3$ . Las macrofibras de polipropileno brindan un incremento pequeño en la resistencia a las edades de 28 y 90 días, con respecto al concreto sin fibras.

El módulo de elasticidad de los concreto con fibra corta de acero aumenta 5% en promedio; para las macrofibras de polipropileno disminuye ligeramente en comparación con el concreto sin fibra. La relación de Poisson para los concretos con fibras cortas de acero se mantiene casi constante, mientras que para las macrofibras experimenta una reducción máxima de 13% con respecto al mismo concreto pero sin fibras. La deformación unitaria máxima para los concretos con fibras de acero fue mayor que las alcanzadas en los concretos con macrofibras de polipropileno.

La resistencia a tensión se incrementa proporcionalmente al consumo de fibra; de la misma forma, el porcentaje que representa la resistencia a tensión con respecto a la de compresión aumenta con el consumo de fibra. Para porcentajes de fibras de hasta 0.51% existe un mejor desempeño de las macrofibras de polipropileno; para porcentajes mayores, el desempeño del concreto con fibras de acero tiende a ser más eficiente.

La resistencia a cortante se incrementa de forma proporcional al consumo de fibra en la mezcla; para porcentajes volumétricos iguales pero con distinto tipo de fibra, el concreto reforzado con las fibras cortas de acero permite un incremento más importante que el que se alcanza con las macrofibras de polipropileno.

La presencia de fibras cortas de acero en el concreto propicia una mejora notable en la resistencia a la abrasión y la mejora resulta proporcional al consumo de fibra; para el mayor consumo de fibra estudiado se logró reducir el desgaste por abrasión en 34%. Las macrofibras de polipropileno permitieron reducir el desgaste a la abrasión en 5%.

Es evidente el efecto benéfico que tiene la inclusión de fibras en la resistencia al impacto, tanto las fibras cortas de acero como las macrofibras de polipropileno incrementan el número de impactos requeridos para la primera y última grietas; el incremento resulta proporcional al consumo de fibra. Una vez que se presenta la primera grieta se requiere mayor número de impactos para que se presente la grieta última en los concretos fabricados con macrofibra de polipropileno, que los reforzados con fibras de acero, aunque la diferencia es muy pequeña.

A la edad de 28 días, la permeabilidad al agua se incrementa para la mayoría de los casos, excepto para el concreto fabricado con un consumo de  $40 \text{ kg/m}^3$  de fibra corta de acero. Este incremento se debe a que a mayor cantidad de fibra, mayor es el contenido de poros, siendo más grande para los concretos con macrofibras de polipropileno. También se observa que la permeabilidad a los 90 días se reduce en forma importante, debido principalmente a que a esa edad ya se encuentra hidratado la mayor parte del cementante y por lo tanto se han formado compuestos que llenan los poros.

La tenacidad es una de las propiedades en donde los dos diferentes tipos de fibra proporcionan un beneficio considerable. La mezcla sin ningún consumo de fibra (M1) tiene una tenacidad de 5.20 JOULES; con solo agregar un porcentaje volumétrico de fibra del 0.51%, para las fibras metálicas aumentan la tenacidad 18 veces mientras que las macrofibras de polipropileno 10.5 veces, ambos con respecto al mismo concreto pero sin fibras. Conforme se incrementa el consumo de fibra, la tenacidad aumenta proporcionalmente para ambos casos. Los valores más altos de tenacidad, son los obtenidos con los concretos reforzados con fibras cortas de acero.

La contracción por secado se reduce conforme se aumenta el consumo de fibra, en relación con la del concreto sin fibras (M1). Las fibras cortas de acero proporcionan una reducción mayor en la contracción que la reducción propiciada por las macrofibras de polipropileno.

El coeficiente de flujo plástico último se reduce al incluir fibras cortas de acero en el concreto aunque esta reducción no es proporcional al consumo de fibra adicionada. Cuando se emplean macrofibras de polipropileno en la mezcla, se tiene una reducción en el coeficiente para consumos de hasta 0.51% e incrementos para consumos mayores. Los coeficientes de flujo plástico último

obtenidos son relativamente altos debido principalmente al tamaño del agregado grueso empleado en la fabricación de las mezclas, que conducen a mezclas con más mortero.

Los resultados alcanzados en las diferentes pruebas efectuadas permiten concluir que las fibras proporcionan incrementos importantes en la mayoría de las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido. No se debe olvidar que la cantidad máxima de fibras a utilizar queda limitada por la trabajabilidad de la mezcla, por razones de aplicación y de costo-beneficio.

Para conocer el desempeño de un tipo de fibra particular en una mezcla de concreto, siempre es recomendable realizar un estudio para determinar las propiedades en estado fresco y endurecido, y así verificar si es eficiente y cumple con los requerimientos de la aplicación. La amplitud del estudio dependerá de la aplicación y tipo de proyecto.

Desde el punto de vista costo-beneficio el consumo de fibras de acero que tuvo mejor desempeño, dentro de los consumos estudiados, fue el de  $60 \text{ kg/m}^3$  (M3). Por otra parte, para el caso de las macrofibras de polipropileno el consumo que tuvo mejor desempeño fue el de  $7.0 \text{ kg/m}^3$  (M7).

## PROSPECTIVAS DE LA INVESTIGACIÓN

- A pesar de que los materiales de construcción han mejorado con el paso del tiempo, aún continúa la búsqueda por encontrar innovaciones. La investigación muestra la posibilidad de aplicar un material compuesto con el objeto de mejorar un material tradicional como es el concreto.
- Como ingenieros, conocer las propiedades del CRF; nos permite pensar en nuevas soluciones innovadoras, convenientes, prácticas y económicas que permitan resolver problemas de ingeniería civil y que garanticen los requerimientos del proyecto y la durabilidad de las estructuras.
- Introducir a nuestro país soluciones de CRF usadas en otras partes del mundo, adecuando a nuestras necesidades constructivas, y a las particularidades de la geografía y el clima, entre otras especificidades.

## LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- Efecto que tienen las fibras de acero y las de polipropileno cuando están expuestos a medios altamente agresivos, principalmente por el ataque de los sulfatos y los cloruros.
- Estudio de los diversos tipos de fibras sintéticas que provienen del reciclaje de plásticos.
- Influencia del agregado grueso en las propiedades de los concretos reforzados con diversos tipos y tamaños de fibras.
- Concreto bombeable reforzado con fibras de acero y macrofibras de polipropileno: compatibilidad de los aditivos y características de las mezclas.

## REFERENCIAS

- ACI544.1R. (1996). *Report on Fiber Reinforced Concrete. Reported by ACI Committee 544.*
- ACI544.2R. (1989). *"Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete"*.
- ACI544.3R. (2008). *"Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete"*. Reported by ACI Committee 544.
- ACI544.4R. (1988). *Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete.* Reported by ACI Committee 544.
- Altoubat S. A. & Lange D. A. (2001). *"Creep, Shrinkage, and Cracking of Restrained Concrete at Early Age"*. (A. M. Journal, Ed.) Farmington Hills, Michigan , EE.UU.: American Concrete Institute.
- ASTM C1116. (2010). *Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete.*
- ASTM D1557. (2012). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort.*
- Banthia, S. M. (1994). "Fiber Reinforced Cementitious Composites: Current Practice and Future Prospects".
- Barragán B., Gettu R., Agullo L. & Zerbino R. (2006). *Shear Failure of Steel Fiber-Reinforced Concrete Based on Push-Off Tests* (Vol. 103). ACI Materials Journal.
- Carmona S. & Maripangui F. (2007). Comportamiento del Concreto Reforzado con Fibras sometidas a esfuerzo de corte. *Publicación de la XVI Jornadas Chilenas del Hormigón*, (pág. 10 pp). Talca, Chile.
- Craig, R. J. (1983). "Design Procedures for Fibrous Concrete-shear, Moment and Torsion". *Structural Concrete Design Conference* (págs. 253-284). Newark: New Jersey Institute of Technology.
- Dahl, P. A. (1985). *Plastic Shrinkage and Cracking Tendency of Mortar and Concrete Containing Fibermesh.* FCB Cement and Concrete Institute, Trondheim.
- Fernández, C. M. (2003). "Hormigones con fibras: tecnología y propiedades generales". *Hormigón y Acero*(228-229), 167-176.
- Gopalaratnam V. S. & Shah S. (1986). "Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Subjected to Impact Loading". *V.83*, págs. 117-126. ACI JOURNAL.
- Hannant, D. J. (1978). *"Fiber Cements and Fiber Concretes"*. J. Wiley.

- Henager, Charles H. & Doherty T. J. (1976). "Analysis of Reinforced Fibrous Concrete Beams". (págs. 177-188). ASCE.
- Hughes B.P. & Fattuhi N. (1976). *Improving the toughness of high strength cement paste with fibre reinforcement*.
- IMCYC. (1990). Concreto refrozado con fibras de acero. *Construcción y Tecnología en Concreto*, 23-30.
- IMCYC. (2014). Concreto lanzado para tuneles y taludes. *Construcción y Tecnología en Concreto*, 46-51.
- Kosmatka S. H., Kerkhoff B. & Panarese W. C. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. México : Portlad Cemente Association.
- Morgan D.R, Neill J., McAskill N. & Duke N. (1987). Evaluation of Silica Fume Shotcrete. Quebec, Montreal , Canada : CANMET/CSCE International Workshop on Silica Fume in Concrete.
- Namaan, A. (2000). Fiber reinforcements for concrete: looking back, looking ahead. En Fifth International RILEM symposium on Fiber-Reinforced Concrete (FRC). RILEM Publications SARL.
- Rodríguez L. F. & Prado P-S. D. (1984). "Hormigón con la incorporación de fibras". *Revista de Obras Públicas*(3154), 79-96.
- Sánchez, R. A. (1978). "Los hormigones reforzados con fibras".
- Sharma, A. K. (1986). "Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams". *ACI JOURNAL*, 38, 624-628.
- UNE, N. (1989). *UNE 83500-2:1989 Fibras de Polipropileno para el Refuerzo de Hormigones. Definición y Clasificaciones*.
- UNE, N. (1989). *UNE 83500-2:1989 Fibras de Polipropileno para el Refuerzo de Hormigones. Definición y Clasificaciones. Normas UNE*.
- Verbeck, G. (1958). *Carbonation of hydrated Portland cement. ASTM Special Publication 205*. American Society for Testing and Materials.
- Williamson, G. R. (1978). "Steel Fibers as Web Reinforcement in Reinforced Concrete". *U.S. Army Science Conference, V.3*, págs. 363-377. West Point.
- Zambetti, G. (1982). *Note sul calcestruzzo*. Sika Italia.

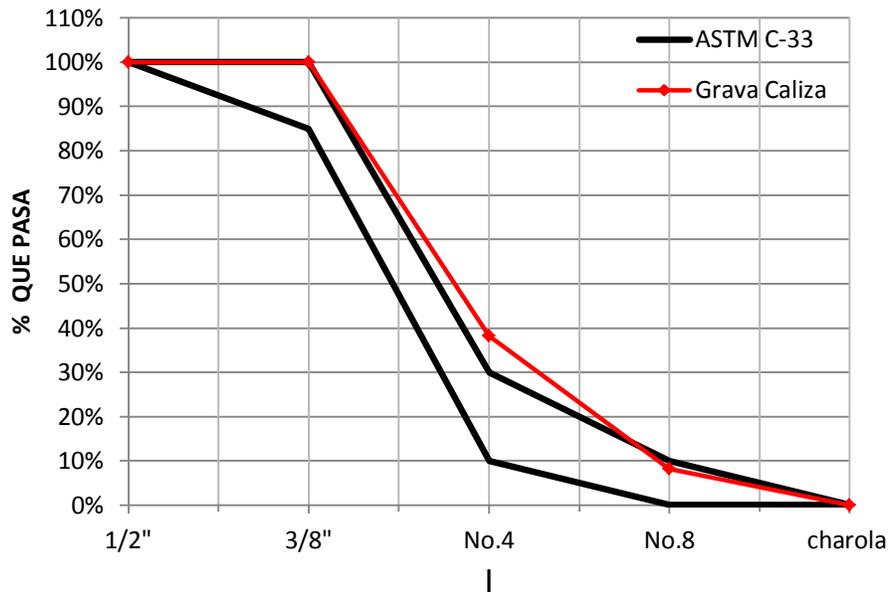
## ANEXOS

### ANEXO 1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO (CALIZA 3/8")

#### Muestra 1

**Tabla 1.1** Valores obtenidos para el agregado grueso (Grava Caliza 3/8"), muestra 1

T.M.A	Número de Malla		Retenido, gr	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa	Limites ASTM C-33	
	Pulg.	mm						
	1/2"	12.5	0	0%	0%	100%	100%	100%
	3/8"	9.5	0	0%	0%	100%	85%	100%
	No.4	4.75	1235	61.75%	61.75%	38.25%	10%	30%
	No.8	2.36	600	30.00%	9.75%	8.25%	0%	10%
	Charola		165	8.25%	100.0%	0%	0%	0%
		Total	2000					
		Perdida, %	0.00					

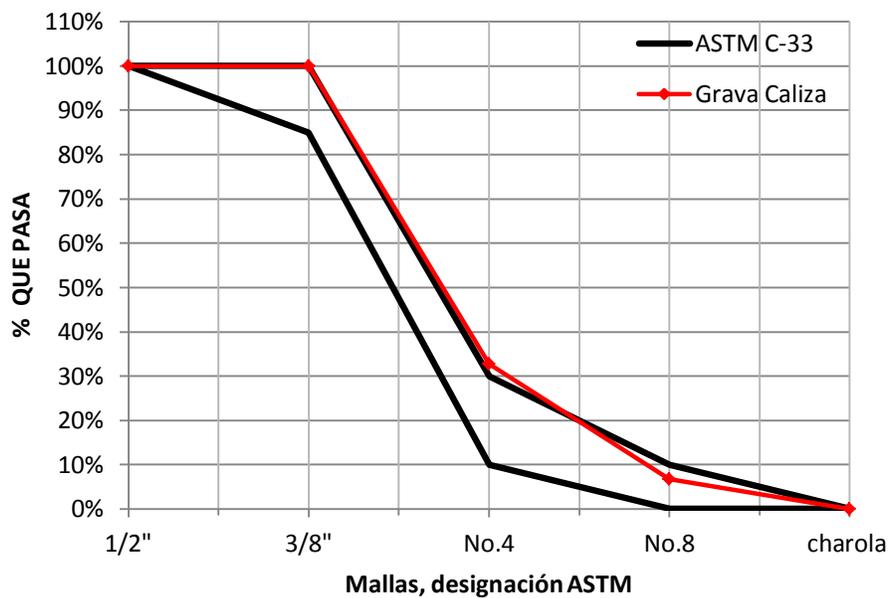


**Figura 1.1** Curva granulométrica del agregado grueso perteneciente a la muestra 1

## Muestra 2

**Tabla 1.2** Valores obtenidos para el agregado grueso (Grava Caliza 3/8"), muestra 2

T.M.A	Número de Malla		Retenido, gr	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa	Limites ASTM C-33	
	Pulg.	mm						
	1/2"	12.5	0	0%	0%	100%	100%	100%
	3/8"	9.5	0	0%	0%	100%	85%	100%
	No.4	4.75	1345	67.25%	67.25%	32.8%	10%	30%
	No.8	2.36	520	26.00%	93.25%	6.8%	0%	10%
	Charola		135	6.75%	100.0%	0.0%	0%	0%
		Total	2000					
		Perdida, %	0.00					

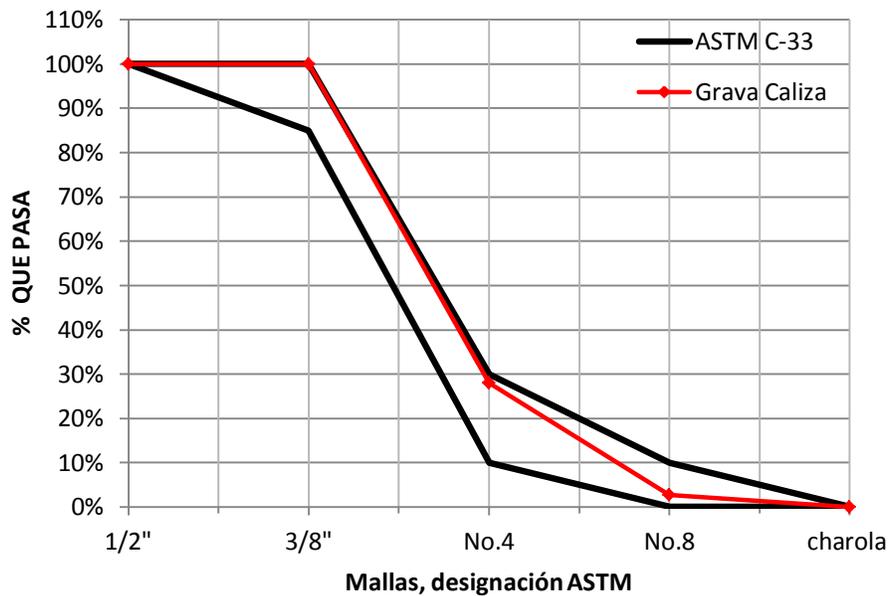


**Figura 1.2** Curva granulométrica del agregado grueso perteneciente a la muestra 2

**Muestra 3**

**Tabla 1.3** Valores obtenidos para el agregado grueso (Grava Caliza 3/8”), muestra 3

T.M.A	Número de Malla		Retenido, gr	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa	Limites ASTM C-33	
	Pulg.	mm						
	1/2"	12.5	0	0%	0%	100%	100%	100%
	3/8"	9.5	0	0%	0%	100%	85%	100%
	No.4	4.75	1440	72.00%	72.00%	28.00%	10%	30%
	No.8	2.36	505	25.25%	97.25%	2.75%	0%	10%
	Charola		55	2.75%	100.0%	0.0%	0%	0%
	Total		2000					
	Perdida, %		0.00					



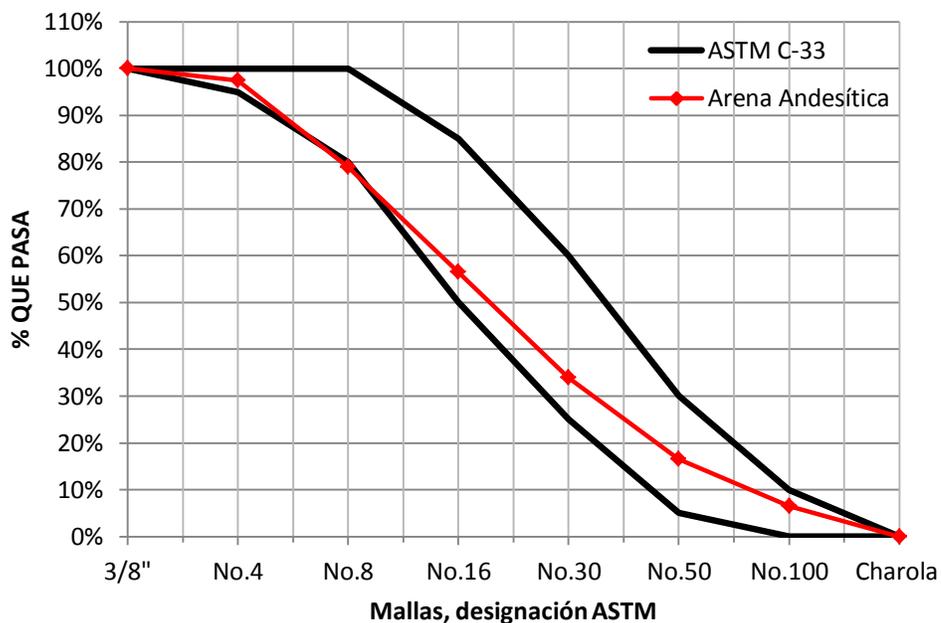
**Figura 1.3** Curva granulométrica del agregado grueso perteneciente a la muestra 3

## ANEXO 2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO (ARENA ANDESÍTICA)

### Muestra 1

**Tabla 2.1** Valores obtenidos para el agregado fino (Arena Andesítica), muestra 1

Número de Malla		Retenido, gr	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa	Limites ASTM C-33	
Pulg.	mm						
3/8"	9.5				100%	100%	100%
#4	4.75	50	2.5%	2.5%	97.5%	95%	100%
#8	2.36	370	18.5%	21.0%	79.0%	80%	100%
#16	1.18	450	22.5%	43.5%	56.5%	50%	85%
#30	0.59	450	22.5%	66.0%	34.0%	25%	60%
#50	0.3	350	17.5%	83.5%	16.5%	5%	30%
#100	0.15	200	10.0%	93.5%	6.5%	0%	10%
<#100	0	130	6.5%	100.0%	0.0%		
	Total	2000					
	Perdida, %	0.00	<b>Módulo de finura, %</b>	<b>3.1</b>			

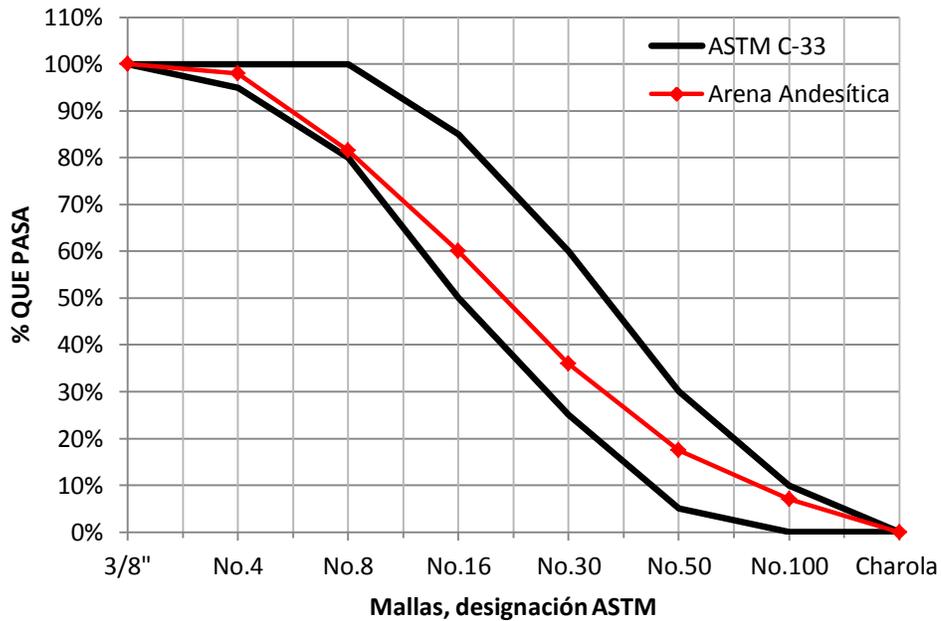


**Figura 2.1** Curva granulométrica del agregado fino perteneciente a la muestra 1

## Muestra 2

**Tabla 2.2** Valores obtenidos para el agregado fino (Arena Andesítica), muestra 2

Número de Malla		Retenido, gr	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa	Límites ASTM C-33	
Pulg.	mm						
3/8"	9.5				100%	100%	100%
#4	4.75	0	0	0	100%	95%	100%
#8	2.36	40	2.0%	2.0%	98.0%	80%	100%
#16	1.18	330	16.5%	18.5%	81.5%	50%	85%
#30	0.59	430	21.5%	40.0%	60.0%	25%	60%
#50	0.3	480	24.0%	64.0%	36.0%	5%	30%
#100	0.15	370	18.5%	82.5%	17.5%	0%	10%
<#100	0	210	10.5%	93.0%	7.0%		
	Total	2000					
	Perdida, %	0.00	<b>Módulo de finura, %</b>	<b>3.0</b>			

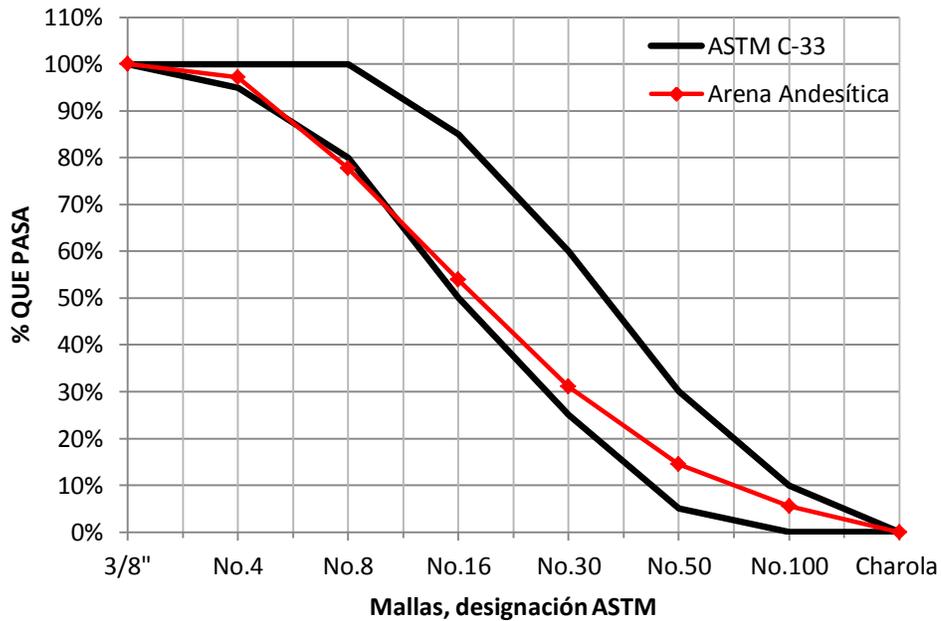


**Figura 2.2** Curva granulométrica del agregado fino perteneciente a la muestra 2

### Muestra 3

**Tabla 2.3** Valores obtenidos para el agregado fino (Arena Andesítica), muestra 3

Número de Malla		Retenido, gr	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa	Límites ASTM C-33	
Pulg.	mm						
3/8"	9.5				100%	100%	100%
#4	4.75				100%	95%	100%
#8	2.36	55	2.8%	2.8%	97.2%	80%	100%
#16	1.18	390	19.5%	22.3%	77.7%	50%	85%
#30	0.59	475	23.8%	46.1%	53.9%	25%	60%
#50	0.3	455	22.8%	68.9%	31.1%	5%	30%
#100	0.15	330	16.5%	85.5%	14.5%	0%	10%
<#100	0	180	9.0%	94.5%	5.5%		
Total		1995					
Pérdida, %		0.25%	<b>Módulo de finura, %</b>	<b>3.2</b>			



**Figura 2.3** Curva granulométrica del agregado fino perteneciente a la muestra 3

### ANEXO 3. RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGREGADO GRUESO (GRAVA CALIZA 3/8”) Y AGREGADO FINO (ARENA ANDESÍTICA)

#### Peso específico y absorción

TIPO DE AGREGADO	Agregado Grueso			Agregado Fino		
	Grava Caliza 3/8”			Arena Andesítica		
MUESTRA	1	2	3	1	2	3
Peso seco	1482.40	1478.40	1479.10	469.30	468.80	466.50
Peso SSS	1500	1500	1500	500	500	500
Peso de sumergido + peso canastilla	1161.0	1160.0	1159.0			
Peso de canastilla	226	226	226			
Peso sumergido	935.0	934.0	933.0			
Picnómetro con arena				666.2	666.2	666.2
Picnómetro con arena + agua				953	953	951.8
Volumen de agregados	0.565	0.566	0.567	0.213	0.213	0.214
Peso específico, seco	2.6237	2.6120	2.6086	2.2012	2.1989	2.1758
Peso específico, SSS	2.6549	2.6502	2.6455	2.3452	2.3452	2.3321
Absorción	1.187%	1.461%	1.413%	6.542%	6.655%	7.181%
<b>RESUMEN DE RESULTADOS</b>	<b>Grava Caliza 3/8”</b>			<b>Arena Andesítica</b>		
<b>PESO ESPECIFICO, SECO</b>	2.6237	2.6120	2.6086	2.2012	2.1989	2.1758
<b>Promedio</b>		<b>2.61</b>			<b>2.19</b>	
<b>PESO ESPECIFICO, SSS</b>	2.6549	2.6502	2.6455	2.3452	2.3452	2.3321
<b>Promedio</b>		<b>2.65</b>			<b>2.34</b>	
<b>ABSORCIÓN</b>	1.187%	1.461%	1.413%	6.542%	6.655%	7.181%
<b>Promedio</b>		<b>1.35%</b>			<b>6.79%</b>	

### Peso volumétrico suelto y peso volumétrico compactado

TIPO DE AGREGADO		Agregado Grueso			Agregado Fino		
		Grava Caliza 3/8"			Arena Andesítica		
MUESTRA		1	2	3	1	2	3
	Unidad						
Peso del material suelto + la olla	gr	18410	18425	18340	17435	17420	17430
Peso del material compacto + la olla	gr	19745	19740	19730	18625	18625	18675
Peso de la olla	gr	9080	9080	9080	9080	9080	9080
Volumen de la olla	/	6.67553	6.67553	6.67553	6.67553	6.67553	6.67553
Peso volumétrico suelto	kg/m <sup>3</sup>	1397.64	1399.89	1387.16	1251.59	1249.34	1250.84
Peso Volumétrico compactado	kg/m <sup>3</sup>	1597.63	1596.88	1595.38	1429.85	1429.85	1437.34
RESUMEN DE RESULTADOS		Grava Caliza 3/8"			Arena Andesítica		
<b>PESO VOLUMÉTRICO SUELTO</b>	kg/m <sup>3</sup>	1397.64	1399.89	1387.16	1251.59	1249.34	1250.84
<b>Promedio</b>	kg/m <sup>3</sup>		<b>1395</b>			<b>1251</b>	
<b>PESO VOLUMÉTRICO COMPACTADO</b>	kg/m <sup>3</sup>	1597.63	1596.88	1595.38	1429.85	1429.85	1437.34
<b>Promedio</b>	kg/m <sup>3</sup>		<b>1597</b>			<b>1432</b>	

#### ANEXO 4. PÉRDIDA POR LAVADO, MATERIAL QUE PASA POR LA MALLA No. 200

TIPO DE AGREGADO		Arena andesítica		
MUESTRA		1	2	3
	Unidad			
Peso del material seco antes del lavado	gr	1000	1000	1000
Peso del material seco después del lavado	gr	776.8	788.3	782.5
Perdida por lavado	%	22.32	21.17	21.75
RESUMEN DE RESULTADOS		Arena andesítica		
<b>PERDIDA POR LAVADO</b>	%	22.32	21.17	21.75
<b>Promedio</b>	%		<b>21.75</b>	

## ANEXO 5. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ADITIVO POZZOLITH 322N



3	03 30 00	Datos del Producto Concreto colocado en sitio Concreto prefabricado Concreto masivo
	03 40 00	
	03 70 00	

### Descripción

POZZOLITH 322N es un aditivo líquido listo para usarse y obtener un concreto más uniforme y de calidad predecible. Cumple con la especificación ASTM C 494 y C494 M para aditivos reductores de agua tipo A, tipo B retardantes, y tipo D aditivos retardantes y reductores de agua.

### Usos Recomendados

- Concreto pretensado y prefabricado
- Concreto reforzado
- Shotcrete vía húmeda
- Concreto ligero y de peso normal
- Concreto bombeado

## POZZOLITH® 322 N

### Aditivo reductor de agua para concreto

#### Características

- Reduce el contenido de agua requerido para una manejabilidad determinada
- Características de fraguado normales

#### Beneficios

- Mejora la trabajabilidad o manejabilidad del concreto
- Reduce la segregación
- Características de acabado superiores para superficies planas y encofradas
- Aumento de resistencia a la flexión y compresión

#### Características de desempeño

##### Datos de la mezcla

Cemento Tipo I, kg/m <sup>3</sup> (lb/yd <sup>3</sup> )	237 (400)
Asentamiento, mm(in)	125 (5)
Contenido de aire, %	Concreto sin aire incluido
Temperatura concreto	24°C (76°F)
Temperatura ambiente	23°C (74°F)

##### Tiempo de fraguado<sup>(1)</sup>

Mezcla	Fraguado	
	Hr.	Min
Concreto normal	5:20	-
POZZOLITH 322N		
195 ml/100 kg (3 oz fl/100 lb)	5:15	-0:05
325 ml/100 kg (5 oz fl/100 lb)	5:40	+0:20
460 ml/100 kg (7 oz fl/100 lb)	6:20	+1:00

##### Resistencia a la compresión<sup>(2)</sup>

Mezcla	7 días		28 días	
	MPa	psi	MPa	psi
Concreto Normal	14.8 MPa (2150 psi)	100 %	21.2 MPa (3070 psi)	100%
POZZOLITH 322N				
195 ml/100 kg (3 oz fl/100 lb)	19.4 MPa (2820 psi)	131 %	27.4 MPa (3970 psi)	129 %
325 ml/100 kg (5 oz fl/100 lb)	21.8 MPa (3160 psi)	147 %	28.3 MPa (4100 psi)	134 %
460 ml/100 kg (7 oz fl/100 lb)	22.0 MPa (3190 psi)	148 %	30.3 MPa (4390 psi)	143 %

(1) Los datos mostrados están basados en pruebas de laboratorio controladas. Se pueden experimentar variaciones razonables de los resultados aquí mostrados como resultado de las diferencias en los materiales de manufactura del concreto y en las condiciones de la obra.

El tiempo de fraguado del concreto está influenciado por la composición física y química de los ingredientes básicos del concreto, la temperatura del concreto y las condiciones climáticas. Las mezclas de prueba deben



### Producto: POZZOLITH® 322 N

hacerse con los materiales de la obra para determinar la dosificación requerida para el tiempo de fraguado especificado y un requerimiento de resistencia determinado.

#### Indicaciones de uso

##### Dosificación

El rango de dosificación recomendado para el POZZOLITH® 322 N es de 195-460 ml/100 kg (3-7 oz fl/100 lb) de cemento para la mayoría de las mezclas de concreto que usan ingredientes ordinarios de concreto. Debido a las variaciones en las condiciones de la obra y de los materiales de concreto, se podrán requerir rangos de dosificación diferentes a los recomendados. En tales casos, contacte a su representante de BASF.

##### Corrosividad

No corrosivo, no contiene cloruros

POZZOLITH 322 N no iniciará o promoverá la corrosión del acero reforzado en el concreto. Este aditivo no contiene cloruro de calcio o ingredientes a base de cloruros que hayan sido adicionados intencionalmente.

##### Compatibilidad

POZZOLITH 322 N puede utilizarse en combinación con cualquier otro aditivo de BASF Construction Chemicals y puede usarse en

concreto todo blanco, de color o concreto arquitectónico. Cuando se usa con otros aditivos, cada aditivo deberá adicionarse a la mezcla en forma separada.

##### Temperatura

Si se llega a congelar el POZZOLITH 322 N, funde a 2°C (35°F) o a una temperatura mayor y reconstituya el producto por completo con una agitación mecánica ligera. No use aire presurizado para agitar.

##### Almacenamiento

POZZOLITH 322 N tiene una vida útil de 18 meses como mínimo. Dependiendo de las condiciones de almacenamiento, la vida útil puede ser mayor.

##### Empaque

POZZOLITH 322 N se suministra en tambores de 208 l (55 gal), en tanques de 1040 l (275 gal) y a granel.

##### Seguridad

Consulte la Hoja de Datos de Seguridad (MSDS) para este producto

NOTIFICACIÓN DE GARANTÍA LIMITADA. Todo evaluo razonable es hecho para aplicar los rigurosos estándares de BASF tanto en la fabricación de nuestros productos como en la información que, esperamos en relación a estos productos y su uso. Nosotros garantizamos que nuestros productos son de buena calidad y sustentables, o, a nuestra discreción, reembolsaremos el precio de compra de cualquier producto que se pruebe estar defectuoso. El obtener resultados satisfactorios depende no solamente del uso de productos de calidad, sino también de muchos factores que están fuera de nuestro control. Por lo tanto, excepto en los casos de tales sustituciones o reembolsos, BASF NO GARANTIZA, EXPLÍCITA O IMPLÍCITAMENTE, INCLUYENDO GARANTÍAS DE DESEMPEÑO PARA UN PROPÓSITO PARTICULAR O COMERCIALIZACIÓN, CON RELACIÓN A SUS PRODUCTOS, Y BASF se reserva el derecho a responsabilidad restringida en relación con nuestros productos. Cualquier reclamo relacionado a defectos en productos debe ser recibido por escrito dentro de un (1) año de la fecha de despacho. No se considerará ningún reclamo en la notificación escrita o con fecha posterior al intervalo de tiempo especificado. El usuario deberá determinar que los productos para el uso previsto sean adecuados y asumir todo el riesgo y la responsabilidad en conexión a ello. Cualquier autorización de cambio en las recomendaciones escritas sobre el uso de nuestros productos debe llevar la firma del Gerente Técnico de BASF. La información y todo asesoramiento técnico adicional están basados en el conocimiento y experiencia actual de BASF. Sin embargo, BASF no asume ninguna responsabilidad por proporcionar dicha información y asesoramiento, incluyendo la extensión a la cual dicha información y asesoramiento pueda relacionarse a los derechos de propiedad intelectual de terceros, especialmente derechos de patente. En particular BASF nega todas LAS CONDICIONES Y GARANTÍAS, SEAN EMPRESAS O IMPLÍCITAS, INCLUYENDO LAS GARANTÍAS IMPLÍCITAS POR DESEMPEÑO PARA UN PROPÓSITO O COMERCIALIZACIÓN ESPECÍFICO. BASF NO ESTARÁ SUJETA A RESPONSABILIDAD POR DAÑOS INCIDENTALES, INDIRECTOS O CONSECUENCIALES INCLUYENDO PERDIDA DE GANANCIA O CUALQUIER TIPO. BASF se reserva el derecho de hacer cualquier cambio debido a progreso tecnológico o desarrollo futuro. Es de responsabilidad y obligación del cliente el inspeccionar y probar con cuidado cualquier bien que recibe. El desempeño del producto(s) descrito(s) aquí, deben ser verificados por medio de ensayos, que debe ser llevado a cabo solamente por expertos calificados. Es de exclusiva responsabilidad del cliente el llevar a cabo y transferir dicho ensayo. La referencia a marcas o nombres comerciales usados por otras compañías no es recomendación ni publicidad para ningún producto y no implica que uno similar no pueda ser usado.

**PARA USO PROFESIONAL ÚNICAMENTE. NO ESTÁ DISPONIBLE PARA LA VENTA AL PÚBLICO GENERAL.**

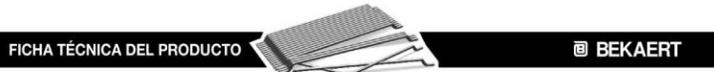
**BASF Mexicana, S.A.**  
Construction Chemicals  
Av. Insurgentes Sur 975  
México, D.F. 03710  
Tel: (55) 5325 2600  
[www.basf-cc.com.mx](http://www.basf-cc.com.mx)

Tullitlán Av. 1 No. 9 54900 Tullitlán, Edo. México Tel. (55) 5899 3984, 2122 2200	Monterrey Av. Bosques del Valle 111 66250 San Pedro Garza García, N.L. Tel. (81) 8335 4425	Guadalajara Av. San Ignacio No.1107 45050 Zapopan, Jal. Tel: (33) 3811 7335	Cancún Carr. Puerto Juárez - Tulum Km 17 77560 Cancún, Q. Roo Tel. (998) 886 3164, (045) 999 2714684	Tijuana Andador del Rey 20051 22215 Tijuana, B.C. Tel. (664) 686 66 55
--	---	--	---	---

© BASF Corporation  
© 04/2012

# ANEXO 6. FICHAS TÉCNICAS DE LA FIBRA CORTA DE ACERO Y MACROFIBRA DE POLIPROPILENO

## Fibra corta de acero Dramix-BEKAERT (RC 65/35 BN)



**Descripción:** Las fibras Dramix® son filamentos de acero, deformados y cortados en determinadas longitudes, para el refuerzo del hormigón, mortero u otros materiales compuestos. El Dramix® RC-65/35-BN es una fibra de alambre estirado en frío, con extremos conformados y encolado en peines.

**Aplicaciones:**  
- gunitado u hormigón proyectado  
- recrecidos

**Geometría:**  
Longitud (l) 35 mm  
Diámetro (d) 0,55 mm

**Certificados de aprobación:**

Conforme a <b>ASTM A820</b>		Sistema de calidad en fábricas belgas y americanas	
Producto <b>Bélgica</b> <b>ATG 1857</b>	Producto <b>Rusia</b> <b>TC-07-0116-98</b>	Producto <b>Turquía</b> <b>TS 10513</b>	Producto <b>Polonia</b> <b>Z-2117/95</b>
Producto <b>Alemania</b> <b>Z-71.4-3</b>	Producto <b>Rumanía</b> <b>015-07/012-1997</b>		

**Resistencia a tracción:**  
- del alambre: mínimo 1100 N/mm<sup>2</sup>  
- bajo carbono conforme a: DIN 17 140-D9  
- EN 10016-2 - C9D

**Galvanizado:** Ninguno

**Datos técnicos:**  
Para gunitado, ... solicitar documentación específica.

### 1 Resistencia equivalente a flexión

-  $f_{ctm,eq,300} \cdot f_{ctk,eq,300}$  = resistencia equivalente a flexión, promedio y característica, a una deformación de 1,5 mm, de acuerdo con la NBN B 15-238, 239, JSCE-SF4 y CUR35.  
-  $f_{ctm,eq,150} \cdot f_{ctk,eq,150}$  = resistencia equivalente a flexión, promedio y característica, a una deformación de 3 mm, de acuerdo con la NBN 15-238, 239, JSCE-SF4 y CUR35.

### Dramix® RC-65/35-BN

Dosisificación (l) ▼	3,7 (C20/25) (2)		4,3 (C25/30)		4,8 (C30/37)		5,3 (C35/45)		5,8 (C40/50)	
	$f_{ctm,eq}$	$f_{ctk,eq}$	$f_{ctm,eq}$	$f_{ctk,eq}$	$f_{ctm,eq}$	$f_{ctk,eq}$	$f_{ctm,eq}$	$f_{ctk,eq}$	$f_{ctm,eq}$	$f_{ctk,eq}$
20	2,3	1,9	2,6	2,2	2,8	2,4	2,9	2,6	3,1	2,7
25	2,6	2,2	2,9	2,5	3,0	2,7	3,2	2,9	3,4	3,0
30	2,8	2,5	3,1	2,7	3,2	3,0	3,5	3,2	3,6	3,3
35	3,1	2,8	3,4	3,0	3,5	3,2	3,8	3,4	3,9	3,5
40	3,3	3,1	3,6	3,3	3,8	3,4	4,0	3,6	4,2	3,7
45	3,5	3,2	3,8	3,4	4,0	3,5	4,2	3,7	4,4	3,8
50	3,7	3,3	4,0	3,5	4,2	3,6	4,4	3,8	4,6	3,9

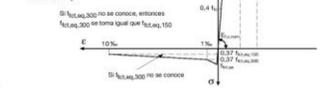
(1)  $f_{ctm,3}$  = Resistencia promedio a flexotracción del hormigón en masa (N/mm<sup>2</sup>).  
(2) Clase de hormigón correspondiente a  $f_{ctm,3}$  de acuerdo con la EN 1992-1-1.  
El valor entre corchetes [0,5] se sustituye por el valor 0,6 en la fórmula (3.1).  
 $f_{ctk,eq,300} = 0,7 \cdot f_{ctm,eq,300}$  De acuerdo con las recomendaciones Dramix®.  
 $f_{ctk,eq,150} = 0,7 \cdot f_{ctm,eq,150}$  salvo que hubiera más datos específicos disponibles.

### 2 Resistencia equivalente a tracción axial

- Resistencia equivalente a tracción axial = 0,37 x resistencia equivalente a flexión.

### 3 Diagrama de tensión-deformación

Para hormigón reforzado con fibras de acero, se aplica el siguiente diagrama de tensión-deformación (símbolos conforme al Eurocódigo 2 y a las recomendaciones de Dramix®).



### 4 Resistencia equivalente al cortante

El valor de cálculo del incremento de la resistencia al cortante debido a las fibras de acero es:  $\tau_{fd}$  (N/mm<sup>2</sup>) - (el coeficiente de seguridad del material está incluido). La contribución del hormigón y estribos debe añadirse a la de las fibras de acero.

### Dramix® RC-65/35-BN

Dosisificación (l) ▼	3,7 (C20/25) (2)		4,3 (C25/30)		4,8 (C30/37)		5,3 (C35/45)		5,8 (C40/50)	
	$\tau_{fd}$	$\tau_{fd}$	$\tau_{fd}$	$\tau_{fd}$	$\tau_{fd}$	$\tau_{fd}$	$\tau_{fd}$	$\tau_{fd}$	$\tau_{fd}$	$\tau_{fd}$
20	0,16	0,19	0,21	0,23	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36
25	0,18	0,22	0,24	0,27	0,30	0,33	0,36	0,39	0,41	0,44
30	0,21	0,25	0,27	0,30	0,33	0,36	0,39	0,41	0,44	0,46
35	0,23	0,27	0,30	0,33	0,36	0,39	0,41	0,44	0,46	0,48
40	0,25	0,30	0,33	0,36	0,39	0,41	0,44	0,46	0,48	0,50
45	0,26	0,32	0,35	0,39	0,41	0,44	0,46	0,48	0,50	0,52
50	0,28	0,33	0,37	0,41	0,44	0,46	0,48	0,50	0,52	0,54

(1)  $f_{ctm,3}$  = Resistencia promedio a flexotracción del hormigón en masa (N/mm<sup>2</sup>).  
(2) Clase de hormigón correspondiente a  $f_{ctm,3}$  de acuerdo con la EN 1992-1-1.  
El valor entre corchetes [0,5] se sustituye por el valor 0,6 en la fórmula (3.1).  
Por favor consultar también las recomendaciones de Dramix®.

### 5 Valores de tenacidad

### Dramix® RC-65/35-BN

Dosisificación ▼	Re1,6 (%)	Re3 (%)
20	58	50
25	64	56
30	69	62
35	75	67
40	80	72
45	84	75
50	88	77

Valores promediados a flexotracción del hormigón en masa  $f_{ctm,3} = 4,8$  N/mm<sup>2</sup>. Para utilizarse hasta C40/50.

### 6 Absorción de energía - ensayo de placa

La absorción de energía (J) de una placa de gunita de hormigón C30/37, de acuerdo con SNCF:

### Dramix® RC-65/35-BN

Dosisificación ▼	825 (J)	Dosisificación ▼	825 (J)
20	800	35	1130
25	910	40	1245
30	1015		

N.V. Bekaert S.A. - Bekaertstraat 2 - 8550 Zvevegem - Belgium  
Tel. +32 (0) 56 / 76 69 86 - Fax +32 (0) 56 / 76 79 47  
Internet: <http://www.bekaert.com/building>

Reservado el derecho de modificaciones. Todos los detalles describen nuestros productos solo de forma general. Para pedidos y cálculos se deben usar únicamente las especificaciones y documentos oficiales. © N.V. Bekaert S.A. 2001.

### Recomendaciones - mezclado

#### 1. General

- ✓ preferiblemente añadir las fibras en la mezcladora de la planta hormigonera
  - ✓ dosificación máxima recomendada:
- | Tamaño del los áridos (mm) | Dosificación (kg/m <sup>3</sup> ) |           |
|----------------------------|-----------------------------------|-----------|
|                            | vertido                           | bombreado |
| 8                          | 110                               | 80        |
| 16                         | 70                                | 55        |
| 32                         | 60                                | 45        |
- ✓ es preferible una graduación continua
  - ✓ mezclar hasta que todas las fibras se separen en fibras individuales. Las fibras no aumentan el tiempo de mezclado significativamente
  - ✓ si se emplean cementos especiales o aditivos, se recomienda un ensayo preliminar

#### 2. Adición de fibras

##### 2.1. En la mezcladora de la planta

- ✓ no añadir nunca las fibras como primer componente en la mezcladora
- ✓ las fibras pueden introducirse junto con la arena y los áridos o pueden añadirse al hormigón mezclado en fresco
- ✓ solo para hormigonera: se pueden echar directamente en la mezcladora sacos cerrados degradables

##### 2.2. Camión hormigonera

- ✓ poner la mezcladora a la máxima velocidad: 12-18 rpm
- ✓ ajustar el cono a un mínimo de 12 cm (preferiblemente con plastificantes o fluidificantes)
- ✓ añadir fibras con una velocidad máxima de 60 kg/min
- ✓ los sacos cerrados degradables pueden añadirse, siempre y cuando la velocidad de la hormigonera sea de mín. 12 rpm
- ✓ equipo opcional: elevador montacargas
- ✓ después de añadir las fibras, continuar mezclando a alta velocidad, durante 4-5 minutos (± 70 rotaciones)

##### 2.3. Dosificación automática

- ✓ las fibras a granel pueden dosificarse en proporciones de hasta 3,5 kg/seg. con un equipo dosificador especialmente desarrollado

### Recomendaciones - almacenaje

Proteger los palets contra la lluvia

No apilar los palets uno encima de otro

Sacos degradables de 20 kg sobre palet de 1200 kg

# Macrofibra sintética de polipropileno MasterFiber MAC Matrix-BASF



3	03-30-00	Información de Producto
	03-37-13	Concreto vaciado en obra
	03-40-00	Shotcrete
	03-70-00	Concreto Prefabricado Concreto sin armar

## Descripción

BASF introduce a la fibra polimérica sintética MasterFiber MAC Matrix, la mejor de su línea, para uso en las más rigurosas aplicaciones de refuerzo secundario. La fibra de MasterFiber MAC Matrix fue diseñada teniendo en consideración las necesidades de los contratistas - sean contratistas de losas sobre terreno o contratistas de shotcrete.

MasterFiber MAC Matrix es una macro fibra sintética y ha sido producida específicamente para uso como refuerzo secundario para proporcionar excelente control de retracción plástica y agrietamiento por asentamiento. Fue diseñada específicamente para proporcionar excelente acabado en aplicaciones de shotcrete y losas sobre terreno, proporcionando óptimo desempeño en ambientes con corrosión.

MasterFiber MAC Matrix proporciona excelente desempeño a flexión del concreto y es un reemplazo eficaz para el uso de mallas metálicas electrosoldadas (WWR), de las barras de acero convencionales y de las barras de acero. MasterFiber MAC Matrix aumenta la tenacidad a flexión y la resistencia al impacto, al choque y a la abrasión contribuyendo a la integridad y durabilidad del concreto.

## Usos Recomendados

- Concreto lanzado
- Plataformas metálicas compuestas
- Pisos industriales y de almacenes
- Pavimentos
- Concreto prefabricado
- Losas sobre terreno residenciales y comerciales
- Paredes prefabricadas de bajo espesor
- Revestimiento de túneles
- Sistemas de paredes
- Whitetoppings y sobrepisos (la dosificación variará según la aplicación)

## MasterFiber™ MAC Matrix

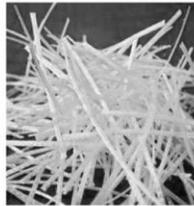
### Macrofibra sintética

#### Características

- Excelente adherencia con morteros
- Excelente distribución
- Excelente acabado

#### Beneficios

- Elimina la necesidad de uso de mallas metálicas electrosoldadas (WWR) y de las barras de acero convencionales como refuerzo secundario, dependiendo de la aplicación
- Control efectivo grietas herméticas
- Proporciona excelente reducción del agrietamiento por contracción plástica y control del asentamiento
- Reduce el tiempo de producción y costo general de mano de obra y materiales
- Mejora la resistencia temprana, permitiendo desencofrar antes con menores rechazos
- Reduce los esfuerzos en el concreto por el manejo y transporte de los elementos prefabricados



#### Características de desempeño

##### Propiedades físicas

Configuración	Fibra cohesiva
Tipo de fibra	Estrizada
Material	100% polipropileno virgen
Gravedad específica:	0.91
Punto de Fusión	160°C (320° F)
Punto de inflamabilidad	160°C (320° F)
Longitud disponible	48 - 54 mm (1.9 - 2.1 in)
Absorción de agua	Ninguna
Resistencia a la tracción	586 MPa (85 psi) min
Resistente a álcalis	Excelente
Resistencia química	Excelente
Color	Bianco, traslúcido
Conductividad eléctrica	Baja

El promedio de 44.950 fibras por kg (20.430 fibras por lb) (asumiendo una longitud de 50 mm de fibra, 4000 denier)

#### Indicaciones de Uso

**Dosificación:** La dosificación recomendada para MasterFiber MAC Matrix para aplicaciones de losas sobre terreno son típicamente de 1,8 – 3kg/m<sup>3</sup> (3 – 5lb/yd<sup>3</sup>). Para shotcrete la dosificación típica es de 6 – 7 kg/m<sup>3</sup> (10 – 11 lb/yd<sup>3</sup>).

**Mezclado:** Las bolsas de MasterFiber MAC Matrix pueden añadirse en cualquier momento del ciclo de la mezcla, excepto al mismo tiempo que el cemento. Para aplicaciones de losas la bolsa entera es



## Producto: MasterFiber™ MAC Matrix

alimentada dentro de la mezcladora lo que facilita el manejo, eliminando desechos. Para shotcrete, la bolsa debe ser abierta para que las fibras pueda descargarse a la mezcla. Para que la fibra se disperse, se requiere de 3 a 5 minutos de mezclado, dependiendo de cuando fue añadido a la mezcladora. BASF recomienda seguir los procedimientos de mezclado especificados en ASTM C94 / C94M.

#### Empaque

El producto de MasterFiber MAC Matrix es empacado en cajas con cuatro bolsas prepesadas biodegradables de 2.3 kg (5 lbs) cada una.

#### Especificaciones de ingeniería

MasterFiber MAC Matrix es una opción para el reemplazo de WWR y es un sistema de refuerzo secundario seguro y fácil de usar que es a prueba de oxidación, resistente al álcali y cumple con códigos de la industria de acuerdo a la norma ASTM C 94 / C 94M. MasterFiber MAC Matrix debe ser especificada para el uso en aplicaciones para:

- Aumento de la tenacidad de flexión
- Reducción de rechazo
- Aumento de cohesión
- Resistencia mayor al impacto y al choque
- Extensión de la tiempo de bombeo
- El reemplazo de WWR y otro refuerzos secundario
- Resistencia residual mejorada
- Mayor durabilidad
- Utilice en áreas que no requieren metal

#### Almacenamiento

MasterFiber MAC Matrix debe ser almacenada protegida de la intemperie y

NOTIFICACIÓN DE GARANTÍA LIMITADA. Todo esfuerzo razonable es hecho para aplicar los rigurosos estándares de BASF tanto en la fabricación de nuestros productos como en la información que esperamos en relación a estos productos y su uso. Nuestros garantizamos que nuestros productos son de buena calidad y sustentables, o, a nuestra discreción, reembolsaremos el precio de compra de cualquier producto que se pruebe está defectuoso. El obtener resultados satisfactorios depende no solamente del uso de productos de calidad, sino también de muchos factores que están fuera de nuestro control. Por lo tanto, excepto en los casos de tales sustituciones o reembolsos, BASF NO GARANTIZA, EXPLÍCITA O IMPLÍCITAMENTE, INCLuyendo GARANTÍAS DE DESEMPEÑO PARA UN PROPÓSITO PARTICULAR O COMERCIABILIDAD, CON RELACIÓN A SUS PRODUCTOS, Y BASF se estará sujeta a responsabilidad restringida en relación a los mismos. Cualquier reclamo relacionado a defectos en productos debe ser recibido por escrito dentro de un (1) año de la fecha de despacho. No se considerará ningún reclamo sin la notificación escrita o con fecha posterior al intervalo de tiempo especificado. El usuario deberá determinar que los productos sean idóneos para el uso previsto y asumir todo el riesgo y la responsabilidad en conexión a ello. Cualquier autorización de cambio no asume ninguna responsabilidad por proporcionar dicha información y asesoramiento, incluyendo la extensión a la cual dicha información y asesoramiento pueda relacionarse a los derechos de propiedad intelectual de terceros, especialmente derechos de patente. En particular BASF niega todas LAS CONDICIONES Y GARANTÍAS, SEAN EXPRESAS O IMPLÍCITAS, INCLuyendo LAS GARANTÍAS IMPLÍCITAS POR DESEMPEÑO PARA UN PROPÓSITO O COMERCIABILIDAD ESPECÍFICOS. BASF NO ESTARÁ SUJETA A RESPONSABILIDAD POR DAÑOS INCIDENTALES, INDIRECTOS O CONSECUENCIALES INCLuyendo PERDIDA DE GANANCIA. DE CUALQUIER TIPO. BASF se reserva el derecho de hacer cualquier cambio desde el momento de la fabricación o durante la fábrica. Es de exclusiva responsabilidad y obligación del cliente el inspeccionar y probar con cuidado cualquier lote que reciba. El ejemplo de productos defectivos aquí, deben ser verificados por medio de ensayo, que debe ser hecho a cabo solamente por expertos calificados. Es de exclusiva responsabilidad del cliente el llevar a cabo y transferir dicho ensayo. La referencia a marcas o nombres comerciales usados por otras compañías no es recomendación ni publicidad para ningún producto y no implica que uno similar no pueda ser usado.

**PARA USO PROFESIONAL ÚNICAMENTE. NO ESTÁ DISPONIBLE PARA LA VENTA AL PÚBLICO GENERAL.**

**BASF Corporation**  
Construction Chemicals  
23700 Chagrin Blvd  
Cleveland, OH, USA, 44122  
1-216-839-7550

**BASF Mexicana S.A. de C.V.**  
Insurgentes Sur 975  
Col. Ciudad de los Deportes  
Del. Benito Juárez c.p. 03710  
Tel. 52(55) 5325 26 00

Oficinas de Tullitlán  
55-5899-3984  
[www.basf-cc.com.mx](http://www.basf-cc.com.mx)

Guadalajara  
33-3811-7335

Monterrey  
81-8335-4425

Mérida  
999-271-1684

Tijuana  
664-686-6655

Costa Rica  
505-2440-9110  
[www.centroamerica.basf-cc.com](http://www.centroamerica.basf-cc.com)

Panamá  
507-301-0970

Puerto Rico  
1-787-258-2737  
[www.caribbean.basf-cc.com](http://www.caribbean.basf-cc.com)

Rep. Dominicana  
809-334-1025  
[www.basf-cc.com.do](http://www.basf-cc.com.do)



## ANEXO 7. VALORES DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LAS MEZCLAS ESTUDIADAS

Mezcla	Edad de ensaye	Espécimen	Diámetro promedio, mm	Altura promedio, mm	Volumen, cm <sup>3</sup>	Peso, kg	Peso volumétrico, kg/m <sup>3</sup>	Carga aplicada a la ruptura, kg	Resistencia a compresión, kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia a compresión Promedio, kg/cm <sup>2</sup>
M1	28 días	M1-T2-1	151.7	303.7	5486.1	12.125	2210.11	76200	421.78	
		M1-T2-2	151.5	303.0	5462.1	12.095	2214.36	73400	407.17	
		M1-T2-3	151.3	303.7	5462.1	12.130	2220.78	74500	414.19	<b>414</b>
	90 días	M1-T2-1	153.0	303.3	5576.9	12.235	2193.87	90700	493.33	
		M1-T2-2	152.7	304.0	5564.8	12.190	2190.54	85300	465.98	
		M1-T2-3	154.0	305.3	5687.3	12.455	2189.97	88300	474.06	<b>478</b>
M2	28 días	M2-T2-1	153.0	302.7	5564.6	12.560	2257.11	77600	422.07	
		M2-T2-2	151.7	304.7	5504.2	12.335	2241.01	74900	414.58	
		M2-T2-3	152.0	304.0	5516.3	12.400	2247.87	73600	405.60	<b>414</b>
	90 días	M2-T2-1	154.0	304.3	5668.7	12.485	2202.46	84400	453.12	
		M2-T2-2	149.3	299.0	5236.9	11.870	2266.61	83000	473.89	
		M2-T2-3	151.3	303.7	5462.1	12.290	2250.07	85800	477.01	<b>468</b>
M3	28 días	M3-T2-1	153.0	303.0	5570.8	12.405	2226.80	75000	407.93	
		M3-T2-2	153.8	304.5	5659.5	12.565	2220.16	73400	394.92	
		M3-T2-3	152.3	304.0	5540.6	12.285	2217.29	70100	384.63	<b>396</b>
	90 días	M2-T2-1	150.5	299.0	5319.0	11.870	2231.60	80000	449.70	
		M2-T2-2	153.2	304.0	5601.3	12.270	2190.55	80300	435.81	
		M2-T2-3	153.7	303.0	5619.4	12.580	2238.66	77800	419.50	<b>435</b>

Mezcla	Edad de ensaye	Espécimen	Diámetro promedio, mm	Altura promedio, mm	Volumen, cm <sup>3</sup>	Peso, kg	Peso volumétrico, kg/m <sup>3</sup>	Carga aplicada a la ruptura, kg	Resistencia a compresión, kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia a compresión Promedio, kg/cm <sup>2</sup>
M4	28 días	M4-T2-1	149.0	298.0	5196.1	11.870	2284.40	74700	428.41	
		M4-T2-2	151.0	305.0	5461.9	12.465	2282.17	74500	416.02	
		M4-T2-3	154.3	304.3	5693.2	12.755	2240.38	76500	408.93	<b>418</b>
	90 días	M4-T2-1	152.7	304.7	5577.0	12.495	2240.44	70500	385.13	
		M4-T2-2	152.3	305.0	5558.8	12.535	2254.99	80300	440.59	
		M4-T2-3	152.3	303.7	5534.5	12.400	2240.50	81600	447.72	<b>444</b>
M5	28 días	M5-T2-1	152.0	304.3	5522.4	12.195	2208.29	80400	443.08	
		M5-T2-2	152.0	300.0	5443.8	11.685	2146.50	77500	427.10	
		M5-T2-3	153.0	304.0	5589.2	12.055	2156.85	81200	441.66	<b>437</b>
	90 días	M5-T2-1	153.0	304.0	5589.2	12.240	2189.95	92500	503.12	
		M5-T2-2	150.0	299.7	5295.5	11.730	2215.07	87300	494.02	
		M5-T2-3	152.0	304.7	5528.4	12.115	2191.40	89100	491.02	<b>496</b>
M6	28 días	M6-T2-1	152.0	304.0	5516.3	12.150	2202.55	83300	459.06	
		M6-T2-2	153.0	304.0	5589.2	12.095	2164.01	83000	451.45	
		M6-T2-3	155.0	305.0	5755.1	12.420	2158.08	83300	441.46	<b>451</b>
	90 días	M6-T2-1	151.7	299.7	5413.9	11.825	2184.20	84900	469.93	
		M6-T2-2	151.7	304.3	5498.2	12.175	2214.37	86000	476.02	
		M6-T2-3	152.0	299.3	5431.7	11.880	2187.18	87200	480.55	<b>476</b>

Mezcla	Edad de ensaye	Espécimen	Diámetro promedio, mm	Altura promedio, mm	Volumen, cm <sup>3</sup>	Peso, kg	Peso volumétrico, kg/m <sup>3</sup>	Carga aplicada a la ruptura, kg	Resistencia a compresión, kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia a compresión Promedio, kg/cm <sup>2</sup>
M7	28 días	M7-T2-1	152.7	303.3	5552.6	12.110	2180.95	79100	432.11	
		M7-T2-2	153.0	303.7	5583.0	12.205	2186.09	81900	445.46	
		M7-T2-3	152.0	303.7	5510.3	12.025	2182.28	77300	425.99	<b>435</b>
	90 días	M7-T2-1	153.0	303.7	5583.0	12.165	2178.92	70500	383.46	
		M7-T2-2	151.7	298.8	5398.8	11.645	2156.95	86000	476.02	
		M7-T2-3	152.3	304.5	5549.7	12.110	2182.11	88500	485.58	<b>481</b>
M8	28 días	M8-T2-1	151.0	303.3	5432.1	11.980	2205.43	70300	392.56	
		M8-T2-2	151.0	303.3	5432.1	11.955	2200.83	80600	450.08	
		M8-T2-3	152.3	298.0	5431.2	11.655	2145.93	81700	448.27	<b>449</b>
	90 días	M8-T2-1	152.7	303.3	5552.6	12.165	2190.86	84700	462.71	
		M8-T2-2	153.5	303.3	5613.4	11.645	2074.50	91000	491.74	
		M8-T2-3	153.2	303.3	5589.1	12.110	2166.73	90700	492.25	<b>492</b>

**ANEXO 8. VALORES DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD, RELACIÓN DE POISSON Y DEFORMACIÓN UNITARIA MÁXIMA**

Mezcla	Espécimen	Módulo de Elasticidad, $E_c$ , kg/cm <sup>2</sup>	Relación de Poisson	Deformación Unitaria Máxima, $\epsilon_o$
<b>M1</b>	M1-4	207343	0.2194	0.0034
	M1-5	222137	0.2402	0.0032
	M1-6	209258	0.2388	0.0035
	<b>Promedio</b>	<b>212913</b>	<b>0.23</b>	<b>0.0034</b>
<b>M2</b>	M2-4	229893	0.2461	0.0033
	M2-5	223184	0.2397	0.0038
	M2-6	214199	0.2145	0.0039
	<b>Promedio</b>	<b>222425</b>	<b>0.23</b>	<b>0.0037</b>
<b>M3</b>	M3-4	229803	0.1975	0.0039
	M3-5	223050	0.2158	0.0038
	M3-6	226556	0.2621	0.0033
	<b>Promedio</b>	<b>226470</b>	<b>0.23</b>	<b>0.0037</b>
<b>M4</b>	M4-4	220699	0.2180	0.0037
	M4-5	228866	0.2313	0.0040
	M4-6	220059	0.2766	0.0036
	<b>Promedio</b>	<b>223208</b>	<b>0.24</b>	<b>0.0038</b>
<b>M5</b>	M5-4	213006	0.2311	0.0034
	M5-5	201779	0.2229	0.0034
	M5-6	211404	0.2317	0.0038
	<b>Promedio</b>	<b>208730</b>	<b>0.23</b>	<b>0.0035</b>
<b>M6</b>	M6-4	206077	0.2349	0.0035
	M6-5	206077	0.2348	0.0035
	M6-5	--	--	--
	<b>Promedio</b>	<b>206077</b>	<b>0.23</b>	<b>0.0035</b>
<b>M7</b>	M7-4	212205	0.1972	0.0033
	M7-5	215027	0.1709	0.0034
	M7-6	225920	0.1997	0.0032
	<b>Promedio</b>	<b>217717</b>	<b>0.20</b>	<b>0.0033</b>
<b>M8</b>	M8-4	207399	0.2198	0.0033
	M8-5	214218	0.2317	0.0035
	M8-6	209054	0.1986	0.0037
	<b>Promedio</b>	<b>210224</b>	<b>0.22</b>	<b>0.0035</b>

## ANEXO 9. RESISTENCIA A TENSION POR COMPRESION DIAMETRAL (PRUEBA BRASILEÑA)

Mezcla	Espécimen	Diámetro promedio, mm	Altura promedio, mm	Volumen, cm <sup>3</sup>	Peso, kg	Peso volumétrico, kg/m <sup>3</sup>	Carga aplicada a la ruptura, kg	Resistencia a Tensión, kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia a Tensión Promedio, kg/cm <sup>2</sup>
<b>M1</b>	M1-T2-7	151.0	303.5	5435.0	12.140	2233.66	23300	32.37	
	M1-T2-8	151.8	298.0	5395.6	11.730	2173.99	17270	24.30	
	M1-T2-9	151.7	303.5	5483.1	12.075	2202.21	21430	29.64	<b>28.8</b>
<b>M2</b>	M2-T2-7	152.3	304.0	5540.6	12.435	2244.36	20950	28.80	
	M2-T2-8	152.3	299.0	5449.4	11.880	2180.05	26860	37.54	
	M2-T2-9	151.7	304.7	5504.2	12.255	2226.48	28970	39.91	<b>35.4</b>
<b>M3</b>	M3-T2-7	150.7	303.0	5402.2	12.195	2257.43	31690	44.19	
	M3-T2-8	151.3	303.5	5459.1	12.390	2269.62	31570	43.76	
	M4-T2-9	152.3	303.0	5522.3	12.355	2237.28	29330	40.45	<b>42.8</b>
<b>M4</b>	M5-T2-7	152.0	305.0	5534.5	12.395	2239.60	32610	44.78	
	M5-T2-8	151.3	303.7	5462.1	12.445	2278.45	37270	51.63	
	M5-T2-9	151.3	304.0	5468.1	11.995	2193.65	30190	41.78	<b>46.1</b>
<b>M5</b>	M5-7	152.0	304.0	5516.3	12.040	2182.61	20050	27.62	
	M5-8	152.3	303.7	5534.5	12.020	2171.84	20270	27.90	
	M5-9	154.0	304.3	5668.7	12.170	2146.89	20730	28.16	<b>27.9</b>
<b>M6</b>	M6-7	153.0	304.0	5589.2	12.220	2186.38	27710	37.93	
	M6-8	152.5	304.7	5564.9	12.110	2176.15	26060	35.71	
	M6-9	152.7	304.3	5570.9	12.000	2154.04	26449	36.24	<b>36.6</b>

Mezcla	Espécimen	Diámetro promedio, mm	Altura promedio, mm	Volumen, cm <sup>3</sup>	Peso, kg	Peso volumétrico, kg/m <sup>3</sup>	Carga aplicada a la ruptura, kg	Resistencia a Tensión, kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia a Tensión Promedio, kg/cm <sup>2</sup>
<b>M7</b>	M7-7	151.3	299.0	5378.1	11.745	2183.85	31690	44.59	
	M7-8	153.0	304.3	5595.3	12.240	2187.56	31570	43.16	
	M7-9	151.7	304.3	5498.2	12.140	2208.00	29330	40.45	<b>42.7</b>
<b>M8</b>	M8-7	150.7	298.7	5324.9	11.440	2148.40	27230	38.52	
	M8-8	154.7	304.2	5714.7	12.315	2154.96	29370	39.74	
	M8-9	153.0	303.2	5573.8	12.175	2184.31	28030	38.47	<b>38.9</b>

## ANEXO 10. RESISTENCIA AL CORTANTE

Mezcla	Espécimen	Peso, kg	Carga aplicada a la ruptura, kg	Sección crítica		Área, cm <sup>2</sup>	Resistencia a Cortante V <sub>C</sub> , kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia a Cortante promedio, kg/cm <sup>2</sup>
				Ancho Promedio, cm	Alto Promedio, cm			
<b>M1</b>	E1	18,795	10330	10.10	20.05	202.5	51.0	<b>53.5</b>
	E2	18,955	11180	10.20	20.20	206.0	54.3	
	E3	19,025	11270	10.10	20.15	203.5	55.4	
<b>M2</b>	E1	18,920	12850	10.10	20.20	204.0	63.0	<b>58.1</b>
	E2	19,070	11990	10.20	20.20	206.0	58.2	
	E3	18,880	10830	10.10	20.20	204.0	53.1	
<b>M3</b>	E1	19,270	15240	10.15	20.05	203.5	74.9	<b>69.0</b>
	E2	19,165	11750	10.15	20.05	203.5	57.7	
	E3	19,290	15310	10.20	20.20	206.0	74.3	
<b>M4</b>	E1	19,370	17310	10.15	20.30	206.0	84.0	<b>82.3</b>
	E2	19,310	17400	10.15	20.10	204.0	85.3	
	E3	19,350	15820	10.20	20.00	204.0	77.5	
<b>M5</b>	E1	18,945	11150	10.15	20.25	205.5	54.2	<b>58.3</b>
	E2	18,870	10420	10.15	20.05	203.5	51.2	
	E3	19,010	14140	10.15	20.10	204.0	69.3	
<b>M6</b>	E1	18,970	12300	10.20	20.28	206.8	59.5	<b>60.1</b>
	E2	18,845	10470	10.10	19.98	201.7	51.9	
	E3	19,065	12460	10.20	20.10	205.0	60.8	
<b>M7</b>	E1	18,830	12290	10.15	20.00	203.0	60.5	<b>61.3</b>
	E2	18,730	11210	10.15	20.30	206.0	54.4	
	E3	18,840	12630	10.10	20.15	203.5	62.1	
<b>M8</b>	E1	18,655	12230	10.075	20.125	202.8	60.3	<b>65.6</b>
	E2	18,620	10380	10.10	20.00	202.0	51.4	
	E3	18,690	14460	10.10	20.20	204.0	70.9	

## ANEXO 11. EJEMPLO PARA LA OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA ABRASIÓN

En la siguiente tabla, se presenta el cálculo para obtener el desgaste superficial experimentado para la mezcla testigo (M1) en mm, este cálculo es el mismo que se aplica para los CRF estudiados.

Mezcla M1, 0 kg/m <sup>3</sup> de fibra corta de acero								
Cara	Especímenes							
	1		2		3		4	
	Inicial (mm)	Final (mm)						
1	103.30	97.1	104.10	95.80	98.80	90.6	96.80	90.40
	103.40	96.8	104.10	95.80	98.80	90.6	96.70	90.40
	103.20	96.8	104.20	95.90	98.60	90.5	96.50	90.20
Promedio	103.30	96.90	104.13	95.83	98.73	90.57	96.67	90.33
2	102.80	96.6	103.70	95.60	97.80	90.0	96.70	90.30
	102.30	96.2	103.10	95.70	97.50	89.7	97.30	90.70
	101.60	95.8	102.70	95.00	96.90	89.5	97.60	91.40
Promedio	102.23	96.20	103.17	95.43	97.40	89.73	97.20	90.80
3	101.60	95.9	102.50	94.70	96.90	88.9	98.20	91.70
	101.50	96.0	102.80	94.60	97.30	89.3	98.40	92.00
	101.60	96.1	102.40	94.60	97.60	89.4	98.60	92.20
Promedio	101.57	96.00	102.57	94.63	97.27	89.20	98.40	91.97
4	101.70	96.2	102.50	94.70	97.90	89.5	97.90	92.00
	102.20	96.6	103.00	95.20	98.30	90.0	97.60	91.60
	103.00	97.0	103.70	95.60	98.70	90.3	97.00	90.80
Promedio	102.30	96.60	103.07	95.17	98.30	89.93	97.50	91.47
<b>Promedio Total</b>	102.35	96.43	103.23	95.27	97.93	89.86	97.44	91.14
<b>Diferencia</b>	5.93		7.97		8.07		6.30	
<b>DESGASTE (mm)</b>	<b>7.06</b>							

A continuación, se presenta el cálculo para obtener el desgaste superficial experimentado para la mezcla testigo (M1) en peso (gramos).

M1			
Espécimen	W Inicial (grs)	W Final (grs)	Diferencia
1	570.5	533.4	37.1
2	564.7	517.6	47.1
3	545.5	495.6	49.9
4	547.5	507.8	39.7
<b>DESGASTE (grs)</b>			<b>43.5</b>

## ANEXO 12. EJEMPLO PARA CALCULAR LA PERMEABILIDAD AL AGUA CON EL EQUIPO GWT-4000

En la siguiente tabla, se muestra los valores que se obtiene al realizar el ensaye. Los datos obtenidos pertenecen a los concretos fabricados con la mezcla testigo (M1), para obtener el flujo de agua que pasa por la superficie del concreto; cuando el agua se mantiene a una presión constante de 3 BARES, se obtiene el promedio.

Mezcla M1, 0 kg/m <sup>3</sup> de fibra corta de acero								
Tiempo de ensaye		Lectura del micrómetro, mm				Promedio de las lecturas, mm	Penetración de agua, mm	Penetración de agua acumulada, mm
min	s	Especímenes						
		1	2	3	4			
0	0	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00	0.00
5	300	20.05	20.27	20.00	20.30	20.16	2.85	2.85
10	600	19.15	19.50	19.25	19.49	19.35	0.81	3.65
15	900	18.50	18.89	18.69	19.00	18.77	0.58	4.23
20	1200	18.00	18.41	18.25	18.58	18.31	0.46	4.69
25	1500	17.57	18.01	17.89	18.20	17.92	0.39	5.08
30	1800	17.11	17.64	17.54	17.88	17.54	0.38	5.46
Flujo de agua, mm/s						3.55E-05		

Con la expresión:

$$q = \frac{0.26(q_1 - q_2)}{t} \text{ (mm/s)}$$

En donde:

$$q_1 = 18.77 \text{ mm}$$

$$q_2 = 17.88$$

$$t = 900 \text{ s}$$

Sustituyendo en la expresión, se obtiene el flujo de agua que pasa superficialmente en la muestra del concreto.

$$q_{M1} = 3.35 \times 10^{-5} \text{ (mm/s)}$$

## ANEXO 13. RESULTADOS INDIVIDUALES DE LAS PRUEBAS DE TENACIDAD ASTM C 1609

Resultados pertenecientes a los Concretos Reforzados con Fibras de Acero

Mezcla Espécimen	Carga, N		Resistencia, MPa		Flecha, mm		Carga residual, N		Resistencia residual, MPa		Tenacidad, JOULES
	Primer pico	Máxima	Primer pico	Máxima	Primer pico	Carga máxima	$P_{L/600}$	$P_{L/150}$	$f_{L/600}$	$f_{L/150}$	$T_{L/150}$
	$P_1$	$P_p$	$f_1$	$f_p$	$\delta_1$	$\delta_p$					
M1-V1	32622.75	38111.15	5.64	6.59	0.243	2.016	31568.41	33278.85	5.46	5.75	99.23
M1-V2	30236.75	34730.52	5.19	5.96	0.363	1.570	27770.18	29232.00	4.77	5.02	87.72
M1-V3											
<b>Promedio</b>	<b>31429.75</b>	<b>36420.84</b>	<b>5.42</b>	<b>6.28</b>	<b>0.30</b>	<b>1.79</b>	<b>29669.30</b>	<b>31255.43</b>	<b>5.11</b>	<b>5.39</b>	<b>93.47</b>
M2-V1	49909.45	48339.06	8.60	8.33	0.944	2.006	43201.53	43258.58	7.44	7.45	119.96
M2-V2	43845.53	53430.37	7.55	9.20	1.009	1.878	42001.85	45021.82	7.24	7.76	124.57
M2-V3											
<b>Promedio</b>	<b>46877.49</b>	<b>50884.71</b>	<b>8.08</b>	<b>8.77</b>	<b>0.98</b>	<b>1.94</b>	<b>42601.69</b>	<b>44140.20</b>	<b>7.34</b>	<b>7.60</b>	<b>122.27</b>
M3-V1											
M3-V2	42681.88	52676.75	7.53	9.29	0.919	1.803	38696.19	40845.31	6.82	7.20	117.30
M3-V3	35733.90	55174.39	6.18	9.54	0.5616	2.5873	36269.14	54932.53	6.27	9.49	129.27
<b>Promedio</b>	<b>39207.89</b>	<b>53925.57</b>	<b>6.85</b>	<b>9.41</b>	<b>0.74</b>	<b>2.20</b>	<b>37482.67</b>	<b>47888.92</b>	<b>6.55</b>	<b>8.35</b>	<b>123.28</b>

### Resultados pertenecientes a los Concretos Reforzados con Fibras de Polipropileno

Mezcla Espécimen	Carga, N	Resistencia, MPa	Flecha, mm	Carga residual, N		Resistencia residual, MPa		Tenacidad, JOULES
	Primer pico Máxima	Primer pico Máxima	Primer pico Carga máxima					
	$P_1=P_p$	$f_1=f_p$	$\delta_1=\delta_p$	$P_{L/600}$	$P_{L/150}$	$f_{L/600}$	$f_{L/150}$	$T_{L/150}$
M5-V1	37656.30	4.99	1.110	20275.58	4416.88	2.69	0.58	38.29
M5-V2	32585.33	4.33	0.402	2060.97	7569.66	0.27	1.01	30.63
M5-V3	32972.57	4.42	0.377	1908.42	7681.19	0.26	1.03	27.98
<b>Promedio</b>	<b>34404.73</b>	<b>4.58</b>	<b>0.63</b>	<b>8081.66</b>	<b>6555.91</b>	<b>1.07</b>	<b>0.87</b>	<b>32.30</b>
M6-V1	26867.26	3.53	0.365	16208.14	16194.42	2.13	2.13	50.93
M6-V2	28807.61	3.89	0.362	17702.93	18995.17	2.39	2.57	56.51
M6-V3	22949.09	3.00	0.314	17512.00	17482.82	2.29	2.29	56.12
<b>Promedio</b>	<b>26207.99</b>	<b>3.48</b>	<b>0.35</b>	<b>17141.02</b>	<b>17557.47</b>	<b>2.27</b>	<b>2.33</b>	<b>54.52</b>
M7-V1	25248.83	3.40	0.339	20703.21	22964.18	2.78	3.09	67.05
M7-V2	27293.33	3.66	0.347	24147.32	19827.75	3.24	2.66	67.35
<b>Promedio</b>	<b>27293.33</b>	<b>3.66</b>	<b>0.35</b>	<b>24147.32</b>	<b>19827.75</b>	<b>3.24</b>	<b>2.66</b>	<b>67.35</b>
M8-V1	36332.32	4.84	0.451	25006.00	25735.27	3.33	3.43	76.70
M8-V2	37639.91	4.97	0.432	31464.89	28705.10	4.16	3.79	86.81
<b>Promedio</b>	<b>36986.11</b>	<b>4.91</b>	<b>0.44</b>	<b>28235.45</b>	<b>27220.19</b>	<b>3.75</b>	<b>3.61</b>	<b>81.75</b>