

"Fibras Sintéticas para el Concreto"

TÉSIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRA EN INGENIERÍA EN
CONSTRUCCIÓN**

PRESENTA:

Ing. Maribel Miceli Maza

DIRECTOR DE TESIS:

M.I. FREDY HUMBERTO CABALLERO RODRÍGUEZ

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS; SEPTIEMBRE DE 2014.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE INGENIERÍA



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
13 Agosto de 2013.
Oficio F.I.01/661/2013.

ING. MARIBEL MICELI MAZA.
ESTUDIANTE DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA
EN CONSTRUCCIÓN
PRESENTE.

Por este medio comunico a Usted, que se le autoriza la impresión de su trabajo de tesis denominado: **"FIBRAS SINTÉTICAS PARA EL CONCRETO"**, para que pueda continuar con los trámites de titulación para la obtención del Grado de *Maestría en Ingeniería en Construcción*.

Sin otro particular por el momento, aprovecho el medio para enviarle un cordial saludo

ATENTAMENTE
"POR LA CONCIENCIA DE LA NECESIDAD DE SERVIR"

DR. FRANCISCO ALBERTO ALONSO FARFÁN
DIRECTOR



DIRECCIÓN DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

C. c.p. Dra. Daisy Escobar Castillejos. Coordinador de Investigación y Posgrado.-Facultad
C. c.p. Archivo/minutario
FAAF/masn*



Boulevard Belisario Domínguez, Km.1081, Sin Número.
Terán Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, C.P. 29050.
Tel/Fax: 01 (961) 61 5 03 22, 61 5 05 27
www.unach.mx www.ingenieria.unach.mx



Dedicatoria y Agradecimientos

Dedico este trabajo con mucho amor a mis hijas y a mi nieta:

- **Fanny del Carmen y Paola Maribel**, ambas la razón de mi existencia y el mejor regalo que Dios me ha dado; y a Pao agradezco todo el apoyo en la investigación y elaboración de éste trabajo.
- **Ana Isabel**, mi querida nieta, gracias por toda la luz y ternura con que llenas de nuevo mi vida, pero sobretodo, gracias por ese cariño tan grande que me profesas y que sabes hermosa **Isa**, que es correspondido con creces.

Extiendo mi dedicatoria con gran cariño a los demás miembros de mi querida familia: **Georgina** mi madre (QEPD), **José** mi padre (QEPD), **Luis Eduardo**, **Manolo**, **Rogger**, **Gustavo**, **Don Eduardo** y **Doña Fanny**; así también para **tío Beli** (QEPD), **tía Fulvia**, **tío Pablito** y **tía Sary**; a mis primos **Maru**, **Pablo**, **Ricardo** y **Lalito**, a mis maestros, amigos, amigas y compañeros de trabajo.

Maribel Miceli.

Índice de Contenido

Índice de Contenido	1
Capítulo 1. Introducción	5
Capítulo 2. El Concreto	7
2.1 ¿Qué es el concreto?	7
2.2 Tipos de concreto	11
2.2.1 Concreto Convencional	11
2.2.2 Concreto Convencional de Baja Permeabilidad	12
2.2.3 Concreto de Alta Resistencia	12
2.2.4 Concreto y Mortero Celular	13
2.2.5 Concreto Lanzado	13
2.2.6 Concreto para Cimentaciones Profundas	14
2.2.7 Concreto Reforzado con Fibras	14
2.2.8 Concreto Reforzado	15
2.2.8.1 Ventajas	15
2.2.8.2. Desventajas	16
2.3 Dosificaciones para el Concreto	16
2.4 Propiedades del Concreto	18
Capítulo 3. Fibras en el Concreto	20
3.1 Uso de Fibras en el Concreto	20
3.2 Tipos de Fibras	21
3.2.1 Vidrio	21
3.2.2 Acero	24
3.2.3 Fibras Sintéticas	26
3.2.3.1 ¿Qué son las Fibras Sintéticas?	26
3.2.3.2 Beneficios de las Fibras Sintéticas	29
3.2.4 Fibras Naturales	30
3.2.5 Fibras Naturales no Procesadas	32
3.2.6 Fibras de Madera (Fibras Naturales Procesadas)	32

Capítulo 4. Micro-fibra de Polipropileno para el Concreto	33
4.1 Descripción	33
4.2 Uso	33
4.3 Beneficios	33
4.4 Aplicación	34
4.5 Colocación, Compactación y Curado	35
4.6 Concreto a Edad Temprana	35
4.7 Concreto en Estado Endurecido	39
Capítulo 5. Macro-Fibra Sintética Estructural	47
5.1 Descripción	47
5.2 Tipos de Macro-Fibras Sintéticas	47
5.2.1. BARCHIP EPC	47
5.2.1.1 Uso	48
5.2.1.2 Beneficios	49
5.2.1.3 Dosificaciones	50
5.2.1.4 Mezclado	50
5.2.1.5 Bombeo	51
5.2.1.6 Manejo	51
5.2.1.7 Ensayos	51
5.2.1.8 Conclusión	52
5.2.2 MPH FIBER PLUS	53
5.2.2.1 Uso	54
5.2.2.2 Beneficios	55
5.2.2.3 Aplicación	55
5.2.2.4 Dosificaciones	55
5.2.2.5 Ensayo	56
5.2.2.6 Conclusión	57
Capítulo 6. Criterios de Aceptación para el Concreto con Fibras Sintéticas	58
6.1 Características y Normatividad	58
6.2 Pruebas de Laboratorio	60

6.2.1	Prueba de Resistencia a la Flexión del Concreto	60
6.2.1.1.	Resistencia a la Flexión	60
6.2.1.2.	Equipo	62
6.2.1.2.1.	Máquina de Ensayo	62
6.2.1.2.2.	Aparato de Aplicación de Carga	62
6.2.1.3.	Muestreo	64
6.2.1.4.	Preparacion del Espécimen	64
6.2.1.5.	Procedimiento	65
6.2.1.6.	Reporte	69
6.2.1.7.	Observaciones	69
6.2.2	Prueba de Resistencia a la Compresión del Concreto	69
6.2.2.1.	Resistencia a la Compresión	70
6.2.2.2.	Equipo	70
6.2.2.2.1.	Máquina de ensayo.	70
6.2.2.3.	Preparación y Acondicionamiento de las Muestras	72
6.2.2.3.1.	Dimensiones	72
6.2.2.3.2.	Cabeceo	73
6.2.2.4.	Condiciones Ambientales	74
6.2.2.5.	Condiciones Especiales de Humedad	74
6.2.2.6.	Procedimiento	75
6.2.2.7.	Cálculos	76
6.2.2.8.	Tipos de Fallas	77
6.2.2.9.	Reporte	78
6.2.3	Prueba de Durabilidad a la Congelación y Descongelación	79
6.2.3.1	Durabilidad a la Congelación y Descongelación	79
6.2.3.2	Diseño de Probetas	82
6.2.3.3	Procedimiento	83
6.2.3.4	Cálculos	85
6.2.3.4.1	Módulo Dinámico de Elasticidad	85
6.2.3.4.2	Módulo Dinámico de Elasticidad Relativo	86
6.2.3.4.3	Factor de Durabilidad	86
6.2.3.4.4	Cambio de Longitud	87
6.2.3.4.5	Pérdida de Peso	87
6.2.3.5	Reporte	88

6.3	Resultados del Comportamiento de las Fibras en Diferentes Pruebas	88
6.3.1	Reforzamiento	88
6.3.1.1	Refuerzo para Contracción Plástica	90
6.3.1.2	Refuerzo para Contracción de Secado y Control de Fisuras	90
6.3.1.3	Capacidad de Carga del Refuerzo en ELS y ELU	91
6.3.1.4	Resistencia contra Ataques Químicos o Efecto de la Corrosión	93
Capítulo 7.	Conclusiones Generales	94
Capítulo 8.	Glosario	97
Capítulo 9.	Referencias Bibliográficas	104

Capítulo 1. Introducción

En México, de acuerdo al Programa Nacional de Infraestructura 2007-2012 nos encontramos en el lugar 64 de 125 países y por mencionar algunos: Alemania ocupa en el lugar número 1, Japón el número 7, Estados Unidos el número 12, Chile el número 35, Sudáfrica el número 49, El Salvador el número 54, Uruguay el número 58, India el número 62 y por debajo de México están Brasil en el lugar número 71 y Argentina en el número 72. Por lo que los profesionales de la ingeniería civil en nuestro país, nos dedicamos entre otras actividades, principalmente a la construcción de infraestructura; como son: carreteras, telecomunicaciones, electricidad, aeropuertos, puertos, ferrocarriles, espacios educativos, recreativos, edificios públicos, servicios básicos de agua potable, drenaje, calles de concreto, entre otros; y en general la construcción de estas obras requiere básicamente de concreto hidráulico simple o reforzado, utilizando materiales, tales como el cemento, agregados, agua, aditivos y acero. La mezcla de cemento, agregados y agua, forman el concreto de acuerdo a las dosificaciones para diferentes tipos de resistencias: éstas pueden ser de 100 kg/cm², 150 kg/cm², 200 kg/cm², 250 kg/cm², 300 kg/cm² y concretos especiales de alta resistencia.

En obras realizadas con concreto, a lo largo del tiempo, nos encontramos con diversos resultados que no son satisfactorios, entre ellos, el agrietamiento y el descascaramiento del recubrimiento, éstos asociados a la corrosión del acero de refuerzo, a movimientos sísmicos, a la modificación del uso del inmueble u otros eventos; han generado graves problemas a nivel mundial.

Mencionaremos uno de los principales factores motivo de agrietamientos y/o descascaramiento del recubrimiento de estructuras de concreto; el acero de refuerzo, éste está protegido de la corrosión por una capa pasiva de productos de hidratación del cemento con un ambiente altamente alcalino, sin embargo; debido a diversas causas que pueden ocurrir a través del tiempo, porosidad del concreto y modificación de propiedades del agua relacionadas con concentraciones de iones-cloruro, el acero puede llegar a corroerse y posteriormente pueden presentarse tres etapas de agrietamiento (Andrade, 2010):

- 1) Periodo de iniciación del agrietamiento, durante el cual las grietas se desarrollan hasta alcanzar la superficie del concreto.
- 2) Periodo de propagación del agrietamiento, durante el cual crece el ancho de la grieta, pudiendo producirse el desprendimiento del recubrimiento del concreto.
- 3) Cuando la propagación progresa con otras grietas, da lugar al desprendimiento de trozos enteros del recubrimiento.

En este caso, se propone el uso de fibras sintéticas como aditivo para solucionar y prevenir los problemas que se presentan con los diferentes tipos de concreto. En esta tesis, el objetivo es conocer los tipos de concretos, sus ventajas y desventajas; así también, conocer los procedimientos para utilizar los diferentes tipos de fibras sintéticas existentes en el mercado y su aplicación de acuerdo a normas y reglamentos.

Se espera que los resultados obtenidos en esta tesis arrojen no solamente conclusiones de manera satisfactoria, sino también, la posibilidad de utilizar los materiales en la industria de la construcción, para solucionar problemas de agrietamiento y descascaramiento de elementos de concreto.

Capítulo 2 El Concreto

2.1 ¿Qué es el concreto?

La mezcla de cemento-agua forma una pasta que rodea a los agregados pétreos (naturales, procesados o artificiales) creando un material heterogéneo, que con el proceso de mezclado se obtiene una mezcla más homogénea, el cual se denomina concreto, además; a este concreto se le pueden agregar aditivos. Dicha mezcla se dosifica en unidades de masa y volumen en las obras y, en unidades de masa en plantas de concreto premezclado; así mismo, los aditivos se dosifican en volumen (líquido) o en masa (polvo) según su presentación. Consulte García (2006) y Kosmatka (2004).

Se le llaman agregados pétreos a aquellos productos granulares minerales en estado natural, procesados o artificiales que se mezclan con un cementante o aglutinante hidráulico con la finalidad de crear concretos o morteros.

Los agregados pétreos se dividen en dos grupos:

- 1) Los agregados finos pueden ser arenas natural o artificial con partículas de hasta 9.5 mm (3/8 pulgadas). Dichos agregados presentan principalmente las siguientes características:
 - a. La composición granulométrica de acuerdo a la tabla 1.
 - b. El módulo de finura no debe ser menor de 2.30 y no mayor de 3.10.
 - El módulo de finura se obtiene sumando los porcentajes retenidos acumulados en las 6 cribas (No. 4, 8, 16, 30, 50 y 100) y

dividiendo entre 100 (ver la tabla 2). El módulo de finura es adimensional.

- Así también, el retenido parcial en cualquier tamiz no debe ser mayor del 45%.

De acuerdo a la norma mexicana NMX-C-111, en la tabla 3 se pueden verificar las tolerancias a las sustancias nocivas en el agregado fino.

Criba de Abertura Cuadrada	Porcentaje Retenido Acumulado
G 9,5 (3/8") (9.530 mm)	0
G 4,75 (4") (4.75 mm)	0 a 5
M 2,36 (8") (2.360 mm)	0 a 20
M 1,18 (16") (1.180 mm)	15 a 50
M 0,600 (30") (0.590 mm)	40 a 75
M 0,300 (50") (0.300 mm)	70 a 90
M 0,150 (100") (0.150 mm)	90 a 98
Charola	100

Tabla 1. Requisitos Granulométricos del Agregado Fino (NMX-C-111)

Malla No.	Porcentajes Individuales Retenidos	Porcentajes Acumulados Retenidos
4	1	1
8	18	19
16	20	39
30	19	58
50	18	76
100	16	92
Charola	8	0
Totales	100	285

Tabla 2. Módulo de Finura del Agregado Fino (ASTM E11)

Concepto	Máximo % en Masa de la Muestra Total
Grumos de arcilla y partículas deleznales.	3.0
Materiales finos que pasan la criba F 0.075 (200). En concreto sujeto a abrasión. [En otro concreto]	3.0 [5.0]
Carbón y lignito. En concreto aparente. [En otro Concreto]	0.5 [1.0]

Tabla 3. Límites Máximos de Sustancias Nocivas en el Agregado Fino (NMX-C-111)

- 2) Los agregados gruesos, conocidos comúnmente como gravas, son las partículas retenidas en la malla 1.18 mm (tamiz No. 16) y pueden llegar hasta 150 mm (6 pulgadas). Generalmente, el tamaño máximo del agregado grueso empleado en la industria de la construcción es de 19 mm o 25 mm (3/4 pulgadas o 1 pulgada).

Debido a que los agregados constituyen la mayor parte del volumen total del concreto, es importante la selección de ellos, es decir; la composición de las partículas de los agregados deben tener una resistencia mecánica adecuada y no deben contener materiales que puedan causar deterioro del concreto.

Para obtener una buena calidad del concreto, éste dependerá de la calidad de la pasta y del agregado y, de la unión entre ellos. Para cualquier grupo de materiales y condiciones de curado, la calidad del concreto endurecido deberá tener una

óptima relación de agua/cemento. Sin embargo, a mayor cantidad de agua, éstas diluyen la pasta de cemento y disminuyen su resistencia.

Las ventajas de la disminución de la cantidad de agua son las siguientes:

- Aumento de la resistencia a la compresión y resistencia a flexión.
- Disminución de la permeabilidad, por lo que entonces tenemos disminución de la absorción y aumento de la hermeticidad (estanquidad).
- Aumento de la resistencia a la intemperie.
- Mejor unión entre concreto y armadura.
- Reducción de la contracción y de la fisuración.
- Menores cambios de volumen por el humedecimiento y el secado.

A menor cantidad de agua, mejor es la calidad del concreto, sólo si la mezcla se puede consolidar de manera adecuada; cuando se usan menores cantidades de agua en la mezcla, se obtiene una mezcla rígida, pero con vibración adecuada, la mezcla rígida es capaz de ser fácilmente colocada. Por lo tanto, la consolidación por vibración permite una mejor calidad del concreto.

El concreto fresco (estado plástico) y el concreto endurecido, pueden cambiar sus propiedades con la adición de los aditivos químicos durante la dosificación. Los aditivos se usan para:

- El ajuste del tiempo de fraguado o endurecimiento.
- La reducción de la demanda de agua.
- El aumento de la trabajabilidad (manejabilidad, docilidad)
- La inclusión intencional del aire y
- El ajuste de otras propiedades del concreto fresco o endurecido.

El concreto llega al estado endurecido después del proceso de dosificación, mezclado, colocación (colado), consolidación, acabado y curado adecuado, dicho concreto se transforma en un material no combustible, durable, resistente a la abrasión e impermeable, con lo cual requiere poca o ninguna conservación.

El concreto es un excelente material de construcción debido a que se puede moldear en una gran variedad de formas, colores y texturas para ser utilizado en cualquier tipo de construcción:

- Pavimentos
- Edificación
- Puentes
- Plantas nucleares
- Presas, entre otros.

2.2 Tipos de concreto

Existen diferentes tipos de concretos a utilizar en la industria de la construcción, los cuales se clasifican en Concreto Convencional, Concreto Convencional de Baja Permeabilidad, Concreto de Alta Resistencia, Concreto y Mortero Celular y Concreto Lanzado, entre otros. (CEMEX, 2012).

2.2.1 Concreto Convencional

El Concreto Convencional posee la ventaja de endurecer con el tiempo, por lo que adquiere propiedades que lo hacen común en la industria de la construcción. En

estado fresco posee suficiente tiempo para su manejabilidad durante la colocación y en estado endurecido, presenta un excelente desempeño.

Para obtener este tipo de concreto, se hace la mezcla en obra o en una planta, que puede estar ubicada en un sitio fijo, pero hay plantas pequeñas que pueden instalarse en el sitio de la obra; si es fija, posteriormente se transporta a la obra en ollas giratorias (mezcladoras) para conservar la homogeneidad de la pasta y usando una bomba se facilita su colocación y se lleva a cabo el vibrado. Este concreto es comunmente empleado en cimentaciones, columnas, trabes, castillos, losas, prefabricados y otros.

2.2.2 Concreto Convencional de Baja Permeabilidad

Son especialmente diseñados y controlados para alcanzar su resistencia a 28 días donde se requieran condiciones de baja permeabilidad. La ventaja de este tipo de concreto es que la baja permeabilidad y el aire incluido reduce la exudación del concreto. Se usa comunmente para cámaras de refrigeración, estructuras hidráulicas menores y piscinas, entre otros.

2.2.3 Concretos de Alta Resistencia

Son concretos que alcanzan la resistencia a la compresión mayor o igual a 400 kg/cm² a una edad de 28 días. Posee la ventaja de obtener mayor resistencia a la erosión y es comunmente usado en sistemas de transportes y superestructuras de puentes de amplia luz, así también; donde se requiera mejorar la durabilidad de los elementos.

2.2.4 Concreto y Mortero Celular

Es un producto ligero y aislante, termoacústico, el cual permite optimizar el diseño de las secciones al disminuir las cargas muertas en las estructuras, además su alta trabajabilidad beneficia su colocación, sin requerir de vibrado durante la colocación del concreto.

La ventaja de este tipo de concreto es que resulta menos permeable que el concreto convencional, debido a que están mezclados con perlas expandidas usadas como agregados porosos. Generalmente se usa para nivelación de pisos y losas donde se requiera disminuir la carga muerta de la estructura, así como en elementos prefabricados (paneles de concreto).

2.2.5 Concreto Lanzado

Es un concreto o mortero transportado a través de una tubería o manguera, neumáticamente proyectado a alta velocidad sobre una superficie, a la cual se adhiere con una excelente compactación. La ventaja de este tipo de concreto es que debido a su cohesividad, facilita la colocación del concreto lanzado obteniendo el acabado deseado; tiene reducción de agrietamiento, disminución de desperdicio e índice de rebote, menor costo de obra e incremento en los ciclos productivos, debido a la disminución del trabajo de cimbrado y es de rápida aplicación.

Generalmente se usa en estructuras con secciones curvas o alabeadas, revestimiento de túneles, recubrimiento de mamposterías para protección o

acabados, refuerzos o reparación de concretos, estabilización de taludes, muros de contención, en canales de agua y cunetas.

2.2.6 Concreto para Cimentaciones Profundas

Debido a que éste es un concreto fluido y altamente cohesivo, disminuye la segregación, es comunmente empleado para cimentaciones profundas. Generalmente se usa este tipo de concreto cuando la sección del pilote y la cantidad de refuerzo requiere de alta fluidez; y cuando las cargas transmitidas por el edificio no se pueden distribuir adecuadamente en una cimentación superficial, excediendo la capacidad portante del suelo.

2.2.7 Concreto Reforzado con Fibras

El concreto reforzado con fibras es semejante al concreto convencional, con la diferencia que en el concreto reforzado con fibras, se necesita especial atención en los procedimientos de mezclado, transporte, colado y acabado. En este tipo de concreto, se debe adicionar la cantidad exacta de fibras en la aplicación del mezclado del concreto, de lo contrario, disminuye la trabajabilidad. (Muciño, 2003).

El concreto reforzado con fibras, requiere de mayor contenido de cemento y de agregado fino, y un menor tamaño máximo de agregado, para obtener una buena calidad y homogeneidad del concreto.

Algunos ejemplos del uso del concreto reforzado con fibras son:

- Estructuras hidráulicas: Para disminuir el espesor de la cavitación.

- Pavimentos rígidos: Para disminuir el espesor del pavimento.
- Pisos industriales: Para aumentar la resistencia al impacto y disminuir el choque térmico.
- Concreto refractario: En conjunción con cemento de aluminio para obras sujetas a altas temperaturas.
- Losas de puentes: Como superficie de rodamiento para proteger la losa estructural.
- Concreto lanzado: Para estabilizar la roca, el talud o el suelo.
- Cascarones: Para aumentar la estabilidad mecánicas de los domos.
- Estructuras resistentes a explosiones: Como reserva del acero de refuerzo.

2.2.8 Concreto Reforzado

El concreto reforzado es la combinación del concreto con el acero de refuerzo para mejorar una o varias propiedades del concreto. Durante mucho tiempo, el concreto reforzado ha sido utilizado para diversas construcciones como edificios, puentes, en fin, varios tipos de estructuras; a todo lo largo y ancho del mundo, con el fin de economizar en los materiales de construcción y para dar seguridad contra sismos, huracanes, tornados, e inundaciones. (Fanella, 2010).

2.2.8.1 Ventajas

- Es resistente a los sismos, huracanes, tornados e inundaciones.
- Alta resistencia a la compresión
- Adaptabilidad para conseguir diversas formas arquitectónicas.
- Buena ductilidad.
- Alto grado de durabilidad.

- Resistencia al Fuego.
- Requiere poco mantenimiento.

2.2.8.2 Desventajas

- Baja resistencia a la tracción, aproximadamente la décima parte de su resistencia a la compresión. Aunque el uso de barras de acero, tiene poca probabilidad de formar grietas en el concreto, es inevitable en algunos casos, la formación de grietas.
- Requiere de cimbras para la colocación del concreto y el costo de la cimbra puede alcanzar entre un tercio y dos tercios del costo total de la obra, dependiendo de la forma arquitectónica y el costo de los materiales.

2.3 Dosificaciones para el Concreto

La dosificación es el proceso de medida, por masa o por volumen, de los ingredientes del concreto y su introducción en la mezcladora o revolvedora. Para obtener un concreto de buena calidad, los ingredientes se deben medir con precisión para cada revoltura (mezcla). (Kosmatka, 2004).

La mayoría de las dosificaciones son por masa. El agua y los aditivos líquidos se pueden medir con precisión tanto por volumen como por masa.

La mezcla homogénea de cemento-agua-agregados forman concretos con diferentes tipos de resistencia ($f'c$), tal como vemos en la tabla 4 y tabla 5:

TABLA DE DOSIFICACIÓN									
f'c / MEZCLA	CEMENTO CPC 30R	AGUA	ARENA	GRAVA 3/4"	f'c / MEZCLA	CEMENTO CPC 40	AGUA	ARENA	GRAVA 3/4"
100 kg/cm ² (MUROS Y PISOS)	50 kg	2 1/2 botes	6 1/2 botes	7 1/2 botes	100 kg/cm ² (MUROS Y PISOS)	50 kg	2 3/4 botes	7 botes	8 botes
150 kg/cm ² (TRABES Y DALAS)	50 kg	2 botes	5 1/2 botes	6 1/2 botes	150 kg/cm ² (TRABES Y DALAS)	50 kg	2 1/2 botes	6 botes	7 botes
200 kg/cm ² (LOSAS Y ZAPATAS)	50 kg	1 3/4 botes	4 1/2 botes	5 1/2 botes	200 kg/cm ² (LOSAS Y ZAPATAS)	50 kg	2 botes	5 botes	6 botes
250 kg/cm ² (COLUMNAS Y TECHOS)	50 kg	1 1/2 botes	3 1/2 botes	5 botes	250 kg/cm ² (COLUMNAS Y TECHOS)	50 kg	1 3/4 botes	4 botes	5 botes
300 kg/cm ² (ALTA RESISTENCIA)	50 kg	1 1/4 botes	2 1/2 botes	4 botes	300 kg/cm ² (ALTA RESISTENCIA)	50 kg	1 1/2 botes	3 botes	4 botes

1 bote equivale a 19 lts

Tabla 4. Tabla de Dosificación según Cemento Moctezuma (2012)

TABLA DE DOSIFICACIÓN									
f'c / MEZCLA	CEMENTO	AGUA	ARENA	GRAVA 3/4"	f'c / MEZCLA	CEMENTO	AGUA	ARENA	GRAVA 1 1/2"
100 kg/cm ² (MUROS Y PISOS)	50 kg	3 botes	7 1/2 botes	8 botes	100 kg/cm ² (MUROS Y PISOS)	50 kg	3 botes	7 botes	9 1/2 botes
150 kg/cm ² (TRABES Y DALAS)	50 kg	2 1/2 botes	5 1/2 botes	6 1/2 botes	150 kg/cm ² (TRABES Y DALAS)	50 kg	2 1/2 botes	5 1/2 botes	8 1/2 botes
200 kg/cm ² (LOSAS Y ZAPATAS)	50 kg	2 botes	4 botes	6 botes	200 kg/cm ² (LOSAS Y ZAPATAS)	50 kg	2 botes	4 botes	7 1/2 botes
250 kg/cm ² (COLUMNAS Y TECHOS)	50 kg	1 3/4 botes	3 1/2 botes	5 botes	250 kg/cm ² (COLUMNAS Y TECHOS)	50 kg	1 3/4 botes	3 1/2 botes	6 1/2 botes
300 kg/cm ² (ALTA RESISTENCIA)	50 kg	1 1/4 botes	2 1/2 botes	4 1/2 botes	300 kg/cm ² (ALTA RESISTENCIA)	50 kg	1 1/4 botes	2 1/2 botes	5 1/2 botes

1 bote equivale a 19 lts

Tabla 5. Tabla de Dosificación según García (2006)

2.4 Propiedades del concreto

El concreto tiene las siguientes propiedades:

- 1) **Trabajabilidad:** Es la facilidad con que pueden adherir los ingredientes de la mezcla así como la capacidad de ésta para manejarse, transportarse y colocarse con poca pérdida de homogeneidad. Se mide por la consistencia o fluidez con la obtención del revenimiento (NMX-C-156-ONNCCE). Una mezcla bien proporcionada y trabajable perderá el revenimiento lentamente, en cambio una mezcla deficiente se desmoronará, despedazará y segregará. Los factores que influyen en la trabajabilidad son:
 - a. El método y la duración del transporte.
 - b. Cantidad y características de los materiales cementantes.
 - c. Consistencia del concreto (aislamiento en cono de Abrams o revenimiento).
 - d. Tamaño, forma, textura superficial y calidad de los agregados finos y gruesos.
 - e. Aire incluido.
 - f. Cantidad y calidad del agua.
 - g. Temperatura del concreto y del aire, y
 - h. Aditivos.

- 2) **Consistencia:** Se refiere a la característica de la mezcla respecto a su fluidez tanto en su estado seco como fluido.

- 3) **Durabilidad:** Es la capacidad de resistencia a la intemperie, a la congelación y descongelación, a la acción de agentes químicos y al desgaste.
- 4) **Impermeabilidad:** Se logra reduciendo la cantidad de agua en la mezcla. El exceso de agua deja vacíos y cavidades después de la evaporación y si estos están interconectados, el agua puede penetrar o atravesar el concreto. La inclusión de aire y el curado óptimo y eficiente aumentan la impermeabilidad.
- 5) **Cambio de volumen:** La expansión debida a las reacciones químicas de los ingredientes del concreto puede ocasionar el alabeo y la contracción durante el secado así como la aparición de las grietas.
- 6) **Resistencia:** Se determina mediante una muestra en forma de cilindro sometida a esfuerzos a compresión. Como el concreto aumenta su resistencia conforme pasa el tiempo, la resistencia a la compresión a los 28 días es la medida más común de esta propiedad.

Capítulo 3

Fibras en el Concreto

3.1 Uso de las Fibras en el Concreto

Las fibras han sido usadas como material de construcción durante muchos años. Las fibras se añaden al concreto durante el mezclado, y tienen factores importantes que controlan el desempeño del material compuesto, tales como:

- Propiedades físicas de las fibras y de la matriz.
- Resistencia de adherencia entre la fibra y la matriz.

Las características de las fibras para el concreto son las siguientes:

- Las fibras se distribuyen de manera aleatoria por toda la sección transversal, mientras que las barras de refuerzo o armadura se colocan sólo donde son necesarias.
- La mayoría de las fibras son relativamente cortas y poco espaciadas, si son comparadas con las barras continuas de refuerzo.
- Generalmente no es posible lograr la misma relación de área de refuerzo – área de concreto con el uso de fibras, si esto es comparado con la red de refuerzo que se obtiene con las barras.

Para obtener beneficios con el uso de fibras en el concreto endurecido, se debe:

- Tener un módulo de elasticidad alto.
- Tener el adecuado contenido de fibras por volumen. (Normalmente menos del 1% por volumen para el acero y aproximadamente 0.1% por volumen para el polipropileno).

- Tener una buena adherencia entre la fibra y el concreto.
- Tener suficiente longitud de las fibras.
- Tener una alta relación de las fibras con su aspecto, es decir, deben ser largas con relación a su diámetro.

3.2 Tipos de Fibras

3.2.1 Vidrio

Las fibras de vidrio son resistentes a los álcalis (metales alcalinos) y generalmente son usadas en la fabricación de productos de cemento reforzado con vidrio. Este tipo de fibras dispone de varias longitudes; las longitudes de 25 mm hasta 35 mm se usan en aplicaciones de rociado y las longitudes de hasta 25 mm generalmente se usan en aplicaciones de premezclado.

Estas fibras son muy resistentes a la tensión (2 – 4 GPa) y tienen un alto módulo elástico (70 – 80 GPa) pero su desventaja es que tienen características quebradizas en el esfuerzo – deformación (2.5 – 4-8% de alargamiento de rotura) y poca fluencia a temperatura ambiente.

En la siguiente tabla No. 6 se pueden observar los dos tipos de fibras que son usadas comunmente: la fibras de vidrio convencional de borosilicato (Fibras de vidrio – E) y fibras de vidrio resistentes a álcalis (Fibras de vidrio – RA).

Tipo de Fibra	Masa específica relativa	Diámetro, μm (0.001 pulg.)	Resistencia a tracción, MPa [kg/cm2] (ksi)	Módulo de elasticidad, MPa [kg/cm2] (ksi)	Deformación en la rotura, %
VIDRIO E	2.54	8-15 (0.3-0.6)	2000-4000 [20,000- 41,000] (290- 580)	72,000 [730,000] (10,400)	3.0-4.8
VIDRIO RA	2.70	12-20 (0.5- 0.8)	1500-3700 [15,000- 38,000] (220- 540)	80,000 [820,000] (11,600)	2.5-3.6

Tabla 6. Propiedades de los Tipos de Fibras de Vidrio. (Kosmatka, 2004)

Se observa que la mezcla de las fibras de vidrio E con la pasta de cemento se obtiene una reducción de la resistencia del concreto. En cambio, las fibras de vidrio RA, aumenta la durabilidad a largo plazo, sin embargo también se obtiene una pérdida de la resistencia a la tracción. La razón es la rigidización de los filamentos por la infiltración de partículas de hidróxido de calcio (producto de la hidratación del cemento) entre los haces de fibras.

De acuerdo a las investigaciones de Kosmatka, las desventajas son las siguientes:

- El ataque de las fibras de vidrio por álcalis reduce la resistencia a tensión de las fibras y como consecuencia, reduce la resistencia a la compresión.
- El proceso de hidratación del cemento promueve la penetración de partículas de hidróxido de calcio en los haces de fibras, aumentando la resistencia de adherencia entre fibra y matriz, y la rigidez, siendo

que ésta última obtiene una pérdida de la resistencia a la tensión por inhibir el arrancamiento de la fibra.

Para que el concreto tenga una mayor durabilidad, utilizando este tipo de fibras, se deben hacer modificaciones en revestimientos químicos, especialmente formulados para ayudar en el combate a la rigidización inducida por la hidratación, y en el uso de una lechada con humo de sílice dispersa para rellenar los vacíos entre las fibras, reduciendo la capacidad de infiltración del hidróxido de calcio.

Esta fibra es adecuada para aplicaciones en técnicas de rociado directo y procesos de premezclado, por lo que su uso es exclusivamente para concretos no estructurales.

Ejemplo del uso de fibra de vidrio, es la producción de paneles de fachadas, tal como se ve en la figura 1.



Figura 1. Los paneles de concreto reforzado con fibras de vidrio son ligeros y suficientemente fuertes para reducir los requisitos estructurales de este edificio. (Kosmatka, 2004)

3.2.2 Acero

De acuerdo con la norma ASTM A 820, se clasifican las fibras de acero en cuanto a su manufactura, en cuatro tipos:

- a) **TIPO I:** Las fibras de alambre conformadas en frío son las más comunmente encontradas en el mercado, fabricadas de alambre de acero conformado.
- b) **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.
- c) **TIPO III:** Las fibras extraídas de fundición, las cuales se fabrican con técnicas relativamente complicadas, donde una rueda en rotación se usa para levantar el 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 media luna.
- d) **TIPO IV:** Otras fibras.

Las fibras de acero, generalmente tienen diámetros equivalentes entre 0.15 a 2 mm y longitudes de 7 a 75 mm. Las relaciones de aspecto generalmente varían de 20 a 100. Algunas fibras son juntadas para formar manojos usando goma soluble al agua para facilitar su manejo y su mezclado.

Este tipo de fibras son muy resistente a la tensión (0.5 – 2 GPa), tienen alto módulo elástico (200 GPa), así también; poseen una característica dúctil y plástica en esfuerzo – tensión y una baja fluencia.

Algunas fibras son usadas en mezclas convencionales de concreto, concreto lanzado y concreto con fibras infiltradas de lechada. Normalmente, el contenido de

este tipo de fibras varía de 0.25 a 2% por volúmen. Si se excede más del 2% por volumen se obtiene como resultado una pobre trabajabilidad y distribución de la fibra, sin embargo; se pueden usar de manera eficiente, en donde el contenido de la pasta de la mezcla se incremente y el tamaño del agregado grueso no sea mayor a 10 mm.

El concreto reforzado con fibras de acero que contienen hasta 1.5% de fibras por volumen ha sido bombeado exitosamente usando tuberías de 125 a 150 mm de diámetro. Los contenidos de estas fibras de hasta 2% por volumen, se usan en aplicaciones de concreto lanzado, utilizando tanto el proceso húmedo como el seco. También se han obtenido contenidos de fibras de acero de hasta 25% por volumen en concreto con fibras infiltradas de lechada.

De acuerdo a la revista del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (IMCYC 2007), se ha observado que el módulo elástico en compresión y el módulo de rigidez en torsión no son diferentes antes del agrietamiento cuando se compara con el concreto simple, probado bajo condiciones similares. Así también, se ha observado un incremento de resistencia al impacto en el concreto reforzado y se ha incrementado hasta en un 70% la resistencia a la fatiga.

Este tipo de fibras son usadas comúnmente en pavimentos de aeropuertos y en las capas de revestimiento de las pistas; también se usan en los tableros de puentes, pisos industriales y pavimentos de autopistas.

3.2.3 Fibras sintéticas

3.2.3.1 ¿Qué son las Fibras Sintéticas?

Las fibras sintéticas son fabricadas a partir de materiales tales como acrílico, aramida, carbón, nylon, poliéster, polietileno y polipropileno (NRMCA). En general, las fibras sintéticas se caracterizan por tener elevada resistencia a la tensión y entre ellas, se definen dos categorías: las de alto y las de bajo módulo de elasticidad.

En la siguiente tabla No. 7 se resumen los parámetros de las propiedades físicas de algunas fibras sintéticas.

Tipo de fibra	Diámetro equivalente um	Densidad relativa	Resistencia a tensión MPa	Módulo de elasticidad GPa	Alargamiento último %	Temperatura de ignición °C	Temperatura de fusión, oxidación o descomposición, °C	Absorción del agua según ASTM D 570, % por masa
Acrílico	13-104	1.16-1.18	270-1000	14-19	75-50.0	-	220-235	1.0-2.5
Aramida I	12	1.44	2900	60	4.4	alta	480	4.3
Aramida II+	10	1.44	2350	115	2.5	alta	480	1.2
Carbón PAN HM *	8	1.6-1.7	2500-3000	380	0.5-0.7	alta	400	nula
Carbón, PAN HT §	9	1.6-1.7	3450-4000	230	1.0-1.5	alta	400	nula
Carbón, brea GP **	10-13	1.6-1.7	480-790	27-35	2.0-2.4	alta	400	3-7
Carbón, brea HP =	9-18	1.8-2.15	1500-3100	150-480	0.5-1.1	alta	500	nula
Nylon >	23	1.14	970	5	20	-	200-220	2.8-5.0
Poliéster	20	1.34-1.39	230-1100	17	12-150	600	260	0.4
Polietileno >	25-1000	0.92-0.96	75-590	5	3-80	-	130	nula
Polipropileno >	-	0.90-0.91	140-700	3.5-4.8	15	600	165	nula

*No todos los tipos de fibras se usan actualmente para producción comercial de FRC
+ Módulo alto
* A base de poliacrilonitrilo, módulo alto.
§ A base de poliacrilonitrilo, alta resistencia a tensión
** A base de brea isotrópica, para propósitos generales.
= A base de brea mesofase, alto desempeño
> Los datos se enlistan sólo para fibras comercialmente disponibles para FRC.

Tabla 7: Tipos y Propiedades de Fibras Sintéticas Seleccionadas (IMCYC 2007)

- **Acrílico:** La función principal de las fibras acrílicas es la de reducir los efectos del agrietamiento por contracción plástica en el concreto convencional (se han agregado a bajos volúmenes). Generalmente se usan en tabloncillos de cemento y en la producción de tejas, donde el volumen de fibras, de hasta 3% puede producir un compuesto con propiedades mecánicas similares a aquéllas de los compuestos de asbesto – cemento.
- **Arámida:** Las fibras de arámida son 2.5 veces más resistentes que las de vidrio y 5 veces más que las de acero, por unidad de masa. Además, las fibras de arámida tienen alta resistencia a tensión y alto módulo de tensión; excelente resistencia hasta 160°C, estabilidad dimensional hasta 200°C, resistencia a la fatiga estática y dinámica; y resistencia a la fluencia.
- **Carbón:** Su uso comercial ha sido limitado debido a su alto costo en comparación de las otras fibras. Las fibras de carbón se fabrican carbonizando materiales orgánicos adecuados en forma fibrosas, a altas temperaturas y posteriormente alineando los cristales de grafito resultantes por medio de estiramiento. Las ventajas de este tipo de fibra son:
 - a. Alta resistencia a la tensión,
 - b. Alto módulo de elasticidad y
 - c. Una característica quebradiza de bajo esfuerzo – deformación.
- **Nylon:** Las propiedades de las fibras de nylon son a partir de polímeros, la adición de aditivos, las condiciones de fabricación y las dimensiones de las fibras. Las ventajas de este tipo de fibras son:
 - a. Estabilidad en el calor,
 - b. Hidrófilos,
 - c. Relativamente inerte y resistente a una gran variedad de materiales.

- d. Resistente al impacto y tenacidad a flexión,
 - e. Sostiene e incrementa la capacidad para soportar cargas de concreto después de la primera grieta.
-
- **Poliéster:** Este tipo de fibras están disponibles en forma de monofilamentos y pertenecen al grupo del poliéster termoplástico, el cual se ha usado a bajos contenidos (0.1% por volumen) para controlar el agrietamiento por contracción plástica en el concreto.

 - **Polietileno:** El polietileno ha sido producido para el concreto en forma de monofilamentos con deformaciones superficiales parecidas a verrugas. El concreto reforzado con este tipo de fibras ha contenido de entre 2 y 4% por volumen y muestra un comportamiento de flexión lineal bajo cargas de flexión hasta la primera grieta, seguido por una transferencia de carga aparente a las fibras, logrando un incremento en la carga, hasta que las fibras se rompen.

 - **Polipropileno:** 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. Este tipo de fibras son hidrófobas y tienen desventajas como:
 - a. Poca capacidad de adherencia con la matriz del cemento,
 - b. Baja resistencia a la tensión
 - c. Alta combustibilidad y módulo de elasticidad relativamente bajo.
 - d. Las largas fibras, en el proceso del mezclado de agua – agregados – cemento – fibra, son difíciles de mezclar debido a su flexibilidad y

tienden a enrollarse alrededor de las orillas extremas de la mezcladora.

Según reportes de IMCYC (2007), el uso de las fibras de polipropileno han tenido éxito en contenidos de hasta 12% por volumen, con técnicas de fabricación de empaclado manual, sin embargo; se ha reportado que volúmenes de 0.1% de fibras de 50 mm en el concreto, han causado una pérdida de revenimiento de hasta 75 mm.

En conclusión, los reportes de IMCYC (2007) indican que las fibras de polipropileno reducen la contracción no restringida, plástica y por secado del concreto a contenidos de fibra de 0.1% a 0.3% por volumen.

3.2.3.2 Beneficios de las Fibras Sintéticas

Las fibras sintéticas benefician tanto al concreto en estado plástico como en estado endurecido. Algunos de los beneficios incluyen:

- Reducción de agrietamiento por asentamiento.
- Reducción de agrietamiento por contracción plástica.
- Disminución de la permeabilidad.
- Incremento de resistencia al impacto y a la abrasión.
- Aporte a la resistencia por fractura.
- Controla la aparición de las fisuras durante la vida útil de la estructura y brinda mayor resistencia a la fatiga.

El concreto adicionado con fibras sintéticas se emplea de manera frecuente en la construcción de pisos industriales de alto desempeño, pavimentos, cubiertas para puentes, concreto lanzado para estabilización de taludes, revestimiento de túneles, elementos estructurales prefabricados, y bóvedas, entre otros.

Las fibras sintéticas más comerciales usadas en losas y pisos de concreto son las siguientes: Polipropileno (micro-sintético) y estructurales (macro-sintética).

3.2.4 Fibras Naturales

Un ejemplo de las fibras naturales, son los ladrillos de barro reforzados con paja y morteros reforzados con crin de caballo, este tipo de fibras se usan como refuerzo.

Muchos materiales de refuerzo natural se pueden obtener con bajos niveles de costos y energía, usando la mano de obra y la pericia disponibles en la región. Este tipo de fibras comúnmente se usan en la producción de concretos con bajo contenido de fibras y en placas delgadas de concreto con alto contenido de fibras, ver tabla No. 8.

Tipo de Fibra	Masa específica relative	Diámetro, μm (0.001 pulg.)	Resistencia a tracción, MPa [kg/cm ²] (ksi)	Módulo de elasticidad, MPa [kg/cm ²] (ksi)	Deformación en la rotura, %
NATURAL					
Celulosa de madera	1.50	25-125 (1-5)	350-2000 [3600-20,000] (51-290)	10,000-40,000 [100,000-400,000] (1,500-5,800)	
Sisal			280-600 [2900-6100] (40-85)	13,000-25,000 [130,000-250,000] (1,900-3,800)	3.5
Coco	1.12-1.15	100-400 (4-16)	120-200 [1200-2000] (17-29)	19,000-25,000 [190,000-250,000] (2,800-3,800)	10-25
Bambú	1.50	50-400 (2-16)	350-500 [3600-5100] (51-73)	33,000-40,000 [340,000-400,000] (4,800-5,800)	
Yute	1.02-1.04	100-200 (4-8)	250-350 [2500-3600] (36-51)	25,000-32,000 [250,000-320,000] (3,800-4,600)	1.5-1.9
Pasto elefante		425 (17)	180 [1800] (26)	4,900 [50,000] (710)	3.6

Tabla 8. Propiedades de Tipos de Fibras Naturales. (Kosmatka, 2004)

3.2.5 Fibras Naturales no Procesadas

Ejemplo de las fibras naturales no procesadas son: fibras de coco, sisal, bambú, yute, madera y fibras vegetales. Muchas de estas fibras presentan algunos problemas de durabilidad, debido a los cambios de volumen (por las variaciones de la humedad que contienen), pueden afectar drásticamente la resistencia de adherencia entre la fibra y la matriz. (tabla 8)

3.2.6 Fibras de Madera (Fibras Naturales Procesadas)

Las fibras de celulosa, al compararlas con las demás fibras, contienen buenas propiedades mecánicas. Éstas se pueden producir con resistencia a la tensión de hasta 2000 Mpa, con especies seleccionadas de madera y mediante el proceso de reducción a pulpa (se le llama reducción a pulpa al proceso por el cual la madera se reduce a una masa de fibras). La resistencia a la tensión de las fibras de 500 Mpa se produce usando un proceso químico de reducción a pulpa con maderas más comunes y de menor costo económico.

Capítulo 4. Micro-fibra de Polipropileno para el Concreto

4.1 Descripción

Es un refuerzo secundario para el concreto a base de multifilamentos de fibras de polipropileno 100% virgen, tratada con un dispersante que evita agrietamientos por contracción y por temperatura del concreto (Pasaimper, 2006).

4.2 Uso

Se usa como refuerzo secundario en sustitución de la malla electro-soldada en pisos y pavimentos de concreto, donde se requiera una losa de compresión, en sistemas constructivos semi-prefabricados como vigueta, bovedilla y losacero, entre otros.

4.3 Beneficios

- Es un refuerzo tridimensional que controla la formación de fisuras por contracción plástica, por asentamientos y por temperatura.
- En el concreto plástico se reduce la segregación y el agua del sangrado.
- En el concreto endurecido se reduce la permeabilidad, incrementando la resistencia a la flexión, tensión e impacto.
- Reduce los daños por corrosión, ya que no se corroe.
- Reduce los costos de colocación del concreto y es fácil de usar.

4.4 Aplicación

Las fibras sintéticas se añaden durante la operación del mezclado, generalmente se empaican de manera suelta en bolsas degradables que se agregan a la mezcla en la planta de dosificación y mezclado, o se vierten al camión mezclador en el lugar de la obra. De preferencia debe agregarse a la mezcla en la planta para obtener mejor control en su consumo y permitir un mezclado eficiente para garantizar la uniformidad de su distribución en la masa del concreto.

Recomendaciones del procedimiento para el mezclado, usando una revolvedora de 90 litros de capacidad.

- Incorporar la arena, grava y agua de absorción, mezclando durante un minuto.
- Añadir el cemento y agua, mezclando durante tres minutos.
- Reposar tres minutos y dos minutos adicionales para romper el fraguado falso, en caso de que éste se presentara.
- Finalmente añadir las fibras sintéticas, mezclando los materiales antes mencionados durante dos minutos. O en caso de requerir aditivos para restaurar el revenimiento, se incorpora la fibra posterior al aditivo y se continúa mezclando durante dos minutos adicionales.

La adición de la micro-fibra en el concreto puede ser una bolsa de 600 gr por cada m³ de concreto o bien una bolsa de 100 gr por cada bulto de 50 kg de cemento.

4.5 Colocación, Compactación y Curado

El concreto reforzado con fibras sintéticas se puede colocar de manera convencional, usando equipos tales como canaletas de camión, cubos con descarga inferior, bandas transportadoras y bombas. El equipo se deberá encontrar en buenas condiciones y limpio para que el concreto fluya de manera eficiente. La compactación del concreto se logrará mediante el vibrado externo para garantizar una distribución uniforme de las fibras, debido a que se altera mediante el vibrado por inmersión.

Para el acabado del concreto con fibras sintéticas, se deberá usar un vibrador externo para minimizar la exposición de las fibras en la superficie. Posteriormente, se deberá verificar que toda el agua del sangrado se haya evaporado antes de comenzar con el acabado del concreto, de esa manera se evitan agrietamientos por contracción plástica. Finalmente, si se requiere un acabado texturizado, se puede utilizar una escoba con cerdas duras o un rastrillo texturizador, pasándola en una sola dirección.

4.6 Concreto a Edad Temprana

De acuerdo con Mendoza Et. Al. (2011), en el estudio que llevó a cabo de las fibras de polipropileno para el concreto, se seleccionaron 8 muestras diferentes con la finalidad de obtener comparaciones de las propiedades del concreto. La fibra de polipropileno que se usó para el estudio es del tipo monofilamento, no filibrada, totalmente orientada, con un perfil que permite anclarla a la matriz cementicia. En la siguiente tabla No. 9, se podrán ver las características de la fibra.

Fibra	Monofilamento de copolímero virgen
Color	Gris
Longitud, mm	38
Resistencia a tensión, kg/cm²	6328-7031
Módulo elástico, kg/cm²	43000
Peso específico	0.93
Punto de ignición, °C	177

Tabla 9. Propiedades de la fibra de polipropileno (Mendoza, 2011).

En la fabricación de la mezcla de concreto, se escogieron dos tamaños de agregados gruesos (9.5 mm y 19.0 mm) y agregado fino de origen andesítico (en la tabla No. 10 se muestran las características de los agregados), así también cuatro contenidos de fibra de propileno (0, 1, 3 y 5 kg/m³) en mezclas de revenimiento promedio de 100 mm y una resistencia nominal a compresión de 300 kg/cm².

Propiedad	Arena		Grava	
	natural	lavada	9.5 mm	19.0 mm
Peso específico (seco)	2.11	2.28	2.46	2.46
Peso específico saturado superficialmente (seco)	2.31	2.40	2.51	2.51
Absorción, %	9.05	5.63	1.73	1.73
Peso volumétrico seco suelto, kg/m ³	1562	1539	1439	1450
Peso volumétrico seco compactado, kg/m ³	1662	1644	1583	1613
Módulo de finura	2.84	3.10	****	****

Tabla 10. Propiedades de los agregados pétreos (Mendoza, 2011)

En la siguiente tabla No. 11, se observa la dosificación para la fabricación del concreto.

Material	Consumos de material en kg/m³	
	Grava de 19.0 mm	Grava de 9.5 mm
Cemento	362	426
Agua	177	214
Arena	742	772
Grava	936	836
Aditivo (solo en M4), ml	1373	-
Relación agua/cemento	0.49	0.50
Proporción arena-grava	0.44-0.56	0.48-0.52

Tabla 11. Consumo y proporción de los componentes de los concretos. (Mendoza, 2011)

Se realizaron ensayos de revenimiento, contenido de aire y masa unitaria de acuerdo a la normatividad mexicana NMX-C156-ONNCCE (Industria de la Construcción – Concreto hidráulico – Determinación del revenimiento en el concreto fresco), NMX-C157-ONNCCE (Industria de la Construcción – Concreto hidráulico – Determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método de presión) y NMX-C112-ONNCCE (Industria de la Construcción – Concreto hidráulico - Terminología).

De acuerdo con Mendoza, el ensaye de agrietamiento por contracción plástica consistió en fabricar anillos de concreto de 80 mm de altura y diámetros interior y exterior de 280 y 580 mm respectivamente, y someterlos a un flujo de viento de 4 m/s a una temperatura de 20°C y una humedad relativa de 40%.

Mezclas con gravas de 19.0 mm y arena sin lavar			
Mezcla	Revenimiento	Masa unitaria	Aire atrapado
	cm	kg/m ³	%
M1 (0 kg de fibra/m ³)	12.0	2281	2.0
M2 (1 kg de fibra/m ³)	9.9	2271	2.4
M3 (3 kg de fibra/m ³)	8.7	2280	2.2
M4 (5 kg de fibra/m ³)	9.8*	2266	2.2
Mezclas con gravas de 9.5 mm y arena lavada			
M5 (0 kg de fibra/m ³)	10.0	2238	3.4
M6 (1 kg de fibra/m ³)	10.7	2249	2.8
M7 (3 kg de fibra/m ³)	9.2	2257	2.5
M8 (5 kg de fibra/m ³)	7.1	2234	2.8
*Revenimiento restablecido con el empleo de aditivo superfluidificante.			

Tabla 12. Propiedades del concreto en estado fresco de mezclas con y sin fibras (Mendoza, 2011)

Como se observa en la tabla No. 12, al incrementar el contenido de las fibras disminuye el revenimiento de las mezclas. También se observa que la masa unitaria no presenta cambios significantes, así mismo; en el contenido de aire se muestran cambios insignificantes con el consumo de fibra, esto es debido a que las últimas mezclas fueron con arenas lavadas y partículas pequeñas, y al no haber una buena mezcla homogénea, quedó aire atrapado.

Mezcla	Número de grietas		Índice de grieta mm
	Anillo 1	Anillo 2	
Grava 19.0 mm			
M1 (0 kg de fibra/m ³)	9	9	0.23
M2 (1 kg de fibra/m ³)	4	3	0.18
M3 (3 kg de fibra/m ³)	1	1	0.08
M4 (5 kg de fibra/m ³)	0	0	----
Grava 9.5 mm			
M5 (0 kg de fibra/m ³)	5	3	0.11
M6 (1 kg de fibra/m ³)	2	1	0.07
M7 (3 kg de fibra/m ³)	1	1	0.04
M8 (5 kg de fibra/m ³)	0	0	----

Tabla 13. Índice de grieta por contracción plástica (Mendoza, 2011)

Observando la tabla No. 13, el índice de grieta disminuye al aumentar el contenido de las fibras, lo que significa que hay una reducción de agrietamientos e incluso llega hasta no haber agrietamiento, esto al observar las pruebas M4 y M8, en las que ya no se presentan grietas.

4.7 Concreto en Estado Endurecido

Según Mendoza, se realizaron pruebas para obtener la resistencia a la compresión; módulo elástico y relación de Poisson; resistencia a tensión por compresión diametral; resistencia a flexión y tenacidad; resistencia al impacto, y contracción por secado. Todo lo anterior de conformidad con los métodos de ensayos NMX-C-083-ONNCCE (Industria de la Construcción – Concreto – Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto – Método de prueba), NMX-C-128-ONNCCE (Industria a la Construcción – Concreto sometido a compresión – Determinación de módulo elástico y relación de Poisson),

NMX-C-163-ONNCCE (Industria de la Construcción – Concreto – Determinación de la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto), NMX-C-191-ONNCCE (Industria de la Construcción – Concreto – Determinación a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro) y ASTM C-157 (Determinación de la Contracción). Los cuales arrojaron los siguientes resultados:

Mezclas con gravas de 19.0 mm y arena sin lavar			
	Resistencia a compresión, f_c, kg/cm²		f_c 7 días/f_c 28 días
	7 días	28 días	
M1 (0 kg de fibra/m ³)	238	366	0.65
M2 (1 kg de fibra/m ³)	241	346	0.70
M3 (3 kg de fibra/m ³)	230	334	0.69
M4 (5 kg de fibra/m ³)	252	365	0.69
Mezclas con gravas de 9.5 mm y arena lavada			
M5 (0 kg de fibra/m ³)	251	350	0.72
M6 (1 kg de fibra/m ³)	264	352	0.75
M7 (3 kg de fibra/m ³)	243	336	0.72
M8 (5 kg de fibra/m ³)	247	334	0.73

Tabla 14. Resistencia a compresión de los concretos con y sin fibras (Mendoza, 2011).

En la tabla No. 14, se observa que a mayor contenido de fibra, tiende a disminuir la resistencia con grava de 9.5 mm y arena lavada. Esa reducción se debe a que disminuye la consistencia y la compactación. Para lograr una buena compactación se agrega un aditivo superfluidificante el cual incrementa la consistencia, igualando la resistencia a la alcanzada en los concretos sin fibra.

Identificación	Resistencia a compresión, f_c , kg/cm ²	Módulo de elasticidad, E, kg/cm ²	Relación de Poisson, μ	Deformación unitaria máxima. ϵ_c	$E_c/\sqrt{f_c}$
Mezclas con gravas de 19.0 mm y arena sin lavar					
M1	366	241 986	0.26	0.0026	12 649
M2	346	233 255	0.22	0.0027	12 540
M3	334	248 975	0.21	0.0023	13 623
M4	365	247 108	0.24	0.0027	12 934
Mezclas con gravas de 9.5 mm y arena lavada					
M5	350	235 347	0.20	0.0029	12 435
M6	352	227 437	0.21	0.0030	11 918
M7	336	236 212	0.26	0.0025	12 615
M8	334	218 428	0.23	0.0033	11 827

Tabla 15. Propiedades elásticas de los concretos con fibras (Mendoza, 2011)

En la tabla No. 15 se observan los resultados de las pruebas, no hay cambios en la rigidez del concreto por la incorporación de la fibra, conservando valores similares los concretos con o sin fibras sintéticas de polipropileno. La deformación unitaria máxima resultó prácticamente la misma para ambos concretos. Por último, se observa que las mezclas de concretos con gravas más pequeñas requieren mayor cantidad de mortero, y por lo tanto, son más deformables.

Identificación	Resistencia a compresión, f_c , kg/cm ²	Resistencia a flexión, f_r , kg/cm ²	f_r/f_c , %	$f_r/\sqrt{f_c}$
Mezclas con gravas de 19.0 mm y arena sin lavar				
M1 (0 kg de fibra/m ³)	366	35	9.6	1.83
M2 (1 kg de fibra/m ³)	346	39	11.3	2.10
M3 (3 kg de fibra/m ³)	334	39	11.7	2.13
M4 (5 kg de fibra/m ³)	365	40	11.0	2.10
Mezclas con gravas de 9.5 mm y arena lavada				
M5 (0 kg de fibra/m ³)	350	48	13.7	2.56
M6 (1 kg de fibra/m ³)	352	35	9.9	1.89
M7 (3 kg de fibra/m ³)	336	41	12.2	2.22
M8 (5 kg de fibra/m ³)	334	43	12.9	2.34

Tabla 16. Resistencia a tensión por flexión.

En esta tabla No.16, se observa que hubo un incremento de resistencia a la tensión por flexión con gravas de 19 mm en los concretos con fibras, caso contrario el de las gravas de 9.5 mm que disminuye la resistencia. No obstante, la relación de resistencias a tensión por flexión de concreto con o sin fibras, se observa que las gravas de 9.5 mm son superiores a las de 19.0 mm. Por lo tanto, no se puede generalizar el efecto de la adición de las fibras en la resistencia a tensión por flexión, puesto que algunas mezclas de las fibras incrementan las resistencias y en otras disminuyen.

Identificación	Resistencia a compresión, f_c , kg/cm ²	Resistencia a tensión, f_t , kg/cm ²	f_t/f_c %	$f_t/\sqrt{f_c}$
Mezclas con gravas de 19.0 mm y arena sin lavar				
M1 (0 kg de fibra/m ³)	366	29	7.9	1.52
M2 (1 kg de fibra/m ³)	346	30	8.7	1.61
M3 (3 kg de fibra/m ³)	334	29	8.7	1.59
M4 (5 kg de fibra/m ³)	365	32	8.8	1.67
Mezclas con gravas de 9.5 mm y arena lavada				
M5 (0 kg de fibra/m ³)	350	34	9.6	1.80
M6 (1 kg de fibra/m ³)	352	31	8.7	1.63
M7 (3 kg de fibra/m ³)	336	30	9.1	1.66
M8 (5 kg de fibra/m ³)	334	33	9.9	1.80

Tabla 17. Resistencia a tensión por compresión diametral (Mendoza, 2011).

En cuanto a la resistencia a tensión por compresión diametral en la tabla No.17, se observa que no hay variaciones significativas tanto para el concreto con fibras como sin fibras sintéticas, sin embargo en la figura No. 2, se observan los tipos de fallas que se presentan en los cilindros, donde es clara la influencia de las fibras en la ductilidad del concreto a la falla.

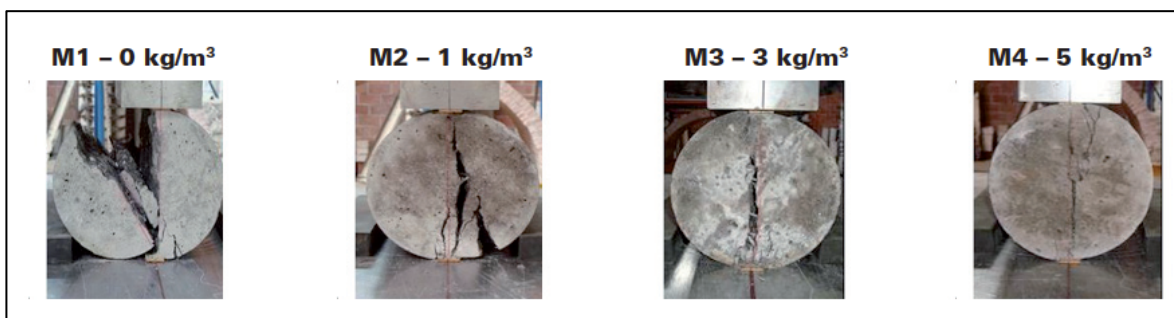


Figura 2. Modo de falla de las muestras de resistencia a compresión diametral para las mezclas con grava de 19.0 mm (Mendoza, 2011).

Identificación	Resistencia al impacto. Número de impactos	
	Primera grieta (C. con fibra/C. sin fibra)	Grieta última (C. con fibra/C. sin fibra)
Mezclas con gravas de 19.0 mm y arena sin lavar		
M1 (0 kg de fibra/m³)	347 (1.00)	350 (1.00)
M2 (1 kg de fibra/m³)	225 (0.65)	255 (0.73)
M3 (3 kg de fibra/m³)	446 (1.28)	490 (1.40)
M4 (5 kg de fibra/m³)	693 (2.00)	764 (2.18)
Mezclas con gravas de 9.5 mm y arena lavada		
M5 (0 kg de fibra/m³)	553 (1.00)	555 (1.00)
M6 (1 kg de fibra/m³)	639 (1.15)	667 (1.20)
M7 (3 kg de fibra/m³)	706 (1.28)	776 (1.40)
M8 (5 kg de fibra/m³)	815 (1.47)	969 (1.75)

Tabla 18. Resistencia al impacto de los concretos con y sin fibras (Mendoza, 2011).

En la tabla No. 18, de acuerdo a los resultados, existe una tendencia de aumento de la resistencia al impacto de los concretos con fibras, es decir; que a partir de 3 kg de fibra se observa un mejor desempeño de los concretos con fibras que sin fibras. Así también; se observa que se obtiene mejor resistencia al impacto con menor tamaño de grava y arena lavada.

Identificación	Tenacidad (Joules)				Índices de tenacidad		
	T_{δ}	$T_{3\delta}$	$T_{5,5\delta}$	$T_{10,5\delta}$	I_5	I_{10}	I_{20}
Mezclas con gravas de 19.0 mm y arena sin lavar							
M2 (1 kg de fibra/m ³)	35.65	62.46	69.82	82.64	1.75	1.96	2.32
M3 (3 kg de fibra/m ³)	27.95	50.08	70.93	99.64	1.79	2.54	3.57
M4 (5 kg de fibra/m ³)	32.08	71.94	119.16	197.11	2.24	3.72	6.16
Mezclas con gravas de 9.5 mm y arena lavada							
M6 (1 kg de fibra/m ³)	19.20	39.15	52.69	65.43	2.00	2.62	3.25
M7 (3 kg de fibra/m ³)	5.24	16.20	23.76	36.29	3.10	4.54	6.93
M8 (5 kg de fibra/m ³)	4.87	17.73	29.04	48.19	3.70	6.08	10.14

Tabla 19. Tenacidad de las mezclas de concreto con fibras (Mendoza, 2011).

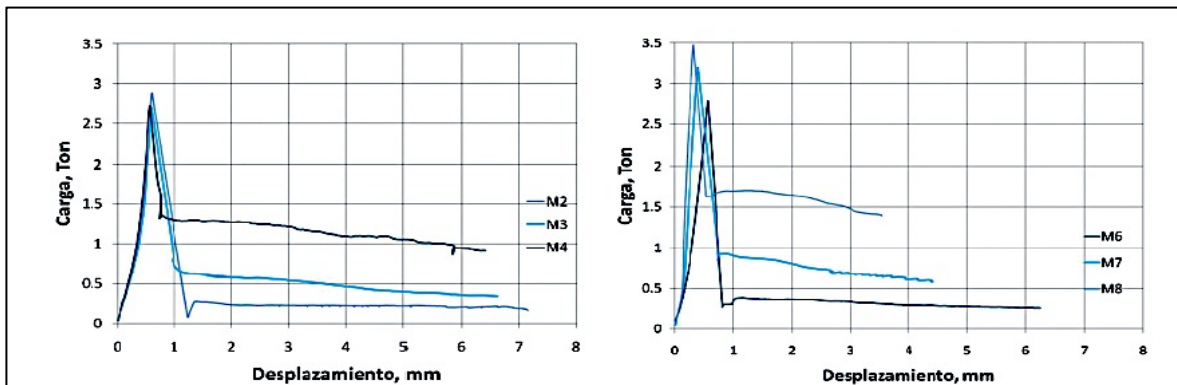


Figura 3. Comportamiento carga-desplazamiento para las mezclas con agregado de 19.0 mm y 9,5 mm de tamaño máximo (Mendoza, 2011).

La tenacidad del concreto se mide como el área bajo la curva de esfuerzo – deformación obtenida del ensayo en flexión de vigas, realizado con cargas aplicadas a los tercios del claro y con control de la velocidad de desplazamiento al centro del claro. En la tabla No. 19 y figura No. 3 se pueden observar la tenacidad de los concretos con fibras incrementadas y con gravas de 9.5 mm y arena lavada.

Identificación	$\epsilon_r = \frac{t^a}{b + t^a} (\epsilon_c)u$		
	a	b	$(\epsilon_c)u \times 10^{-6}$
Mezclas con gravas de 19.0 mm y arena sin lavar			
M1 (0 kg de fibra/m ³)	1	7.31	558
M2 (1 kg de fibra/m ³)	1	11.3	535
M3 (3 kg de fibra/m ³)	1	16.5	492
M4 (5 kg de fibra/m ³)	1	10.9	483
Mezclas con gravas de 9.5 mm y arena lavada			
M5 (0 kg de fibra/m ³)	1	13.0	466
M6 (1 kg de fibra/m ³)	1	9.15	394
M7 (3 kg de fibra/m ³)	1	5.05	308
M8 (5 kg de fibra/m ³)	1	1.74	217

Tabla 20. Contracción por secado de los concretos con y sin fibras (Mendoza, 2011).

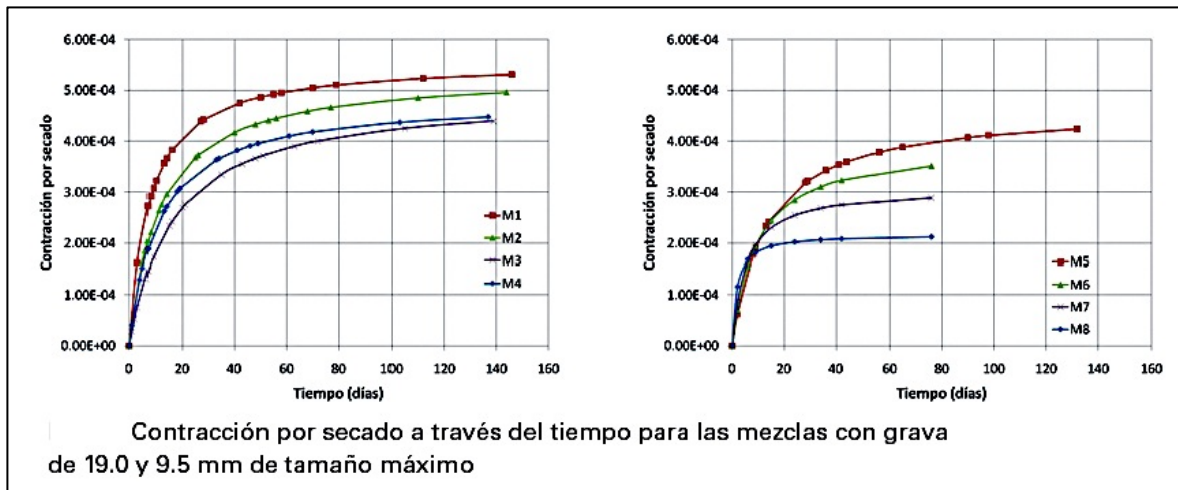


Figura 4. Contracción por secado a través del tiempo para las mezclas con grava de 19.0 y 9.5 mm de tamaño máximo (Mendoza, 2011).

Una de las razones por la que existe agrietamiento del concreto debido a la contracción, es por la pérdida de humedad, cuando los elementos están restringidos para contraerse libremente. La rapidéz que presenta la pérdida de humedad es debido a la temperatura, humedad relativa del ambiente, la velocidad del viento, el área expuesta del elemento y otros factores intrínsecos del concreto, así como la capacidad de sus materiales componentes para retener humedad en su interior.

En la tabla No. 20 se observa que al aumentar la cantidad de fibra en el concreto se reduce la contracción última esperada a largo plazo, ver también figura No. 4.

Capítulo 5

Macro-Fibra Sintética Estructural

5.1 Descripción

Las macro-fibras sintéticas tienen mayor potencial para proporcionar la ductibilidad del concreto. Como resultado, en suelos y losas de concreto, esas fibras son capaces de controlar el agrietamiento causados por movimiento térmico y contracción de secado a largo plazo. Aunque estas macro-fibras sintéticas suelen contener algún tipo de polipropileno, se diferencian de las micro-fibras de polipropileno por que son más grandes (40 – 50 mm de longitud y 1.0 a 1.5 mm de ancho), hechas a base de polímeros seleccionados y utilizados en dosis mayores a las micro-fibras de polipropileno. Estas propiedades de fibras sintéticas estructurales permiten proporcionar un nivel significativo de control después de la fisura, de la misma manera que las fibras de acero (Labib, 2004).

5.2 Tipos de Macro Fibras Sintéticas

5.2.1 BARCHIP EPC

Un tipo de fibra sintética estructural es la llamada BARCHIP EPC (EMCOR) figura No. 5, es una fibra de polipropileno modificado con poliolefina elastomérica que se añade al concreto y al concreto reforzado. Son resistentes a las aguas ácidas y a las condiciones que propician la oxidación en el acero, la superficie de la fibra tiene un relieve para crear la adherencia con la pasta cementosa.



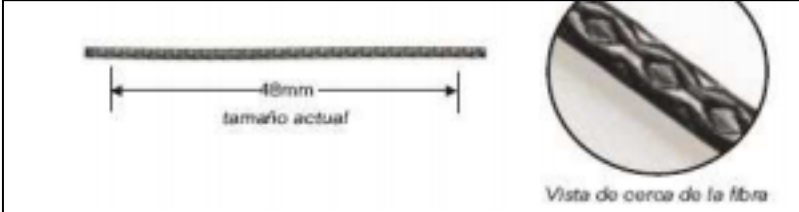
Figura 5. La fibra BARCHIP EPC. (EMCOR)

El polipropileno se obtiene a partir del propileno extraído del gas del petróleo, el cual es un material termoplástico incoloro muy ligero y duro; debido a su estructura química y disposición espacial, se obtiene un gran número de beneficios deseables.

Este polímero posee una excelente resistencia química, buenas propiedades eléctricas derivadas de su apolaridad, inercia química y biológica, alta estabilidad térmica, es de fácil procesamiento y puede ser reciclado. Además dada su especial organización macromolecular se orienta de forma que permite la flexión alterna a lo largo del eje de estrangulamiento, sin apenas fatiga del material.

5.2.1.1 Uso

Este tipo de fibra también es utilizada para reemplazar la malla y las fibras metálicas. Se utiliza principalmente en el concreto reforzado, suelos y concreto prefabricado. (Figura No. 6)



48mm
tamaño actual

Vista de cerca de la fibra

CARACTERISTICAS

Característica	Propiedad del material
Base de resina	poliolefina
Longitud	48 mm
Resistencia a la tension	550 Mpa (5.500Kg/cm2)
Textura superficial	Relieve continuo
Cantidad de fibras/Kg	> 35.000
Densidad especifica	0,90 a 0,92
Modulo de young	6 Gpa
Punto de fusion	150-165°C
Punto de ignicion	>450°C

Figura 6. Características de la fibra BARCHIP EPC (EMCOR)

5.2.1.2 Beneficios

- Reduce el desgaste de mangueras, equipos de transporte y bombeo del concreto.
- Es liviana y fácil de manejar.
- Su resistencia es igual a la del acero.
- No existe oxidación asegurando la durabilidad.
- Es resistente contra incendios debido a la minimización de la exfoliación.
- Mayor resistencia al impacto, abrasión e impermeabilidad.

La presencia de macro-fibras en el concreto y concreto lanzado puede reducir de manera significativa la exfoliación que ocurre durante un incendio. El calentamiento del concreto hace expandir la humedad retenida dentro de su masa, lo cual resulta en la explosión de una pequeña capa de concreto en su superficie. La exfoliación puede ocurrir dentro de los primeros 10 a 15 minutos desde el inicio del incendio, cuando las temperaturas superficiales llegan a 200°C.

Las fibras se derriten cuando la temperatura aumenta hasta a 160°, creando una multitud de canales a través de los cuales la humedad se dispersa tranquilamente y reduce la presión dentro del concreto.

5.2.1.3 Dosificaciones

Dependiendo de los proyectos para el uso del concreto, se puede dosificar la fibra entre 3 y 20 kg/m³. Una dosis típica sería 5 kg/m³ para reforzar el concreto en excavaciones subterráneas.

5.2.1.4 Mezclado

Se puede mezclar la fibra con el concreto en cualquier etapa del proceso. Generalmente en la planta de fabricación del concreto, se agregan las bolsas de papel degradable al camión de olla, antes de agregar los demás materiales. Las fibras se dispersan automáticamente después de 5 minutos, girando la olla del concreto. Con una dosis de 7 kg/m³, el cono podría bajar aproximadamente 20 mm.

5.2.1.5 Bombeo

Se puede bombear la fibra a través de mangueras de 50 mm sin problema alguno, sin embargo; hay que asegurarse que las fibras pasen por la rejilla del equipo de bombeo.

5.2.1.6 Manejo

Este tipo de fibra, generalmente se maneja ya sea en bolsas de 5 kg de papel degradable y/o bolsas a granel del mismo peso.

5.2.1.7 Ensayos

De acuerdo a la NORMA ASTM C-1550 (Equipo panel circular), se aplican los ensayos para el análisis del concreto que es usado en excavaciones subterráneas, taludes y piezas prefabricadas.

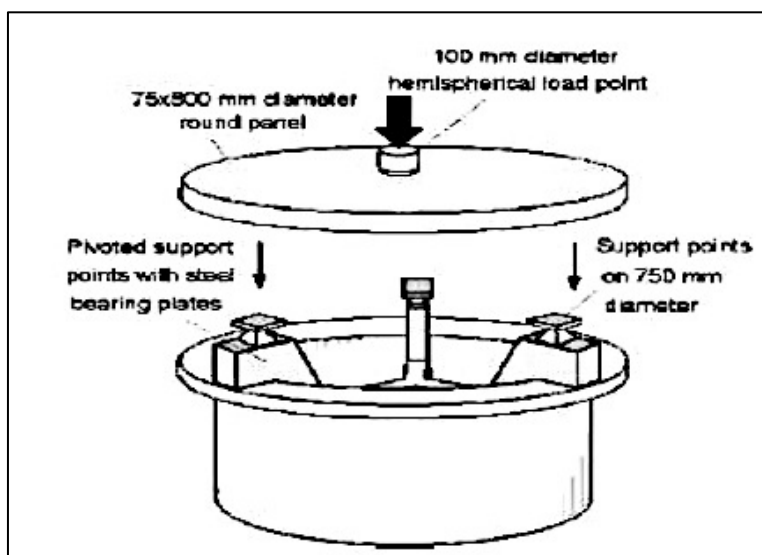


Figura 7. Equipo panel circular (ASTMC-1550)

Para las pruebas, se requiere la imposición de una carga a la punta central de un panel circular con un diámetro de 800 mm y un espesor de 75 mm, figura No. 7.

El procedimiento para la prueba es el siguiente:

Se coloca el panel sobre tres puntos de apoyo que están ubicados simétricamente en un círculo con diámetro de 750 mm.

Apisonar con un pistón hidráulico a una velocidad constante de 4 mm/min, hasta llegar a un desplazamiento de 40 mm, ver figura No. 8.

Por último, se realiza una gráfica de carga contra desplazamiento, donde el área por debajo de la curva representa la energía absorbida por el panel.



Figura 8. Panel de ensayo reforzado con fibras sintéticas (EMCOR)

5.2.1.8 Conclusión

Este tipo de fibra sintética es usada en varios sectores de la industria de la construcción, entre los que se mencionan a continuación:

- Minería Subterránea:
 - a. Tiene una gran resistencia durante la deformación de la masa rocosa.

- b. No existe daño en personal humano ni en cables eléctricos de los equipos.
- Túneles:
 - a. Durante la relajación de la masa rocosa, se obtiene una gran ductilidad para el revestimiento primario del concreto.
 - b. Debido a la reducción de la exfoliación explosiva, el revestimiento del concreto es más resistente al incendio.
- Suelos de Concreto:
 - a. Su colocación es fácil y se obtiene un acabado sin manchas de óxido ni pinchos metálicos.
- Concreto Prefabricado:
 - a. Resistente a la flexión igual que el acero.
 - b. Disminuye el ancho de las grietas.
 - c. Tiene mayor resistencia al fuego debido a la exfoliación explosiva.

5.2.2 MPH FIBER PLUS

Son macro fibras sintéticas estructurales para el concreto reforzado. Debido a los tratamientos físico-químicos durante el proceso de fabricación, se obtiene una adherencia óptima junto con el concreto (MyPhor).

5.2.2.1 Uso

- Refuerzo estructural en concreto.
- Concreto lanzado y concreto en revestimiento (túneles).
- Soleras.
- Prefabricados.
- Concreto al que se necesita aumentar las siguientes propiedades: resistencia a la tracción, al impacto y a la capacidad de absorción (disipación de energía).

En la siguiente tabla No. 21, se observan las características de la fibra MPH FIBER PLUS.

Materia Prima	Polipropileno 100% HOMOPOLIPROPILENO	Temperatura de distorsión	110°C Según ASTM D-648
Densidad	0.91 gramos/cm ³	Temperatura de descomposición	280°C Según ASTM D-648
Absorción de humedad	Nula	Grosor de la fibra	4.200 denniers
Fluidez	1.8 a 3.2 gr/min según ASTM D-1238	Diámetro equivalente	0.93 mm aprox.
Colores disponibles	Blanco natural/Gris/ Negro	Longitud de la fibra/esbeltez	48 mm/60
Proceso de Transformación	Extrusión		36 mm/45
Sistema	Monofilamento plano y grabado		otras longitudes bajo pedido
Resistencia a la tensión	>400 MPa	Longitud total	2.250 mts /kg de fibra.
Elongación según ASTM D-638	7%		
Módulo de Elasticidad	> 6 GPa		

Tabla 21. Características de la fibra MPH FIBER PLUS (MyPhor).

5.2.2.2 Beneficios

- Incrementa la absorción de energía.
- Incrementa la resistencia a la tracción.
- Aportan resistencias residuales a flexo-tracción superiores a las mínimas recomendadas por la norma para el Concreto Estructural (EHE – 08), por lo que se consideran fibras estructurales.
- Reduce las microfisuras por retracción durante el fraguado, evitando la formación de fisuras mayores.
- Disminuye la permeabilidad.
- Aumenta la resistencia al impacto y a la abrasión.
- Reduce el riesgo de disgregación de la masa.
- No le afectan los procesos de corrosión y oxidación a diferencia de los concretos reforzados metálicamente.

5.2.2.3 Aplicación

Añadir la fibra como un componente más del concreto durante su proceso de fabricación, cuidando de no añadirla sobre el agua amasada antes de añadir el resto de los componentes.

Se debe tener cuidado en una buena dosificación, que permita la adherencia entre las fibras y la pasta cementante.

5.2.2.4 Dosificaciones

- Para pavimentos de concreto, la dosificación recomendada está entre 2 kg/m³ y 10 kg/m³, ésta en función de los requerimientos y el tipo de fibra.

- Para concreto lanzado, la dosificación recomendada está entre 3 kg/m³ y 10 kg/m³. La relación de dosificación en comparación con las fibras metálicas para igualar la absorción de energía está entre 1/4 y 1/8, dependiendo del tipo de fibras.
- El ajuste de dosificaciones estará en función de los parámetros resistentes y requiere ensayos previos.

5.2.2.5 Ensayo

Se llevó a cabo la prueba de resistencia a la tensión. Para ello se fabricaron 4 tipos de concretos, concreto sin fibra, concreto con macro-fibra sin tratamiento superficial, concreto con macro-fibra con tratamiento superficial MPH FIBER PLUS y concreto con micro-fibra de multifilamento; para obtener y evaluar las diferencias de comportamiento entre ellos, mediante ensayo de flexotracción.

Para poder obtener una evaluación con mayor precisión, los 4 tipos de concreto se sometieron a sucesivos ciclos de carga hasta conseguir la rotura, ver tabla No. 22.

	Tensión (N/mm ²)		
	1ª carga	2ª carga	3ª carga
Hormigón patrón (sin fibras).	7,0	----	----
Hormigón con macro-fibras sin tratamiento superficial.	7,3	4,8	2,1
Hormigón con macro-fibras con tratamiento superficial.	8,0	6,2	3,3
Hormigón con micro-fibras multifilamento.	7,0	1,9	----

Tabla 22. Resistencia a la Tensión. (MyPhor)

5.2.2.6 Conclusión

De acuerdo al artículo de MPH FIBER PLUS (MyPhor), este tipo de macro – fibras son aptas para el armado estructural del concreto, puesto que tienen una resistencia a la tensión muy alta en comparación de los otros tres tipos de concreto, tal como se pudo observar en la tabla No. 22.

Capítulo 6

Criterios de aceptación para el Concreto con Fibras Sintéticas.

6.1 Características y Normatividad

Los objetivos de este capítulo son:

- Se pretende conocer las características físicas, mecánicas, ventajas y desventajas de los tipos de fibras, para cada tipo de aplicación en el concreto.
- Se pretende desarrollar criterios mediante resultados de pruebas de laboratorios de acuerdo a los códigos, reglamentos y normatividades.

NORMAS ASTM

- **NORMA ASTM C 31.** Elaboración y curado en obra de especímenes de concreto para pruebas de compresión.
- **NORMA ASTM C 39.** Método de ensayo normalizado para resistencia a la Compresión de especímenes cilíndricos de concreto.
- **NORMA ASTM C 78-02.** Determinación del esfuerzo a la flexión del concreto. Usando viga simple con carga a los tercios del claro.
- **NORMA ASTM C 94.** Especificación normalizada para concreto premezclado.
- **NORMA ASTM C 192.** Práctica normalizada para preparación y curado de especímenes de concreto para ensayos en laboratorio.

- **NORMA ASTM C 215.** Método de ensayo estándar para frecuencias fundamentales transversales, longitudinales y torcionales en especímenes de concreto.
- **NORMA ASTM C 490.** Práctica estándar para el uso del aparato para la determinación del cambio de longitud de la pasta de cemento, mortero y concreto endurecido.
- **NORMA ASTM C 494.** Especificación normalizada de aditivos químicos para concreto.
- **NORMA ASTM C 666.** Método de prueba para medir la resistencia del concreto a una rápida congelación y descongelación.
- **NORMA ASTM C 1609.** Método de prueba del funcionamiento en flexión del concreto reforzado con fibra (utilizando una viga con carga en el tercer punto).
- **NORMA ASTM E 4.** Práctica para la verificación de fuerza, de las máquinas de ensayo.

NORMAS MEXICANAS

- **NMX – C – 083 – ONNCCE - 2002.** Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto – método de prueba.
- **NMX – C – 109 – ONNCCE.** Industria de la Construcción – Concreto – Cabeceo de especímenes cilíndricos.
- **NMX – C – 111 – ONNCCE – 2004.** Industria de la Construcción – Agregados para concreto hidráulico – especificaciones y métodos de prueba.

- **NMX – C – 159 – ONNCCE.** Industria de la Construcción – Concreto – Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio.
- **NMX – C – 160 – ONNCCE.** Industria de la Construcción – Concreto – Elaboración y curado en obra de especímenes de concreto.
- **NMX – C – 161 - ONNCCE.** Industria de la Construcción – Concreto Fresco – Muestreo.

OTRAS NORMAS

- **NORMA EN 14651.** Método de ensayo para concreto con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual).

6.2 Pruebas de Laboratorio.

6.2.1 Prueba de Resistencia a la Flexión del Concreto.

El objetivo de esta prueba es hacer una comparación de la resistencia a la flexión del concreto con y sin fibra. Por lo que se recomienda hacer tres especímenes con fibras sintéticas y tres especímenes sin fibras sintéticas, mediante la NORMA ASTM C 78.

6.2.1.1 Resistencia a la Flexión

La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la tracción del concreto. Es también, una medida de la resistencia a la falla por momento de una viga o losa de concreto no reforzada. Se mide mediante la aplicación de cargas a

vigas de concreto de 6 x 6 pulgadas (150 mm x 150 mm) de sección transversal y con luz de, cómo mínimo tres veces su espesor. La resistencia a la flexión se expresa como el Módulo de Rotura (MR) en libras por pulgada cuadrada (MPa) y es determinada mediante métodos de ensayos de la NORMA ASTM C 78-02 (cargada en los tres puntos) ó la NORMA ASTM C 293 (cargada en el punto medio). (Figura No. 9).

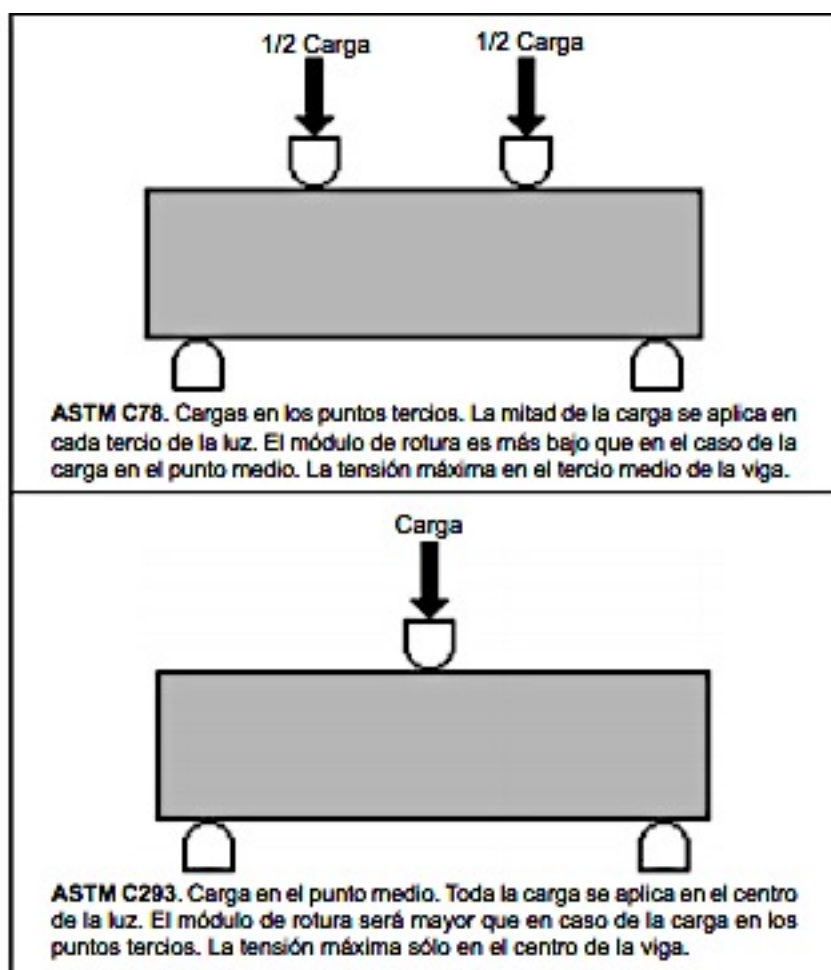


Figura 9. Resistencia a flexión del Concreto (NRMCA, CIP 16)

6.2.1.2 Equipo.

6.2.1.2.1 Máquina de Ensayo

La máquina de prueba debe cumplir con lo establecido por la norma NMX – C – 083 – ONNCCE. La máquina de prueba puede ser de tipo a compresión o universal, con capacidad suficiente y que pueda funcionar a la velocidad de la aplicación de la carga, sin producir impactos ni pérdida de carga.

6.2.1.2.2. Aparato de Aplicación de Carga.

De acuerdo a la recomendación de Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (2008); se debe utilizar un dispositivo capaz de aplicar cargas en los tercios del claro de prueba de tal modo que las fuerzas sean perpendiculares a las caras horizontales de la viga y, se distribuyan y apliquen uniformemente en todo el ancho. Este aparato (figura No. 10), debe ser capaz de mantener fija la distancia entre los puntos de carga y los puntos de apoyo del espécimen, con una tolerancia de ± 2 mm; además, las reacciones deben ser paralelas a la dirección de las fuerzas aplicadas durante el tiempo que dure la prueba. La relación de la distancia del punto de aplicación de cada una de las cargas a la reacción más cercana dividida entre la altura de la viga, no debe ser menor de uno. Los bloques para la aplicación de la carga y de apoyo de la viga deben ser de acero del mismo ancho o mayor que el de la viga con una altura que no exceda de 65 mm, medida a partir del centro de giro.

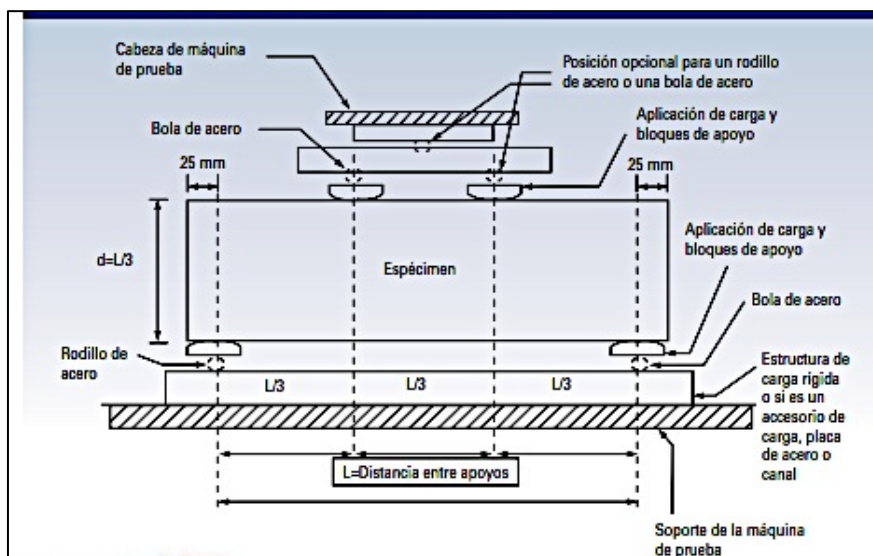


Figura 10. Aparato para la prueba de resistencia a la flexión con carga en los tercios del claro (IMCYC, 2008).

La sección de cada uno de los bloques que entran en contacto con la viga, deben ser cilíndricos con las superficies endurecidas, teniendo en cuenta que la línea de contacto de estas superficies no deben variar en más de 0.05 mm, con relación a un plano tangente a las mismas. El radio de curvatura de estas superficies debe tener como centro el eje del rodillo de apoyo o el centro de la rótula. La superficie curva de cada bloque de aplicación de carga, debe ser la correspondiente a un sector cilíndrico de mínimo 0.785 radianes (45°). Los bloques de aplicación de carga deben mantenerse alineados en posición vertical, por medio de mecanismos de presión que pueden ser tornillos con resortes, que los mantengan en contacto con los rodillos o rótulas de acero. Puede suprimirse el rodillo y la rótula de acero de los bloques de apoyo, cuando el bloque de apoyo de la máquina de prueba sea de asiento esférico, siempre que en los bloques de aplicación de la carga se use un rodillo y una rótula de acero pivoteada.

6.2.1.3. Muestreo.

El muestreo debe realizarse de acuerdo a lo establecido en la Norma NMX – C-161 – ONNCCE. Cada muestra debe consistir de cuando menos dos especímenes de una misma revoltura, que se prueban a la edad de proyecto.

6.2.1.4. Preparación del Espécimen.

Los especímenes deben cumplir con lo establecido en las Normas NMX – C – 159 y NMX – C – 160. En donde se hace la mezcla de:

- Cemento Portland.
- Agregado grueso.
- Agregado fino.
- Agua.
- Fibra sintética (hasta 1%).

Para realizar la mezcla del concreto fresco, se requiere utilizar equipos adecuados tal como lo establece la normatividad mexicana antes mencionada.

La longitud del espécimen debe ser la distancia entre apoyos más 50 mm como mínimo. La distancia entre apoyo debe ser de tres veces el peralte de la viga con una tolerancia de 2%. Esta distancia debe ser marcada en las paredes de la viga antes del ensaye. Cabe decir que las caras laterales del espécimen deben estar en ángulo recto con las caras horizontales. Todas las superficies deben ser lisas y libres de bordes, hendiduras, agujeros o identificaciones grabadas (figura No. 11).



Figura 11. Preparación de los especímenes (IMCYC, 2008)

6.2.1.5. Procedimiento

De acuerdo a la Norma ASTM C 78, se procede de la siguiente manera.

1. Proteger el espécimen de la pérdida de humedad, una pérdida de humedad disminuye la resistencia a la flexión.
2. Colocar las caras laterales del espécimen (caras encofradas) hacia arriba y centrar en los soportes. (Figura No. 12).

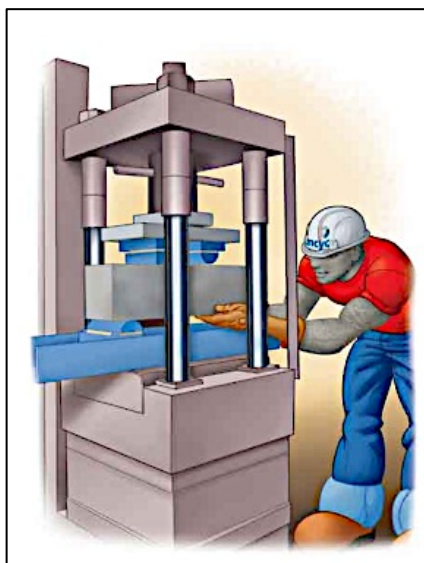


Figura 12. Colocacion del espécimen (IMCYC, 2008)

3. Centrar el sistema de carga con respecto a la fuerza aplicada.
4. Colocar los bloques superiores en contacto con la superficie del espécimen (en los tres apoyos) y aplicar una carga entre 3 y 6% de la última carga estimada.
5. Checar que los espacios (depresiones) entre el espécimen y los bloques superiores y los apoyos no excedan de 0.1 mm en una longitud de 25 mm.
6. Si una depresión se excede de 0.1 mm pero es menor de 0.38 mm en una longitud de 25 mm. Se permite el uso de correas de cuero que se extienden en el ancho del espécimen en la superficie de contacto.
7. Si una depresión se excede de 0.38 mm en una longitud de 25 mm. Retirar el espécimen de prueba y la condición correcta del ensayo, es con capeo o mediante pulido.
8. Repetir el paso 1.

9. Aplicar la carga a una proporción que constantemente aumente la tensión de la fibra extrema, entre 0.9 y 1.2 MPa/min (125 y 175 psi/min) hasta que ocurra la rotura.
10. Determinar la proporción de la aplicación de carga (r).

$$r = \frac{Sbd^2}{L}$$

donde:

r = Velocidad de carga, MN/min (lb/min).

S = Velocidad de incremento de esfuerzos (fibras extremas), MPa/min (psi/min).

b = Ancho promedio del espécimen, en mm.

d = Profundidad o espesor promedio del espécimen, en mm.

L = Longitud, en mm.

11. Aplicar carga al espécimen continuamente y sin impacto.
12. Tomar tres medidas por cada dimensión al plano de falla (uno cada borde y al centro) con una aproximación de 1 mm (figura No. 13).

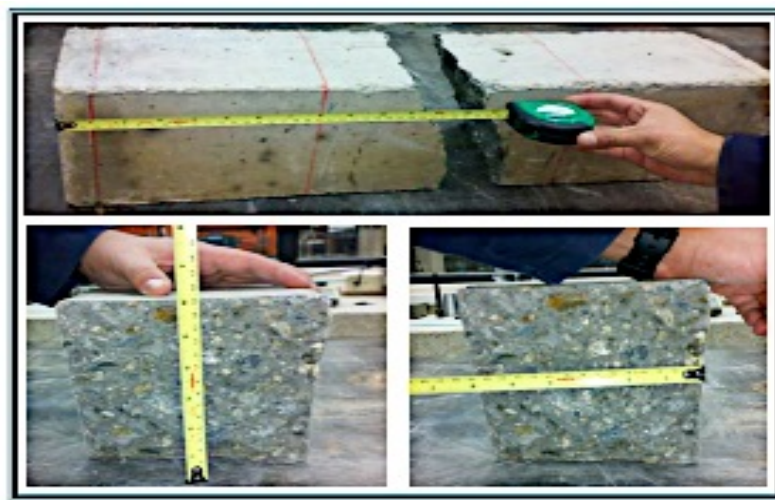


Figura 13. Medición del espécimen. (ASTM C 78)

13. Registrar el ancho promedio, profundidad promedio, y línea de ubicación de la fractura en la sección de falla con una aproximación de 1 mm.

14. Determinar el módulo de rotura, con una precisión de 0.05 MPa (5 Psi).

- a. Si la falla ocurre en el tercio medio de la viga y no sobrepasa en más del 5%, aplicar la siguiente ecuación:

$$R = \frac{PL}{bd^2}$$

- b. Si la falla sobrepasa el 5% del tercio medio de la viga, aplicar la siguiente ecuación.

$$R = \frac{3Pa}{bd^2}$$

donde:

R = Módulo de Rotura, MPa (Psi).

P = Carga máxima aplicada, indicada por la máquina de ensayo, N (lbf).

L = Longitud de la separación de apoyo, en mm.

b = Ancho promedio del espécimen en la fractura, en mm.

d = Profundidad o espesor promedio del espécimen, en mm en la fractura.

A = Distancia promedio entre la línea de la fractura y el soporte más cercano medido en la superficie de tensión de la viga, en mm.

6.2.1.6. Reporte

En el reporte se deberán incluir:

- Número de identificación
- Ancho promedio con aproximación de 1 mm.
- Altura promedio con aproximación de 1 mm.
- Longitud en mm.
- Carga máxima aplicada en N.
- Módulo de rotura calculado con una precisión de 0.05 MPa (5 psi).
- Curado y condiciones de humedad del espécimen en el tiempo de prueba.
- Si el espécimen fue capeado.
- Defectos del espécimen.
- Edad del espécimen.

6.2.1.7. Observaciones

El promedio de la resistencia a la flexión de los tres especímenes con fibras, deberá ser igual al promedio de la resistencia a la flexión de los tres especímenes sin fibras a los 28 días.

6.2.2. Prueba de Resistencia a la Compresión del Concreto.

El objetivo de esta prueba es hacer una comparación de la resistencia a la compresión del concreto con y sin fibra. Por lo que se recomienda hacer tres

especímenes con fibras sintéticas y tres especímenes sin fibras sintéticas, aplicando la NORMA ASTM C 39.

6.2.2.1 Resistencia a la Compresión

Las mezclas de concreto se pueden diseñar de tal manera que tengan una amplia variedad de propiedades mecánicas y de durabilidad, que cumplan con los requerimientos de diseño de la estructura (NRMCA, CIP 35). La resistencia a la compresión del concreto es la medida más común de desempeño que emplean los ingenieros para diseñar edificios y otras estructuras. La resistencia a la compresión se mide fracturando probetas cilíndricas de concreto a una máquina de ensayos de compresión. La resistencia a la compresión se calcula a partir de la carga de ruptura dividida por el área de la sección que resiste a la carga y se reporta en unidades de libra-fuerza por pulgada cuadrada (psi) en unidades EEUU o en mega pascales (MPa) en unidades SI. Los requerimientos para la resistencia a la compresión pueden variar desde 2,500 psi (17 MPa) para concreto residencial hasta 4,000 psi (28 MPa) y más para estructuras comerciales. Sin embargo, para determinadas aplicaciones se especifican resistencias superiores hasta de 10,000 psi (70 MPa) y más.

6.2.2.2 Equipo

6.2.2.2.1 Máquina de Ensayo

La máquina puede ser de tipo a compresión o universal, con capacidad suficiente y que pueda funcionar a la velocidad de la carga, sin producir impactos ni pérdida

de carga. Si la máquina de prueba tiene solamente una velocidad con carga que cumpla con lo indicado en condiciones especiales de humedad, debe estar provista de algún dispositivo complementario que pueda ser operado mecánica o manualmente para ajustar la carga a una velocidad adecuada para su calibración. El espacio para los especímenes de prueba debe ser lo suficientemente grande para darle cabida, en una posición cómoda, a éstos y al dispositivo de calibración. La calibración del dispositivo se debe verificar de acuerdo a la Norma ASTM E4 y en las siguientes condiciones:

- Se debe calibrar la máquina por lo menos cada 13 meses.
- En la instalación original o re-localización de la máquina.
- Así también; si se tiene duda de su precisión o exactitud.

La máquina deberá ser operada con energía y será capaz de aplicar una carga continua durante todo el proceso de ensayo. El porcentaje de error permitido para las máquinas de ensayo no debe ser mayor a $\pm 1.0\%$ de la carga indicada (figura No. 14).

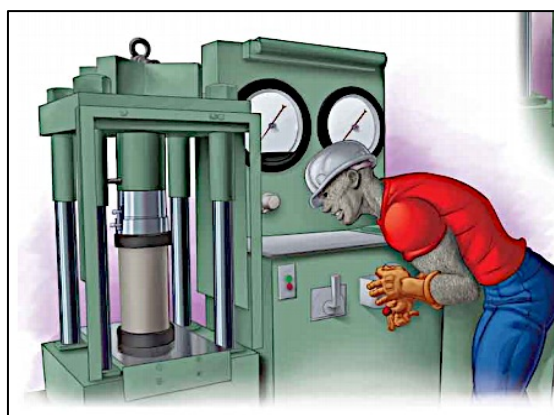


Figura 14. Aparato de la prueba de resistencia a la compresión. (IMCYC, 2008)

6.2.2.3 Preparación y Acondicionamiento de las Muestras

6.2.2.3.1 Dimensiones

Los especímenes deben cumplir con lo establecido en las Normas ASTM C 39. En donde se hace la mezcla de:

- Cemento Portland.
- Agregado grueso.
- Agregado fino.
- Agua.
- Fibra sintética (máximo 1%).

El diámetro y la altura del espécimen de prueba debe determinarse promediando las medidas de 2 diámetros perpendiculares entre sí a una altura media del espécimen y 2 alturas opuestas con una aproximación de 1 mm. Para la medición del diámetro, se recomienda usar un compas de punta. Cuando la altura promedio del espécimen es menor de 1.8 veces el diámetro, el resultado de la resistencia debe corregirse por esbeltez (IMCYC, 2008).

Factores de corrección por esbeltez	
Relación Altura-Diámetro del espécimen	Factor de corrección a la resistencia
2.00	1.00
1.75	0.99
1.50	0.97
1.25	0.94
1.00	0.91

Tabla 23. Factores de corrección por esbeltez (IMCYC, 2008).

Los valores intermedios que no aparecen en la tabla No. 23, deben calcularse por interpolación. **NO DEBERÁN ENSAYARSE ESPECÍMENES CON RELACIÓN, DIÁMETRO A ALTURA MENOR DE 1:1.**

6.2.2.3.2 Cabeceo

Antes del ensaye, las bases de los especímenes o caras de aplicación de carga no se deben apartar de la perpendicular al eje en más de 0.5° , aproximadamente 3 mm en 300 mm, y no se permiten irregularidades respecto de un plano que exceda de 0.05 mm, en caso contrario deben ser cabeceadas de acuerdo a lo indicado en la NORMA NMX – C – 109 – ONNCCE.

6.2.2.4 Condiciones Ambientales

El ensaye a la compresión de los especímenes curados en húmedo debe efectuarse tan pronto como sea posible después de retirarlos de la pileta o del cuarto húmedo y una vez que el material de cabeceo haya adquirido la resistencia verificada de acuerdo a la NMX – C – 109 – ONNCCE. Durante el retiro del almacenamiento húmedo, se debe prevenir la pérdida excesiva de humedad en los especímenes.

6.2.2.5 Condiciones Especiales de Humedad

En el caso de especímenes sometidos a condiciones de curado especiales, curado a vapor o curado al ambiente, los especímenes se deben ensayar con la condición de humedad resultante del curado especificado. (Figura No.15).



Figura 15. Curado de especímenes. (IMCYC, 2008)

6.2.2.6 Procedimiento

1. Empezar el ensayo tan pronto como el espécimen ha sido retirado de la cámara de curado y conservar sus condiciones de humedad.
2. Limpiar la superficie de los soportes superior e inferior de la prensa.
3. Colocar el espécimen en el bloque de soporte inferior.
4. Alinear los ejes del espécimen con el centro del bloque de empuje superior (soporte con cabeza movable).
5. Verificar que el indicador de carga se encuentre en ceros.
6. Mover el bloque de soporte inferior lentamente para poner el espécimen en contacto con los platos de compresión de la prensa.
7. Aplicar la carga continuamente (sin choque) con un rango de velocidad de 0.25 ± 0.05 MPa/s. Para máquinas de tornillo, la proporción de la carga dependerá del tamaño del espécimen de prueba, módulo de elasticidad del concreto y de la dureza de la máquina de comprobación.
8. Durante el ensayo ajuste la válvula de inyección de aceite suavemente, con el objeto de mantener constante la velocidad de aplicación de la carga durante la última fase de carga.
9. Aplicar la carga hasta que el espécimen falle.
10. Registrar la máxima carga soportada por el espécimen. Para máquinas con indicadores de carga automáticos, no detener la aplicación de la carga hasta que disminuya más del 95% de la máxima carga.
11. Anotar el tipo de la fractura y la apariencia del concreto.
12. Calcular el esfuerzo de compresión con una aproximación de 0.1 MPa.
13. Si la relación L/D es 1.75 o menor, el valor calculado de esfuerzo se debe multiplicar por el factor de corrección. (Tabla No. 24).

L/D	FACTOR DE CORRECCIÓN
1.75	0.98
1.50	0.96
1.25	0.93
1.00	0.87

Tabla 24. Factor de corrección según la relación L/D. (Norma ASTM C 39)

14. Registrar los datos.

6.2.2.7 Cálculos

- Calcular la resistencia a la compresión.

$$R = \frac{P}{A}$$

donde:

R = Esfuerzo a la compresión del espécimen (MPa).

P = Máxima carga aplicada (kn)

A = Área de la cara axial del espécimen (mm²)

- Si se requiere, calcular la densidad del espécimen cerca de 10 kg/m^3 como sigue:

$$\text{Densidad} = \frac{W}{V}$$

donde:

W = Masa del espécimen (kg).

V = Volúmen del espécimen obtenido de la media del diámetro y de la media de la longitud o pesando el cilindro en el aire y sumergido, (m^3).

- Si el volumen se obtiene pesando, se debe realizar de la siguiente manera:

$$V = \frac{W - W_s}{\gamma_w}$$

donde:

Ws = Masa aparente del espécimen sumergido (kg).

γ_w = Densidad del agua a $23^\circ\text{C} = 997.5 \text{ kg/m}^3$.

6.2.2.8 Tipos de Fallas

En base a los resultados de la resistencia a la compresión, se muestran las siguientes clases de fallas (figura No.16):

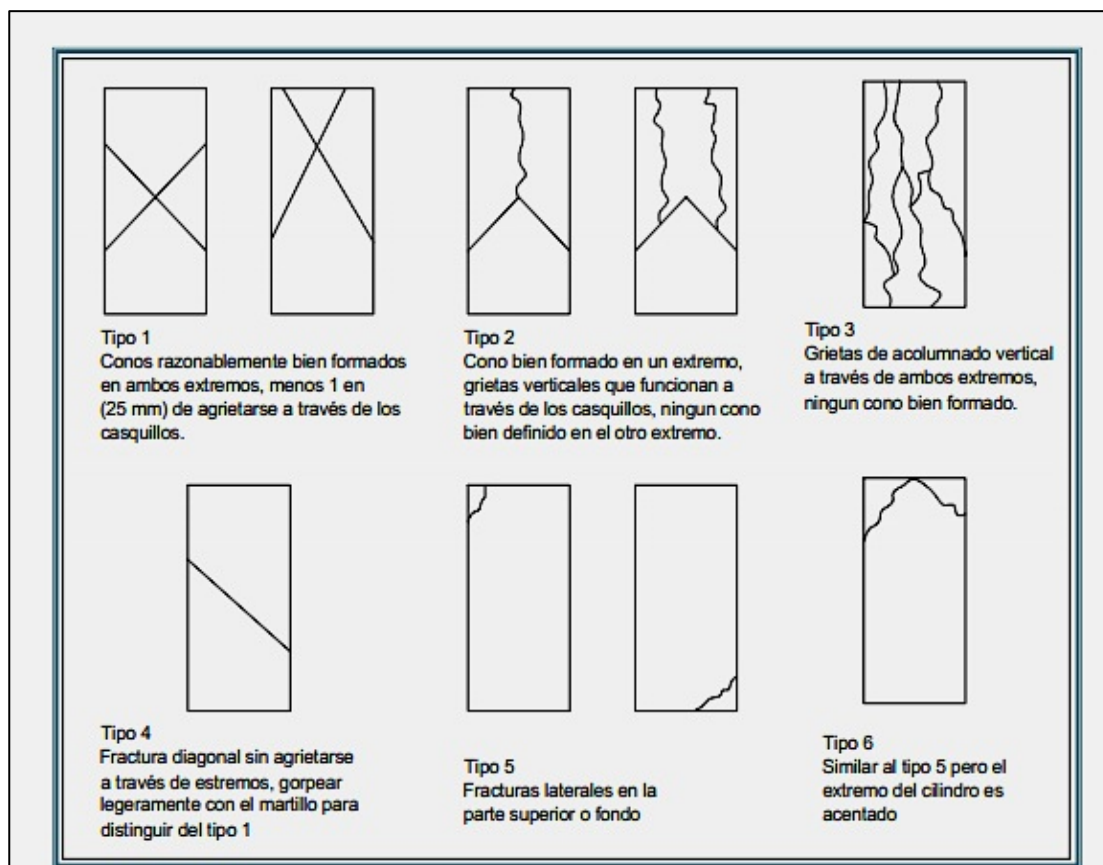


Figura 16. Diagrama esquemático de los patrones típicos de fractura. (ASTM C 39)

6.2.2.9 Reporte

El reporte de los resultados debe incluir los datos siguientes:

- Clave de Identificación del espécimen.
- Edad nominal del espécimen.
- Diámetro y altura en cms con aproximación a mm.
- Área de la sección transversal en cm² con aproximación al décimo.
- Masa del espécimen en kg.

- f) Carga máxima en N.
- g) Resistencia a la compresión, calculada con aproximación a 100 kPa.
- h) Defectos observados en el espécimen o en sus cabezas.
- i) Descripción de falla de ruptura.

6.2.3 Prueba de Durabilidad a la Congelación y Descongelación

El objetivo de esta prueba es hacer una comparación de durabilidad a la congelación y descongelación del concreto, con fibra y sin fibra. Por lo que se recomienda hacer tres especímenes con fibras sintéticas y tres especímenes sin fibras sintéticas, mediante la NORMA ASTM C 666, cada prueba incluye cuatro tipos de grupos de probetas.

6.2.3.1 Durabilidad a la Congelación y Descongelación.

La durabilidad del concreto se define como su capacidad para resistir la acción de meteorización, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Un concreto durable conservará su forma, calidad y serviciabilidad originales al estar expuesto a su ambiente (Comité ACI).

Una de las causas principales del deterioro del concreto en regiones frías/templadas es el efecto provocado por los ciclos de congelación – descongelación.

En climas muy fríos, el concreto puede presentar descongelamientos superficiales o agrietamientos debidos a las tensiones internas que se producen al congelarse

la fase acuosa presente en los poros, con el consiguiente aumento de volúmen, tal como se observa en la figura No. 17.

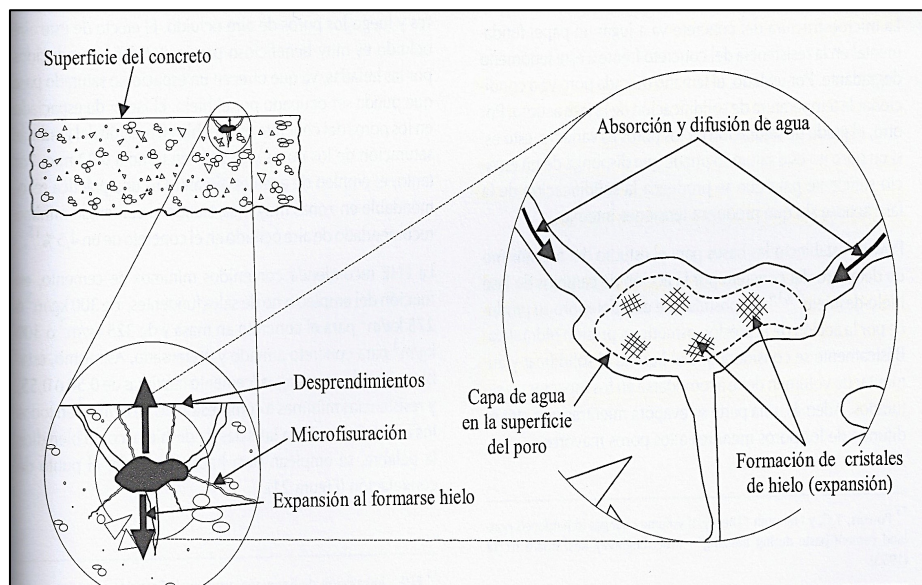


Figura 17. Efecto en la formación de hielo en el concreto (Ing. Sanjuan, 2001).

Según el Ing. Sanjuan, las razones que producen este tipo de daños son debido a la exposición a ciclos de congelación-descongelación y a la exposición a temperaturas bajo cero en presencia de sales de deshielo. El fenómeno de congelación, sucede como consecuencia del aumento del volúmen, en torno al 9% del agua líquida al transformarse en hielo. Por lo que las tensiones producidas por la transformación pueden ser, como pueden no ser resistidas por el concreto.

Al no resistir las tensiones producidas por la congelación, se producirían daños en el material, por un lado a mayor compacidad del material, mayor es la resistencia

del concreto (lo cual sería ideal), sin embargo; ese menor contenido de poros implicaría que se alcanzará el grado crítico de humedad en los poros del concreto de una forma rápida (figura No.18). Razón por la cual se emplean agentes aireantes en el concreto.

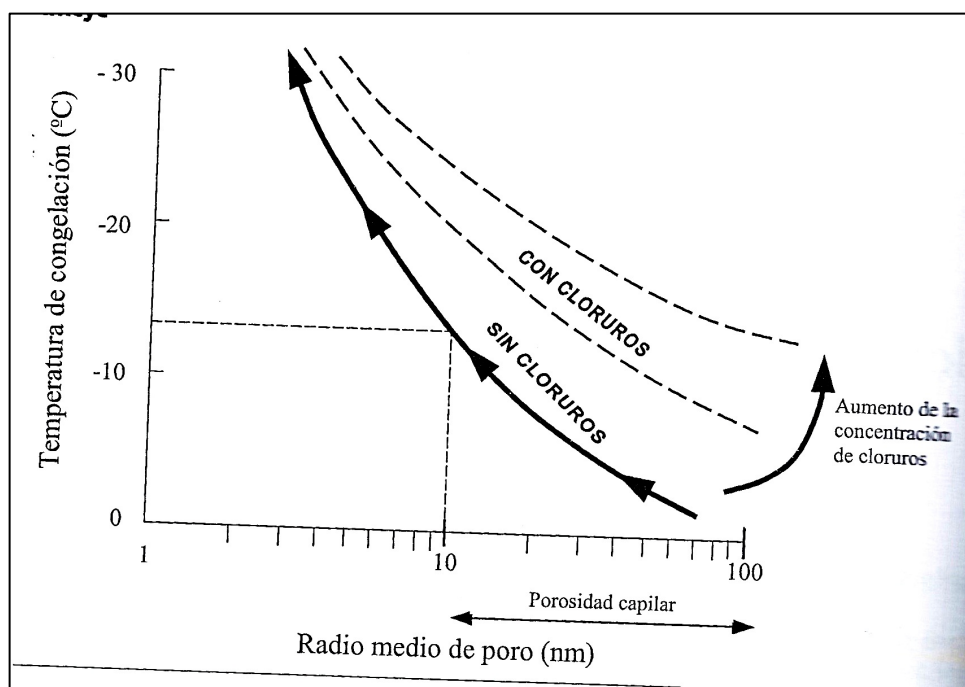


Figura 18. Temperatura de congelación en función del tamaño de poro y de la presencia o no de iones cloruro en la disolución (Ing. Sanjuan, 2001).

Se ha comprobado que el uso del concreto en países de clima cálido, cuando las temperaturas son altas, agravan los procesos químicos perjudiciales tales como la corrosión y las reacciones álcali – agregado, por lo que, para tener una buena durabilidad del concreto, se debe tener una dosificación adecuada (aire – cemento

– agua – agregados – con o sin fibras) para soportar los ciclos de congelación – descongelación.

Si la dosificación del concreto no es adecuada, se originan dos tipos de deterioro: descascarillado exterior y daño micro – estructural interior (disminución importante en el módulo de elasticidad) (Al-Assadi, 2009).

Para que en el concreto se produzcan la mayoría de los procesos físicos y químicos, tanto los deseables como los perjudiciales, se necesita agua, y además, para que el concreto sea resistente al ciclo, se debe tener una buena calidad de agregados, bajas relaciones de agua – cemento (A/C) y un sistema adecuado de aire – vacíos.

6.2.3.2 Diseño de Probetas

Se fabrican ocho tipos de cilindros de especímenes agregando a las dosificaciones del concreto convencional los siguientes grupos de probetas:

- Con aireante (0.05% del peso del cemento) bien curado con fibra sintética
- Con aireante (0.05% del peso del cemento) mal curado con fibra sintética
- Sin aireante (0.05% del peso del cemento) bien curado con fibra sintética
- Sin aireante (0.05% del peso del cemento) mal curado con fibra sintética
- Con aireante (0.05% del peso del cemento) bien curado sin fibra sintética

- Con aireante (0.05% del peso del cemento) mal curado sin fibra sintética
- Sin aireante (0.05% del peso del cemento) bien curado sin fibra sintética
- Sin aireante (0.05% del peso del cemento) mal curado sin fibra sintética

Los especímenes deben cumplir con lo establecido en las Normas ASTM C 39. En donde se hace la mezcla de:

- Cemento Portland.
- Agregado grueso.
- Agregado fino.
- Agua.

6.2.3.3 Procedimiento

Siguiendo la Norma ASTM C 666, se realiza el método de ensayo en el laboratorio de resistencia del concreto mediante ciclos cortos y repetidos de congelación – descongelación.

- A la edad de 28 días, se sumergen las probetas en agua durante 4 días, garantizando su saturación. (Figura No. 19).



Figura 19. Probetas sumergidas en agua (ASTM C 666).

- Introducir los especímenes en una cámara climática a 300 ciclos de congelación – descongelación, siguiendo el diagrama 1:

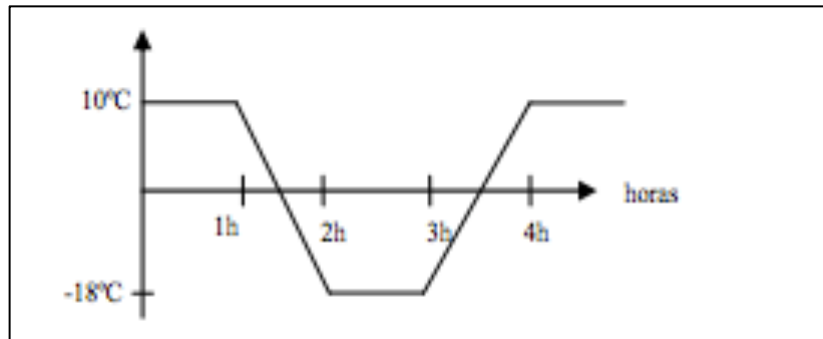


Diagrama 1: Esquema del ciclo congelación/descongelación (Al-Assadi, 2009).

- Cada 42 ciclos, realizar las medidas de longitud, peso y velocidad de pulso ultrasónico, hasta completar los 300 ciclos o hasta reducir un 60% del módulo elástico inicial, cualquiera que ocurra primero.
- Al finalizar, extraer las probetas a 10°C y medir en las probetas ensayadas:
 - a. Módulo de elasticidad.
 - b. Resistencia a Tracción.
 - c. Resistencia a Compresión.

6.2.3.4 Cálculos

De acuerdo a la normatividad ASTM C 666, las medidas deben incluir la pérdida de peso, el cambio de longitud y la velocidad de ondas ultrasónicas.

6.2.3.4.1 Módulo Dinámico de Elasticidad

De acuerdo a la norma ASTM C 215, se miden la velocidad de las ondas ultrasónicas de los especímenes:

$$E_d = V_1^2 \frac{\gamma (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{g (1 - \nu)}$$

donde:

E_d = Módulo dinámico de elasticidad del concreto en N/m^2 .

V_1 = Velocidad transversal del pulso ultrasónico en m/s.

γ = Peso específico del concreto en N/m^3 .

g = Aceleración de la gravedad en m/s^2 .

ν = Coeficiente de Poisson (0.2).

6.2.3.4.2 Módulo Dinámico de Elasticidad Relativo

El módulo dinámico de elasticidad relativo (RDME en %) es el valor relativo entre el módulo dinámico de elasticidad después de los ensayos de congelación – descongelación y el valor inicial antes de los ciclos. La fórmula es la siguiente:

$$RDME(\%) = \left(\frac{n_c^2}{n_0^2} \right) * 100$$

donde:

n_c = Velocidad transversal de pulso ultrasónico después de c ciclos en m/s.

n_0 = Velocidad inicial transversal de pulso ultrasonico en el ciclo 0 en m/s.

Las medidas terminan cuando el módulo dinámico relativo baja al 50 – 60% de su valor inicial.

6.2.3.4.3 Factor de Durabilidad

El factor de durabilidad mide la capacidad resistente del concreto frente a los ciclos congelación – descongelación.

$$DF = (RDME)_n * \frac{n}{M}$$

donde:

RDME = Módulo dinámico de elasticidad relativo en %.

n = número de ciclos completados.

M = Número total de ciclos (por lo general 300 ciclos).

6.2.3.4.4 Cambio de Longitud

De acuerdo a la norma ASTM C 490, se miden los especímenes usando un calibre digital.

$$Cambio (\%) = \frac{(L_c - L_0)}{L_0} * 100$$

donde:

L_c = Longitud en el ciclo c en mm.

L_0 = Longitud inicial en el ciclo 0 en mm.

6.2.3.4.5 Pérdida de Peso

Pesar los ensayos cuando están en el ciclo de descongelación, usando una balanza de precisión de 0.1 gramo.

$$Pérdida (\%) = \frac{(W_c - W_0)}{W_0} * 100$$

donde:

W_c = Peso en el ciclo c en gr.

W_0 = Peso en el ciclo inicial 0 en gr.

6.2.3.5 Reporte

El registro de los resultados debe incluir los datos siguientes:

- a) Clave de Identificación del espécimen.
- b) Edad nominal del espécimen.
- c) Módulo elástico.
- d) Módulo elástico relativo.
- e) Factor de durabilidad.
- f) Cambio de longitud.
- g) Pérdida de peso.

Comparar resultados con los 8 grupos de especímenes.

6.3 Resultados del Comportamiento de las Fibras en Diferentes Pruebas.

Teniendo en cuenta las diferentes tecnologías, materias primas y desempeño de las fibras en el concreto, existe una necesidad del mercado por resultados que comprueben cómo se comportan, para que sean escogidas correctamente en función al tipo de aplicación.

6.3.1 Reforzamiento

El concreto reforzado con fibras es un material compuesto donde las fibras quedan distribuidas de manera aleatoria en la matriz cementicia. Estas fibras, estructuralmente actúan de manera transversal en las fisuras generando un “puente de transferencia” de tensiones, es decir, las fibras evitan la propagación

de las fisuras y alteran el comportamiento mecánico del compuesto. En la siguiente tabla No. 25, se observa el comportamiento de diferentes tipos de fibras (MACCAFERRI, 2011).

	Fibras de Acero	Micro Fibra Polimérica	Macro Fibra Polimérica
Retracción plástica	+	+++	+
Retracción por secado	+++	×	×
Resistencia al impacto	+++	+	++
Control de fisuración (estado límite de servicio)	+++	×	×
Tensión pos-fisuración (estado límite último)	++	×	+
Dependiente de temperatura	+	-	-
Dependiente de tiempo	+	-	-
Sin ruptura por fluidez	+	-	-
Propiedades anti-spalling	×	+++	×
Resistencia a la fatiga	+++	×	+
Resistencia al fuego	+	-	-
Sin manchas (estética)	+	+	+
Resistencia a la corrosión	+ En el concreto + Fisuras < 0.2mm	+	+
+ = Efecto positivo - = Efecto negativo × = efecto insignificante (*) = galvanizado			

Tabla 25. Propiedades de refuerzo de las fibras.

6.3.1.1 Refuerzo para Contracción Plástica.

Después de concluir con la colocación del concreto fresco, el concreto empieza a ganar resistencia y rigidez. Durante la edad temprana, la resistencia a compresión es del orden de 3 MPa, la resistencia a tracción 0.3 MPa y el módulo de elasticidad es menor a 5 GPa; en seguida, el concreto puede presentar fisuras superficiales, por lo que, el uso de las micro fibras sintéticas disminuye la fisuración que ocurre en el estado plástico y durante las primeras horas de endurecimiento.

6.3.1.2 Refuerzo para Contracción de Secado y Control de Fisuras.

Posterior a las 24 horas de la colocación del concreto, las propiedades mecánicas del concreto se multiplican: la resistencia a la compresión excede 10 MPa, la resistencia a la tracción 1 MPa y el módulo de elasticidad 15 GPa, lo que significa que el concreto puede presentar fisuras nuevamente debido a que estará sometido a nuevas solicitudes de cargas.

Material	Módulo de Elasticidad (Young)
Concreto	+/- 30 GPa
Micro fibras sintéticas	+/- 4 GPa
Macro fibra sintética	3 - 10 GPa
Fibras de acero	210 GPa

Tabla 26. Módulo de elasticidad de los materiales (MACCAFERRI,2011).

Estructuras en concreto reforzado con macro fibras sintéticas, con edad avanzada, presentan fisuras con aberturas mayores que el mismo concreto reforzado con la fibra de acero, pudiendo aún representar grandes deformaciones y, dependiendo de la carga aplicada, es posible que se generen fallas en la estructura.

Tal como se puede observar en la tabla No. 26, las macro fibras sintéticas necesitan de fisuras con aberturas mayores para comenzar a desenvolver un estado de tensión útil. Por el hecho de que las macro fibras presentan un efecto de refuerzo plástico apenas en las primeras 24 horas, cuando la elasticidad es superior al módulo de elasticidad de concreto fresco (figura No. 20).

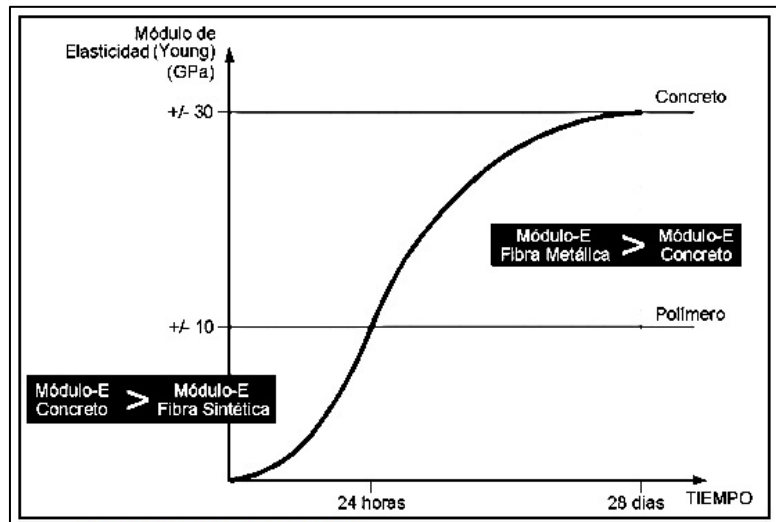


Figura 20. Gráfico Módulo de Young x Tiempo (MACCAFERRI, 2011).

6.3.1.3 Capacidad de Carga del Refuerzo en Estado Límite de Servicio (ELS), y Estado Límite Último (ELU).

El efecto del refuerzo de las fibras se mide a través de ensayos con métodos estandarizados según normas EN 14651 Y ASTM C 1609 (figura No. 21).

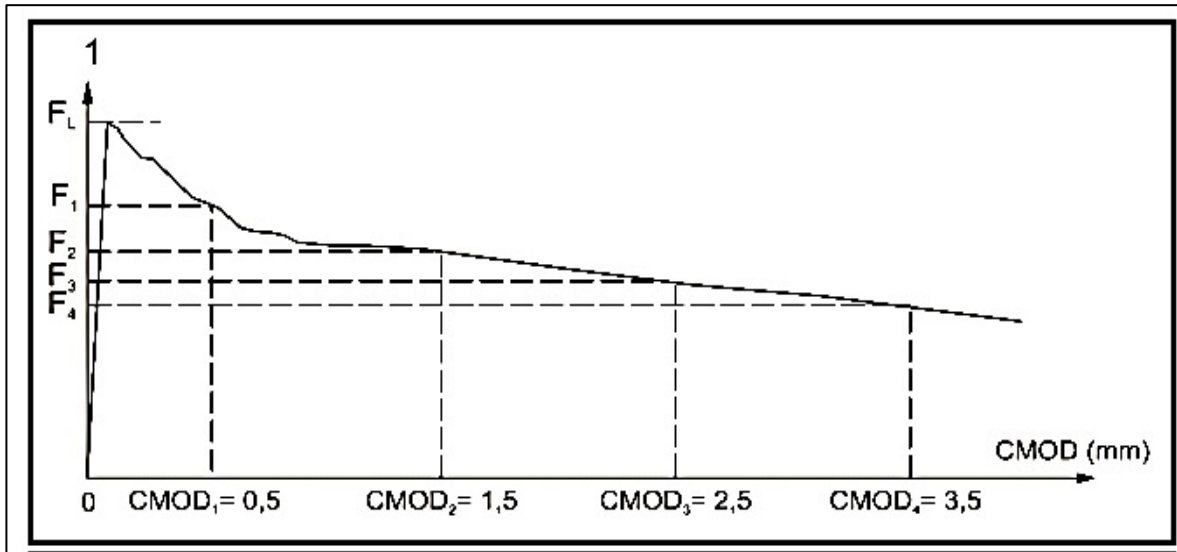


Figura 21. Gráfico $F \times CMOD$ (Crack Mouth Opening Displacement) (MACCAFERRI, 2011).

Generalmente, la resistencia pos-fisuración considerando baja abertura de las fisuras ($CMOD = 0.5 \text{ mm}$) es aplicada en el cálculo ELS, y la tensión pos-fisuración hasta $CMOD = 3 \text{ mm}$ es aplicada en el cálculo ELU.

Las fibras de acero y las macro-fibras sintéticas tienen un comportamiento diferente en el ensayo de viga estandarizado:

- Debido al bajo módulo de elasticidad, en las macro-fibras sintéticas, el ancho de las fisuras son muy significativas ($>0.5 \text{ mm}$) antes de que las fibras comiencen a trabajar.

6.3.1.4 Resistencia contra Ataques Químicos o efecto de la Corrosión

La gran mayoría de las macro y micro fibras sintéticas son resistentes a los agentes agresivos, por lo que es importante conocer el tipo de materia prima de fibras, de modo que puedan evitar problemas relacionados a los ataques químicos por la presencia de los álcalis del cemento.

Capítulo 7

Conclusiones Generales

De acuerdo a lo observado en los resultados según IMCYC, se demuestra que a mayor cantidad de micro-fibras en el concreto, disminuye de manera considerable el agrietamiento por contracción plástica, y a su vez aumentan la resistencia y la tenacidad al impacto. Otra ventaja del uso de microfibras en el concreto es la resistencia a las altas temperaturas, lo que aumenta la seguridad en las estructuras de concreto en caso de incendio, tal como se observa en la tabla No. 27.

Características	Tipo de Fibra		
	Fibra de Acero	Macro fibras sintéticas	Micro fibras sintéticas
Perdida de desempeño mecánico	300°C	50°C	50°C
Punto de fusión	1500°C	160°C	160°C

Tabla 27. Comportamiento de las fibras en relación a la temperatura (MACCAFERRI, 2011).

Es recomendable el uso de microfibras en el concreto reforzado, ya que obtendrían mayores beneficios en la industria de la construcción, particularmente en infraestructuras de concreto, tales como pavimentos, puentes, edificios, autopistas, pistas aéreas, entre otros.

Sin embargo, las microfibras a pesar de reducir la fisuración por reducción plástica, no pueden asumir ninguna función estructural, es decir, no sustituyen al acero de refuerzo.

Las macrofibras presentan un buen comportamiento contra la rotura, sin embargo, fallan ante una carga por tiempo prolongado, es decir, las macrofibras poseen características limitadas al ser considerada como refuerzo estructural, restringiéndose a usos particulares que requieran apenas aplicaciones de cargas leves y moderadas (que no soliciten un alto desempeño por parte del elemento de refuerzo).

En la siguiente tabla No. 28, se muestran las características y el desempeño para escoger cual fibra es recomendable usar (y la cantidad recomendable para la mezcla del concreto), dependiendo de las necesidades en la industria de la construcción.

Características físicas y mecánicas de las fibras	Propiedades	Concreto	Fibra de Acero	Micro / Macro Fibra Sintética Polipropileno extruido / Polietileno
	Coefficiente de expansión térmica	$12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	+ $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	- $1.5 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$
	Retracción por reducción de temperatura de 30 °C en fibra de 50 mm de largo	0.018mm	Retracción insignificante	0.23mm
	Comportamiento de fluidez en tensión (Punto de vitrificación)		+ +370°C	- - 20°C
	Temperatura de fusión		+ 1500°C	- 165°C (deja de actuar como refuerzo)
	Módulo de Young	30.000 MPa	+ 210.000 MPa	- 3.000 - 10.000 MPa
	Resistencia a la tracción		+ 500 - 2.000 Mpa	+ 200 - 600 MPa
	Peso específico	2.400 kg/m ³	- 7.850 kg/m ³	+ 910 kg/m ³
	Resistencia a los rayos UV		+	- Degradable
	Resistencia a la corrosión		+ En el concreto y en las fisuras < 0.2 mm	+
	Largo		30 - 60 mm	Micro: 6 - 20mm Macro: 30 - 65mm
	Diámetro		0.5 - 1.0 mm	Micro: 0.015 - 0.030mm Macro: 0.5 - 1.0mm
Indicación de fibras según su uso	Refuerzo para retracción plástica			+ (solo las micro fibras)
	Resistencia contra incendio			+ (solo las micro fibras)
	Refuerzo sin carga Pre-moldados: manejo y transporte Pisos y Pavimentos: temperatura y retracción plástica		+	+ (solo las macro fibras)
	Revestimiento temporal (túneles y minas), permitiendo gran deformación		+	+ (solo las macro fibras)
	Control de fisuración		+	
	Refuerzo estructural		+	
	Resistencia al impacto		+	
	Fatiga		+	

+ = Efecto positivo - = Efecto negativo

Tabla 28. Características y desempeños de las fibras según su uso.

Capítulo 8

Glosario

Absorción: Es el incremento en porcentaje (%), respecto a la masa seca inicial de un material sólido como resultado de la penetración de agua en los poros permeables hasta llenarlos.

Acabado: Es la textura final que se le da a la superficie expuesta de un elemento estructural o arquitectónico.

Adherencia: Es el grado de liga que existe entre el concreto y el acero de refuerzo, entre los agregados y la pasta o entre los concretos.

Aditivo: Es un material diferente del agua, de los agregados y del cemento hidráulico, que se puede emplear como componente del concreto o mortero y se agrega a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado, y que modifica algunas características del concreto.

Adsorción: Película de agua adherida en la superficie de los agregados, adicional al agua de absorción.

Agrietamiento por Contracción Plástica: Son grietas que ocurren en la superficie del concreto fresco inmediatamente después de su colocación y durante el estado plástico.

Agrietamiento por Contracción y Temperatura: Grietas falladas en tensión debido a una disminución en longitud o volumen causada por una reducción en el contenido de humedad.

Aire atrapado: Vacíos en el concreto que se crean de forma natural durante el proceso de mezclado.

Aire incluido: Burbujas de aire incorporadas intencionalmente en el mortero o concreto durante el mezclado, usualmente empleando un agente químico.

Álcali: Sales de los metales alcalinos, principalmente el sodio (Na) y el potasio (K), que se presentan en los constituyentes del concreto o mortero, principalmente en el cemento, que usualmente se expresa en análisis químico como el óxido de sodio (Na_2O) y óxido de potasio (K_2O).

Apisonar: La operación de acomodar el concreto fresco o un relleno con golpes repetidos en la superficie con la herramienta adecuada.

Arcilla: Material natural mineral compuesto por partículas muy finas principalmente silicato de aluminio hidratado y ocasionalmente silicato de magnesio hidratado, que posee propiedades plásticas.

Asentamiento: Desplazamiento vertical que presenta una edificación a causa de la consolidación del suelo sobre el que se desplanta.

Calor de hidratación: Calor causado por la reacción química del cemento con el agua.

Capilaridad: Es el movimiento de un líquido a través de un sistema poroso debido a tensión superficial.

Cemento Portland Puzolánico: Es el aglutinante hidráulico que se obtiene de la molienda conjunta del clinker, puzolana y sulfatos de calcio en algunas de sus formas.

Cemento Portland: Aglutinante hidráulico producido por la pulverización del clinker y sulfatos de calcio en algunas de sus formas.

Clinker: Es el material granular constituido principalmente por silicatos y aluminatos de calcio resultantes de la cocción a una temperatura del orden de 1400 °C y el enfriamiento posterior de materias primas de naturaleza calcárea y arcilla ferruginosa.

Colado: Colocación y consolidación del concreto fresco.

Concreto Celular: Concreto muy ligero que se logra por la adición de una espuma preparada o por generación de gas en mezclas no endurecidas.

Concreto Ciclópeo: Masa de concreto en la cual se colocan piedras grandes de 30 kg o más y se embeben en el concreto al tiempo que se deposita.

Concreto de Resistencia: Concreto capaz de alcanzar la resistencia especificada a la edad de 14 días, menor que el concreto normal.

Concreto Estructural: Concreto empleado para soportar esfuerzos y formar una parte integral de una estructura.

Concreto Lanzado: Mortero o concreto, neumáticamente proyectado a alta velocidad sobre una superficie.

Concreto Ligero: Concreto con masa unitaria menor de 1800 kg/cm².

Concreto Reforzado: Concreto que en combinación con el acero de refuerzo es capaz de resistir esfuerzos de compresión o tensión u otros esfuerzos.

Concreto Simple: Concreto sin acero de refuerzo.

Contracción por Secado: Reducción del volumen del estado plástico causada por la pérdida de agua.

Contracción: Disminución de volumen en el concreto o mortero causado por pérdida de agua, cambios químicos y temperatura a lo largo del tiempo.

Control de Calidad: Sistema de procedimientos y pruebas para mantener el rango de calidad deseado de un producto.

Corte de Sierra: Corte en el concreto endurecido utilizando discos con corona de diamante o de silicón-carburo.

Criba, Malla o Tamiz: Placa metálica o lámina, tela de alambre tejida u otro dispositivo similar, con espacios abiertos regulares de tamaño uniforme montados en un marco o soporte apropiado para usarse en la separación de materiales de acuerdo a su tamaño.

Escoria de Alto Horno: El producto está formado esencialmente por silicatos de aluminio, fierro y otras bases que se desarrollan en condición fundida simultáneamente con el fierro en un alto horno.

Esfuerzo: Magnitud de fuerzas internas por unidad de área producidas por cargas externas.

Espécimen: Parte representativa de un material que se emplea para determinar sus características.

Fibras Sintéticas: Son fabricadas por materiales llamados polímeros tales como polipropileno, nylon y polietileno telephthalate (PET).

Fisura: Abertura superficial del concreto que no tiene consecuencias estructurales.

Fisuramiento por Temperatura: Abertura debida a cambios térmicos.

Flujo Capilar: Flujo de la humedad a través de un sistema poroso capilar.

Fraguado: La condición alcanzada por una pasta de cemento, mortero o concreto cuando pierde plasticidad en un grado arbitrario, usualmente medida en términos de resistencia a la penetración o deformación; fraguado inicial referido al primer endurecimiento; fraguado final referido a la obtención de una rigidez significativa.

Granulometría: Distribución de partículas de un material granular en tamaños definidos expresadas en porcentaje.

Grava triturada: Producto que resulta de la fragmentación artificial de rocas.

Grieta: Abertura en el concreto de magnitud importante que puede ser el inicio de una falla estructural.

Laja: Son aquellas partículas planas y alargadas.

Módulo de elasticidad: Relación entre esfuerzo y deformación unitaria.

Muestra: Porción representativa de un material.

Muestreo: Es la acción o conjunto de acciones para obtener una muestra.

Núcleo o Corazón: Muestra cilíndrica de concreto endurecido o roca, extraída por medio de una broca hueca.

Número de criba o malla: Número usado para designar la abertura de una criba.

Pisón: Herramienta usada para consolidar por impacto en moldes o formas.

Porcentaje de Finos: Cantidad expresada en porcentaje que pasa por una criba dada, usualmente la criba No. 200; también la cantidad de material fino de una mezcla de concreto expresada como porcentaje de la masa de la cantidad total.

Porosidad: Porción usualmente expresada en porcentaje de volúmen de vacíos en un material al volúmen total del mismo, inducido al vacío.

Puzolana: Material sílico o sílice aluminoso que por sí solo posee un pequeño o ningún valor cementante, finamente dividido y en presencia de humedad, es químicamente reactivo con hidróxido de calcio (Ca_2OH), a temperatura ordinaria para formar compuestos que poseen propiedades cementantes.

Reacción Álcali-Agregado: Reacción entre los álcalis (potasio y sodio) del cemento Portland y ciertas rocas de origen sílico o carbonatadas presentes en algunos agregados, principalmente en la caliza dolomítica; la consecuencia de la reacción puede ser la expansión anormal.

Relación de aspecto: La relación entre la longitud de la fibra y su diámetro equivalente, que es el diámetro de un círculo con un área igual al área de la sección transversal de la fibra.

Resistencia a la Abrasión: La característica de una superficie a resistir el desgaste por roce o fricción.

Revenimiento: Es una medida de la consistencia del concreto fresco en término de la disminución de altura.

Rigidez: Resistencia a la deformación.

Sangrado: Flujo capilar de una parte del agua de mezclado hacia la superficie del concreto.

Segregación: Es la separación de los constituyentes del concreto, generalmente los agregados gruesos se precipitan, de modo que la distribución de los tamaños de partículas deje de ser uniforme.

Sobrevibrado: Exceso de tiempo de vibrado durante la colocación del concreto fresco, que causa segregación y sangrado.

Subestructura: Elementos estructurales que forman la cimentación.

Superestructura: Elementos estructurales (columnas, losas, trabes) que forman la estructura.

Troquel o Ademe: Estructura integrada por elementos de madera o metal, que unidos y acoplados entre sí contienen empujes de tierra.

Capítulo 9

Referencias Bibliográficas

- [1] Andrade et. al. *“Correlación entre ancho de grieta del recubrimiento del concreto y corrosión del refuerzo en elementos expuestos a un ambiente natural contaminado por cloruros”*. Revista Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC), vol. 1 núm. 2, disponible en: http://www.imcyc.com/ccid/pdf/ene-jun10_3.pdf, Junio 2010, páginas 30 a la 41.
- [2] García, José Luis. *“Manual Técnico de Construcción”*. Holcim Apasco, 3ª. Edición, Febrero 2006, 306 páginas.
- [3] Kosmatka, Steven H et. al. *“Diseño y Control de Mezclas de Concreto”*. Portland Cement Association, Skokie Illinois, EE.UU., 2004, 468 páginas.
- [4] Normatividad Mexicana NMX-C-11-ONNCCE. *“Agregados. Especificaciones”*.
- [5] American Society of Testing Materials (ASTM) E11. *“Standard Specification for Test Sieves”* (Especificación Estándar para Prueba de Tamices de Ensayo).
- [6] Catálogo de Productos CEMEX. Fecha de consulta: 30 de Julio de 2012. Disponible en: http://www.cemexcolombia.com/np/files/Concreto_CatalogoDeProductos.pdf.
- [7] CEMEX. Fecha de consulta: 30 de Julio de 2012. Disponible en: www.cemexmexico.com/Concretos.
- [8] Dr. Muciño, René. *“Concreto para Técnicos de la Construcción”*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC), 2003, página 50.
- [9] Fanella, David, et. al. *“Reinforced Concrete Structures: Analysis and Design”* (Estructura del Concreto Reforzado: Análisis y Diseño). Mc Graw Hill, Noviembre 2010.

[10] Cemento Moctezuma. *“Autoconstrucción/Tabla de Dosificación”*. Fecha de consulta 15 de Agosto 2012. Disponible en: <http://www.cmoctezuma.com.mx/dosifica.htm>.

[11] Norma Mexicana NMX-C-156-ONNCCE. *“Industria de la Construcción – Concreto – Concreto Hidráulico Industrializado – Especificaciones”*.

[12] National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA), *“CIP 24- Fibras Sintéticas para el Concreto”*. Fecha de Consulta 15 de Agosto de 2012. Disponible en: <http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP24es.pdf>.

[13] Revista Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC). *“Concreto Reforzado con Fibras. El Concreto en la Obra. Problemas, causas y soluciones”*. Sección 13, disponible en: <http://www.imcyc.com/ct2007/feb07/PROBLEMAS.pdf>, febrero 2007, páginas 67 a la 71.

[14] Pasaimper. *“Microfibra de Polipropileno para Concreto”*, 2012.

[15] Mendoza, et. al. *“Influencia de las Fibras de Polipropileno en las Propiedades del Concreto en Estado Plástico y Endurecido”*. Revista Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC), vol. 2 núm 2., disponible en: http://www.imcyc.com/ccid/pdf/ene-jun11_3.pdf, junio 2011, páginas 35 a la 47.

[16] Labib and Eden. *“An Investigation into the Use of Fibers in Concrete Industrial Ground-Floor-Slabs” (Investigación sobre el Uso de Fibras en Concreto Industriales en Losas de Planta Baja)*. School of the Built Environment, Liverpool John Moores University, Liverpool, L3 3AF, disponible en: http://asproject.ljmu.ac.uk/BLT/BUE_Docs/labib.pdf, 2004.

[17] EMCOR, *“BARCHIP EPC”*. Fecha de consulta 15 de Julio de 2012. <http://www.emcorsa/pdf/fibrapp.pdf>.

[18] MyPHor. *“MPH FIBER PLUS”*. Fecha de consulta 30 de Agosto 2012. Disponible en: http://www.myphor.com/archivos/ft_mph_fiber_plus.pdf.

[19] National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA), *“CIP 16 – Prueba de Resistencia a la Flexión del Concreto”*. Fecha de consulta 30 de Agosto 2012. Disponible en: <http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP16es.pdf>.

[20] Revista Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC). *“Determinación de la Resistencia a la Flexión del Concreto. El Concreto en la Obra. Problemas, causas y soluciones”*. Sección 16. Disponible en: <http://www.imcyc.com/ct2008/dic08/dic08/PDF/PROBLEMAS.pdf>. Diciembre 2008. Páginas 60 a la 63.

[21] NORMA ASTM C 78. *“Determinación del Esfuerzo a la Flexión del Concreto”*.

[22] National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA), *“CIP 35 – Prueba de Resistencia a la Compresión del Concreto”*. Fecha de Consulta: 30 de Agosto 2012. Disponible en: <http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP35es.pdf>.

[23] Revista Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC). *“Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cilindros de Concreto – Método de Prueba, segunda parte. El Concreto en la Obra. Problemas, causas y soluciones”*. Sección 16. Disponible en: <http://www.imcyc.com/ct2008/nov08/PROBLEMAS.pdf>. Noviembre 2008. Páginas 68 a la 71.

[24] Comité ACI 201. *“Guía para la Durabilidad del Hormigón”*. ACI-201.2R-01. Fecha de consulta 30 de Agosto de 2012. Disponible en: www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/ACI_201_2R_01.pdf.

[25] Ing. Sanjuan, Miguel y Dr. Castro, Pedro. *“Acción de los Agentes Químicos y Físicos sobre el Concreto”*. Revista Instituto Mexicano del Cemento y Concreto A.C. (IMCYC), 2001, 46 páginas.

[26] Al-Assadi, et. al. *“Evaluación del Deterioro del Hormigón Sometido a Ciclos Hielo – Deshielo”*. Anales de la Mecánica de la Fractura 26, vol. 2, 2009, páginas 472 a la 477.

[27] MACCAFERRI, *“Informe Técnico Fibras”*. Fecha de consulta 30 de Agosto de 2012. Disponible en: www.maccaferri.com.br/media/om_www/fibras_es.pdf, abril 2011, 8 páginas.

[28] ICC EVALUATION SERVICE. *“Acceptance Criteria for Concrete with Synthetic Fibers AC-32”*, 2010, 18 páginas.

[29] Norma Mexicana NMX-C-251-ONNCCE. *“Industria de la Construcción – Concreto – Terminología”*.