



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EFFECTO DE LA ADICIÓN DE FIBRAS SINTÉTICAS SOBRE
LAS PROPIEDADES PLÁSTICAS Y MECÁNICAS DEL
CONCRETO**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL – CONSTRUCCIÓN

P R E S E N T A :

DÁVILA MERCADO MARÍA PAULA



DIRECTOR DE TESIS: M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO

MÉXICO, D.F., MARZO 2010

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	M.I. Rodriguez Vega Miguel Angel
Secretario:	M.I. García Domínguez Octavio
Vocal:	M. I. Mendoza Escobedo Carlos Javier
1er. Suplente:	Ing. Cottier Caviedes Juan Luis
2do. Suplente:	Dr. Aire Untiveros Carlos Máximo

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

M.I. Carlos Javier Mendoza Escobedo

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mi tutor, M. I. Carlos Javier Mendoza, así como al Dr. Carlos Aire, por su apoyo constante para la realización, dedicación e interés que me prestaron durante todo el proceso de investigación de esta tesis, así como por su impulso para seguir preparándome profesionalmente.

A Raymundo, Agustín, Eddy, Salomón e Ismael, por todo el apoyo en el laboratorio, sin ellos no hubiera sido posible la realización de todas las pruebas y la conclusión de este trabajo experimental.

Agradezco a mi madre María Victoria y a mi hermana María del Mar, por ayudarme en mi desarrollo profesional y humano a lo largo de toda mi vida. Por brindarme su amor, cariño, confianza y comprensión y por estar siempre presentes dándome todo su apoyo.

A mi abuela Tulia que me brindó su cariño y cuidados hasta el último día.

A mis amigos, que son como mi familia, y que siempre han estado conmigo en todos los momentos, y me han apoyado a lo largo de mi vida.

A Maciel, por todo el apoyo en la realización del trabajo experimental, y por los momentos inolvidables, y cariño a lo largo de esta etapa.

A Mau, por su apoyo, todas las risas y gratos momentos.

A mis compañeros y amigos de la maestría. A Mauricio, Olivia y Felicitas por todo el apoyo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado, así como al Instituto de Ingeniería de la UNAM, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico que me brindó durante estos años.

CONTENIDO

Resumen.....	1
Introducción.....	2
Capítulo 1	3
1 Características del concreto reforzado con fibra	3
1.1 Breve reseña de los concretos reforzados con fibras	3
1.2 Propiedades físicas y mecánicas del concreto reforzado con fibras	5
1.2.1 Propiedades Físicas	5
1.2.1.1 Medios para evaluar la trabajabilidad del concreto fresco	6
1.2.2 Propiedades Mecánicas	9
1.2.2.1 Resistencia a compresión	9
1.2.2.2 Módulo de elasticidad y relación de Poisson	10
1.2.2.3 Resistencia a tensión por compresión diametral	10
1.2.2.4 Esfuerzo de flexión	11
1.2.2.5 Resistencia al impacto	12
1.3 Usos del concreto con fibras	12
Capítulo 2	14
2 Tipos de fibras sintéticas	14
2.1 Descripción de los tipos de fibras sintéticas	14
2.1.1 Fibras de polipropileno	14
2.1.2 Fibras de nylon	16
2.1.3 Fibras de polietileno	16
2.1.4 Fibras de vidrio	16
2.1.5 Fibras de poliéster	17
2.1.6 Fibras de carbón	17
Capítulo 3	19
3 Características de los materiales componentes de las mezclas	19
3.1 Caracterización de los agregados	19

3.1.1 Composición granulométrica	21
3.1.1.1 Arena Andesítica	21
3.1.1.2 Grava Caliza	23
3.1.2 Peso específico	25
3.1.3 Porosidad y absorción	25
3.1.4 Peso volumétrico	26
3.2 Cemento	27
3.3 Aditivo	27
3.4 Fibra polimérica	28
Capítulo 4	29
4 Diseño de mezclas, mezclado, manejo y compactación del concreto reforzado con fibras	29
4.1 Diseño de Mezclas	29
4.1.1 Diseño de la Mezcla con Fibras Sintéticas	30
4.1.1.1 Proporcionamiento de la mezcla con agregado de 19 mm (3/4")	30
4.1.1.2 Proporcionamiento de la mezcla con agregado de 9.5 mm (3/8")	35
4.2 Mezclado	35
4.3 Colocación	37
4.4 Acabado	37
Capítulo 5	39
5 Ensayos a Realizar	39
5.1 Variables a considerar	39
5.2 Concreto en estado fresco	39
5.2.1 Revenimiento.....	39
5.2.2 Contenido de aire y peso unitario	40
5.2.3 Resistencia al agrietamiento por contracción plástica	41
5.3 Concreto en estado endurecido	43
5.3.1 Resistencia a compresión	43
5.3.2 Módulo elástico y relación de Poisson	44
5.3.3 Resistencia a tensión por compresión diametral	44
5.3.4 Resistencia a flexión y tenacidad	45
5.3.5 Resistencia al impacto	47
5.3.6 Contracción por secado	49

Capítulo 6	52
6 Resultados y Discusión	52
6.1 Propiedades en estado fresco	52
6.1.1 Contracción Plástica	53
6.2 Propiedades en estado endurecido	55
6.2.1 Resistencia a compresión	55
6.2.2 Módulo elástico y relación de Poisson	58
6.2.3 Resistencia a tensión por flexión	59
6.2.4 Resistencia a tensión por compresión diametral	60
6.2.5 Resistencia al impacto	62
6.2.6 Tenacidad	65
6.2.7 Contracción por secado	67
 Conclusiones	 70
 Referencias	 71
 7 Anexos	 73
Anexo 1: Pruebas granulométricas de la arena andesítica sin lavar	73
Anexo 2: Pruebas granulométricas de la arena andesítica lavada	76
Anexo 3: Prueba de pérdida por lavado (malla 200) para la arena andesítica de 2 y 3 lavadas	80
Anexo 4: Pruebas granulométricas de la grava caliza de 3/4" y 3/8"	81
Anexo 5: Pruebas de densidad y absorción para la arena y la grava	85
Anexo 6: Pruebas de peso volumétrico de la arena y la grava	85
Anexo 7: Ancho y longitud de grieta por contracción plástica	86
Anexo 8: Resistencia a compresión de todas las mezclas	92
Anexo 9: Módulo de elástico y relación de Poisson de las mezclas	95
Anexo 10: Resistencia a tensión por flexión	97
Anexo 11: Resistencia a compresión diametral de todas las mezclas	99
Anexo 12: Resistencia al impacto de las mezclas	101

RESUMEN

En este trabajo se lleva a cabo la evaluación de los resultados de un estudio experimental, realizado en el laboratorio de materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM, donde se evalúa el comportamiento de la adición de una fibra sintética en la fabricación de concreto.

El estudio comprende la fabricación de mezclas de concreto con dos tamaños de agregado grueso, 3/4" y 3/8". En cada caso se fabricaron cuatro mezclas incorporando 0, 1, 3 y 5 kg/m³ de una fibra sintética de tipo monofilamento no fibrilada. Los parámetros para el diseño de mezclas fueron el revenimiento de 10 cm y una resistencia a compresión a 28 días de 300 kg/cm² para el concreto sin fibra. En el caso de las mezclas con fibra sintética, se mantuvo el diseño de mezclas del concreto de referencia, más la adición de la fibra y en algunos casos se añadió un aditivo superplastificante para mantener el revenimiento en el rango deseado.

Se determinaron las propiedades en estado plástico de revenimiento, peso unitario, contracción plástica y contenido de aire, así como las propiedades mecánicas de resistencia a compresión, a tensión, a flexión, al impacto, el módulo elástico, la contracción por secado y la tenacidad.

INTRODUCCIÓN

En años recientes, las fibras sintéticas, y en particular las fibras de polipropileno han ganado popularidad para su uso en el concreto, principalmente para mejorar la resistencia al agrietamiento por contracción plástica y la tenacidad del concreto simple. Las fibras sintéticas se fabrican de materiales tales como acrílico, aramida, carbón, nylon, polyester, polietileno o polipropileno. En general, las fibras sintéticas se caracterizan por tener elevada resistencia a la tensión, pero pueden diferenciarse dos categorías, las de alto y bajo módulo elástico.

La principal ventaja de la adición de fibras sintéticas en el concreto es el incremento de la tenacidad y de la resistencia al impacto, en el estado endurecido y el control de la contracción plástica, en estado fresco. Adicionalmente, controla la aparición de fisuras durante la vida útil del elemento y brinda mayor resistencia a la fatiga. Con un adecuado diseño puede reemplazar el uso de las tradicionales mallas electrosoldadas o fibras de acero, lo que puede implicar un ahorro en el costo de la mano de obra de una construcción.

Durante los últimos años se han realizado diversos estudios para evaluar las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de polipropileno; en los que el porcentaje de fibras ha variado entre 0.1 % y 10% del volumen. Algunos de estos resultados son contradictorios respecto a los efectos de las fibras de polipropileno sobre la resistencia a compresión y resistencia a flexión del concreto (Alhozaimy A., 1996). Algunos estudios indican que la presencia de las fibras tiene efectos negativos sobre la resistencia a compresión, aunque se alcanza ligeros incrementos en la resistencia a flexión, cuando se incrementa el contenido de fibra (Hughes, 1976). Sin embargo, otros estudios reportan efectos favorables de la adición de la fibra sobre la tenacidad (Malisch W., 1986) (Kraii P., 1985), e incrementos en la resistencia a compresión del orden de 25% empleando 0.5% de fibras de polipropileno (Mindness S. y Vondran G, 1988).

Este trabajo presenta los resultados de un estudio experimental para evaluar el comportamiento de la adición de una de fibra sintética en la fabricación de concreto. Se empleó cemento Portland ordinario, arena andesítica, grava caliza, una fibra sintética y un superplastificante de nueva generación. Se determinaron sus propiedades en estado fresco, de revenimiento, peso unitario, contenido de aire, contracción plástica, y en estado endurecido de resistencia a compresión, módulo elástico, resistencia a flexión, a tensión por compresión diametral, contracción por secado, tenacidad y resistencia al impacto.

CAPÍTULO 1

1 CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRA

1.1 BREVE RESEÑA DE LOS CONCRETOS REFORZADOS CON FIBRAS

Los materiales de construcción también tienen sus ciclos vitales: nacen, se desarrollan y acaban desapareciendo. Las razones por las cuales van sucediendo las distintas etapas son muy diversas, pero fundamentalmente se pueden reducir a un origen común: la exigencia que a la técnica se le plantea de satisfacer las necesidades que van surgiendo con carácter cambiante en la vida del hombre. Ello determina la aparición de nuevos materiales y su difusión más o menos rápida, así como su desaparición, o sustitución, cuando esos materiales han quedado obsoletos, incapaces de responder a las nuevas necesidades para las que son requeridos.

Los avances tecnológicos han permitido el diseño y producción de nuevos materiales sintéticos con características específicas. Estos desarrollos logran que en la actualidad, existan materiales diseñados para cumplir funciones que antes eran reservadas exclusivamente para los materiales tradicionales, o que materiales como el concreto mejoren sus cualidades.

Aunque se considera un material moderno, las fibras se han utilizado históricamente para reforzar materiales frágiles: la paja, para los ladrillos de arcilla cocidos al sol; el pelo de caballo, para las molduras de yeso; el asbesto (hoy prohibido), para prefabricados de cemento (ACI544.1R, 1996).

Las fibras en la construcción se han venido usando desde hace muchos años. Existen innumerables evidencias arqueológicas que dan fe de que en Babilonia y en Egipto las fibras vegetales se combinaron con mezclas de arcilla para fabricar elementos estructurales. Sin embargo, con el paso del tiempo esta técnica cayó en desuso, hasta que a principios del siglo XX se retomó, primero con un enfoque empírico y más tarde con fines de investigación.

El desarrollo y uso de las fibras en matrices cementicias surge a finales del siglo XIX, cuando el asbesto-cemento fue producido por primera vez. En 1960 se incorporaron las fibras metálicas - las de acero principalmente - y las de vidrio para fabricar un concreto con fibras discontinuas y distribuidas aleatoriamente. Sin embargo, no fue sino hasta 1971 cuando en Estados Unidos se hicieron los primeros estudios e investigaciones dirigidos al uso del concreto fabricado con fibras, las que desde entonces han sido elementos indispensables en la construcción de pisos industriales de alto desempeño, pavimentos, cubiertas para puentes, concretos lanzados para la estabilización de taludes, revestimientos de túneles, elementos estructurales prefabricados, bóvedas y refractarios, entre otros usos (Jonhston, 1994).

La incorporación de materiales novedosos y tecnología de punta, han llevado al diseño de estructuras que hace algunos años parecían inimaginables. Esta nueva tecnología ha sido utilizada por la industria de la construcción estadounidense con éxito, para sustituir la malla electrosoldada y la fibra de acero en muy variadas aplicaciones.

El uso de concreto reforzado con fibra (CRF) ha pasado de experimentación de pequeña escala a aplicaciones de rutina en fábrica y en campo, que incluye la colocación de los muchos cientos de miles de metros cúbicos cada año en todo el mundo (ACI544.2R, 1989).

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

El concreto hecho con cemento Portland tiene ciertas características: es relativamente resistente en compresión pero débil en tensión y tiende a ser frágil. La debilidad en tensión puede ser superada por el uso de refuerzo convencional de varilla y, en cierta medida, por la inclusión de un volumen suficiente de ciertas fibras. En la práctica actual de la construcción, fibras discontinuas se añaden a las matrices de cemento en fracciones de volumen relativamente bajo (generalmente < 2,0%), principalmente para mejorar la dureza y el agrietamiento. Las dosificaciones utilizadas en el concreto reforzado con fibras sintéticas varía de 2.1 kg a 6.3 kg por metro cúbico, representando un ahorro considerable, tanto por el costo de las mismas como por la disminución del rebote del concreto lanzado y, por consiguiente, de desperdicio (IMCYC, "Premezclados: Concreto con fibras", 2008).

Al agregar fibras al concreto se incrementa en forma importante la tenacidad del material; es decir, el concreto reforzado con fibras es capaz de soportar cargas bajo flexión o deformaciones mucho mayores que aquellas a las cuales aparece el primer agrietamiento en la matriz.

Con el uso de las fibras el profesional de la construcción ahorra tiempo y dinero al eliminar la instalación de la malla electrosoldada, lo que implica una inversión elevada a consecuencia del alto costo de la mano de obra. Además de reemplazar magníficamente al acero requerido por cambios volumétricos, las fibras controlan la contracción plástica mediante la creación de una adherencia mecánica con la matriz cementicia.

La industria del concreto premezclado está cada vez mas acostumbrada a adoptar nuevas tecnologías en materia de aditivos y adiciones con fines de mejorar la calidad del concreto y brindarle características acordes con los diseños estructurales cada vez más exigentes. A nivel mundial, la tendencia es proveer concretos con un valor agregado para el contratista. Que este reciba una solución que le permita ahorrar

tiempo y dinero o realizar sus obras con mayor seguridad, siendo las empresas concreteras las que capitalicen este ahorro.

1.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS

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

La norma ASTM C 1116, que trata sobre Terminología para Cemento y Concreto, define las fibras como: "Filamentos finos y elongados en forma de haz, malla o trenza, de algún material natural o manufacturado que pueda ser distribuido a través de una mezcla de concreto fresco." El ACI 544 considera como fibras para el concreto los filamentos discontinuos de acero, las fibras sintéticas, las de vidrio y las naturales (ACI544.2R, 1989).

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

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

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

1.2.1 Propiedades Físicas

Dentro de estas propiedades se puede mencionar la trabajabilidad del concreto, que de acuerdo con el ACI 116 (ACI116, 1990), es aquella propiedad del concreto recién mezclado que determina la facilidad y homogeneidad con que puede ser mezclado, transportado, colocado, compactado y acabado.

La homogeneidad y uniformidad, la consistencia, la estabilidad y la compacidad en conjunto se complementan para ofrecer una perspectiva global de su trabajabilidad (CFE, 1994).

1.2.1.1 Medios para evaluar la trabajabilidad del concreto fresco

1.2.1.1.1 Homogeneidad y uniformidad

La homogeneidad es una condición necesaria para que una mezcla de concreto pueda considerarse trabajable, en el curso de todas las operaciones en las que sea sometida. Si el concreto no llega homogéneo al sitio de la colocación, se puede atribuir con certeza a que presenta una deficiencia de trabajabilidad en la mezcla, por lo que debe de corregirse.

La verificación de la uniformidad del concreto, de revoltura a revoltura, es un instrumento fundamental para el control de la calidad durante la producción y uso del concreto.

Las pruebas más comunes para evaluar estas características son el revenimiento con la norma ASTM C 143, el peso unitario con la norma ASTM C 138, contenido de de aire con la norma ASTM C 231 y la contracción plástica con las recomendaciones del ACI 544.2R-89.

La falta de homogeneidad de la mezcla de concreto se debe a:

1. El sistema de carga, el orden y rapidez con que se introducen los ingredientes
2. El tiempo de mezclado
3. El volumen de materiales para fabricación en relación a la capacidad del equipo
4. El sistema y condiciones de descarga del concreto de la revolvedora
5. Las características del equipo para fabricación del concreto
6. El procedimiento de muestreo y prueba del concreto

1.2.1.1.2 Consistencia (cohesión y viscosidad)

El ACI 116 (ACI116, 1990) identifica la consistencia del concreto recién mezclado con su relativa movilidad para fluir, y admite que la manera más usual para evaluarla es por medio de la prueba del revenimiento. La prueba de revenimiento, es un ensaye prácticamente estático en el que la muestra de concreto se deforma exclusivamente por efecto de la reducida energía potencial de la propia muestra. Por tal motivo no se espera su uso en mezclas de concreto duras, y sólo resulta aplicable en mezclas que requieren poco esfuerzo para deformarse y comenzar a fluir, tales como las de consistencia semi-plástica en adelante.

La cohesión se representa por la resistencia que la mezcla opone para deformarse e iniciar el flujo. Lo deseable es que las mezclas de concreto fluyan con facilidad, pero permaneciendo homogéneas.

El tipo de concreto y la consistencia con que deben elaborarse las mezclas, normalmente se definen de acuerdo con las características de la estructura, o elemento de concreto por colar, y las condiciones de exposición y servicio. Una vez hecha esa definición, deben seleccionarse los equipos y procedimientos adecuados para mezclar, conducir, colocar y compactar satisfactoriamente y sin segregación el concreto.

La prueba estándar de revenimiento (ASTM C 143) utiliza un molde troncocónico, cuyo volumen es de aproximadamente 6 litros. La prueba consiste en llenar el molde en 3 capas con concreto, cada capa consolidada por 25 golpes con una varilla de 16 mm de diámetro y 60 cm de longitud y de punta hemisférica; y retirar el molde verticalmente a fin de permitir que la masa de concreto se asiente, siendo la magnitud de este asentamiento la medida de la consistencia de la mezcla. En la Figura 1.1 se muestra un esquema de la prueba de revenimiento.

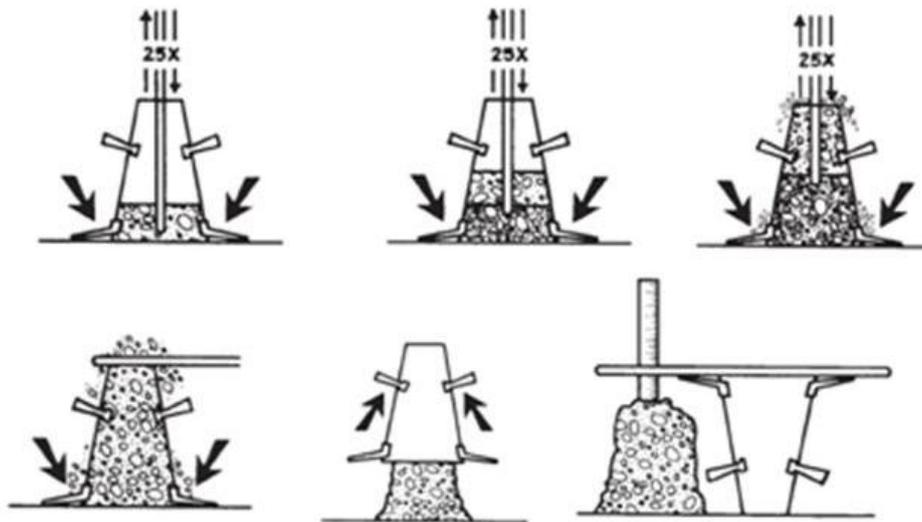


Figura 1.1 Prueba de revenimiento

1.2.1.1.3 Estabilidad (segregación y sangrado)

Se considera que una mezcla de concreto se comporta como una suspensión estable, en la medida que se opone a perder su homogeneidad original en el lapso comprendido desde que abandona la revolvedora hasta que adquiere el fraguado en su posición final, ya colocada dentro de la estructura.

En una mezcla de concreto como suspensión estable, es posible considerar que puede llegar a perder homogeneidad por dos razones: la pérdida obedece a factores de índole interna y la que se produce como consecuencia de acciones externas. En el primer caso la homogeneidad se manifiesta por los fenómenos de asentamiento y sangrado, y el segundo caso es la separación parcial del agregado, la cual es conocida como segregación de la grava.

El fenómeno de segregación representa el estado opuesto de la homogeneidad y suele reservarse para el caso en que una parte de la grava se separe ostensiblemente de la masa de concreto originalmente homogénea.

El tamaño máximo de la grava juega un papel muy importante en la tendencia a la segregación de las mezclas de concreto, pues el riesgo de que las gravas segreguen se incrementa considerablemente al aumentar su tamaño y su correspondiente masa, lo cual es aún más crítico cuando el peso específico de la grava es alto.

El sangrado del concreto es un hecho natural y se considera que un sangrado moderado no resulta perjudicial al concreto si se manifiesta en forma normal. Un sangrado puede ser de cierta utilidad en estructuras con gran superficie expuesta, pues evita el resecamiento superficial del concreto y su posible agrietamiento por contracción plástica, antes de que se realicen las operaciones de acabado y de curado.

1.2.1.1.4 Compacidad

El ACI 116 (ACI116, 1990), define la compactación como el proceso según el cual un volumen de concreto recién colado se reduce al espacio mínimo, por medio de vibración, centrifugación, apisonamiento, o una combinación de estas acciones, para moldearlo dentro de las cimbras y alrededor del acero de refuerzo y de otras partes embebidas, y para eliminar las burbujas del aire atrapado pero no las del aire incluido intencionalmente.

Una alta compacidad, conduce a un alto peso unitario del concreto. Éste, depende en buena medida de la calidad y cantidad de los materiales que integran el concreto, lo cual depende a su vez de la densidad del material.

Si se desea que un concreto sea compacto, denso, homogéneo, resistente y durable, se requerirá de:

- El empleo de un cementante de buena calidad y la aplicación de bajas relaciones agua/cementante.
- El uso de agregados densos, poco porosos y bien graduados.
- Usar un bajo contenido de agua de mezclado, lo que se logra empleando aditivos reductores de agua.
- Un adecuado manejo, colocación y compactación del concreto dentro de la cimbra.
- Un cuidadoso retiro de la cimbra y aplicación correcta del curado después del fraguado final.

1.2.2 Propiedades Mecánicas

La resistencia mecánica que potencialmente puede desarrollar el concreto depende de la resistencia individual de los agregados y de la pasta de cemento

endurecida, y de la adherencia que se produce entre ambos materiales. La proporción de vacíos en el concreto endurecido tiene un efecto decisivo en su resistencia mecánica.

Las propiedades mecánicas se clasifican en:

Propiedades instantáneas o de corta duración:

Resistencia a compresión (ASTM C 39)

Módulo de elasticidad y relación de Poisson (ASTM C 469).

Resistencia a tensión por compresión diametral (ASTM C 496)

Esfuerzo de flexión (ASTM C 78)

Resistencia al Impacto (ACI 544.2R)

Propiedades de larga duración:

Contracción por Secado (ASTM C 157)

1.2.2.1 Resistencia a compresión

Las fibras poliméricas en bajas fracciones de volumen (alrededor de 0,1% en el volumen que se suelen utilizar en la construcción) no tienen ningún efecto medible sobre la resistencia a la compresión. (Banthia, 1994)

La resistencia mecánica del concreto frecuentemente se identifica con su resistencia a compresión, porque ésta representa la condición de carga en que el concreto exhibe mayor capacidad para soportar esfuerzos, de modo que la mayoría de las veces los elementos estructurales se diseñan con el fin de utilizar esta propiedad del concreto.

La calidad del concreto endurecido se verifica mediante pruebas de resistencia a compresión realizadas en cilindros fabricados, curados y probados de acuerdo con las normas (ASTM C 192 y C 39).

Es evidente entonces, que no hay ninguna razón de utilizar las fibras para tratar de aumentar la resistencia a la compresión del concreto. Sin embargo, las fibras conducen a grandes aumentos en la tenacidad del concreto (medida como el área bajo la curva esfuerzo vs deformación), es decir, las fibras tienden a aumentar la deformación a la carga, y proporcionan una gran cantidad de absorción de energía en la región después de los picos de la curva esfuerzo vs deformación. La presencia de fibras altera el modo de falla de los cilindros haciendo que el concreto sea menos frágil, presentando una falla tipo dúctil.

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

1.2.2.2 Módulo de elasticidad y relación de Poisson

Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad, denotado por medio del símbolo E, es la razón entre el incremento de esfuerzo y el cambio correspondiente a la deformación unitaria. Si el esfuerzo es una tensión o una compresión tiene el mismo valor, siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda de un valor máximo denominado límite elástico, el cual se encuentra aproximadamente en el 40% del esfuerzo máximo. Tanto el módulo de elasticidad como el límite elástico, son naturalmente distintos para diferentes materiales. El hecho de que la variación de deformación unitaria sea directamente proporcional a la variación del esfuerzo, siempre que no se sobrepase el límite elástico, se conoce como ley de Hooke.

El módulo de elasticidad del concreto puede variar en función de diversos factores tales como el estado de humedad y de compactación del concreto, la relación agua-cemento y edad de la pasta y las características de los agregados principalmente.

Relación de Poisson

Cuando al concreto se le comprime en una dirección, al igual que ocurre con otros materiales, éste se expande en la dirección transversal a la del esfuerzo aplicado. La proporción en que el espécimen se deforma transversalmente con respecto a lo que se deforma longitudinalmente se conoce como la relación de Poisson. La relación de Poisson varía de 0.11 a 0.27 para concreto convencional.

1.2.2.3 Resistencia a tensión por compresión diametral

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

Al diseñar las estructuras se procura que el concreto no trabaje a tensión directa; sin embargo, casi siempre es inevitable que el concreto en la estructura deba soportar ciertos esfuerzos a tensión, ya sea como consecuencia de determinadas condiciones de carga que involucran flexión y cortante, o como resultado de las contracciones que se producen en el concreto por secado o por temperatura.

La determinación de la resistencia a tensión del concreto por este procedimiento es relativamente sencilla y rápida, y sus resultados suelen mostrar una aceptable uniformidad. El procedimiento se encuentra reglamentado como prueba estándar en la norma ASTM C 496.

1.2.2.4 Esfuerzo de flexión

La influencia de las fibras en el esfuerzo de flexión del concreto y mortero es mucho mayor que para la resistencia a compresión y resistencia a tensión (Hughes, 1976). Dos valores de esfuerzo a flexión son comúnmente reportados. Uno, denominado primera grieta a flexión, el cual corresponde a la carga para la que la curva esfuerzo-deformación se aparte de la linealidad. El otro corresponde a la máxima carga soportada, comúnmente llamado módulo de ruptura, como se observa en la Figura 1.2.

La tensión por flexión se lleva a cabo mediante pruebas en especímenes prismáticos, ensayados opcionalmente con una carga concentrada en el centro del claro, o con dos cargas concentradas iguales aplicadas en los tercios del claro.

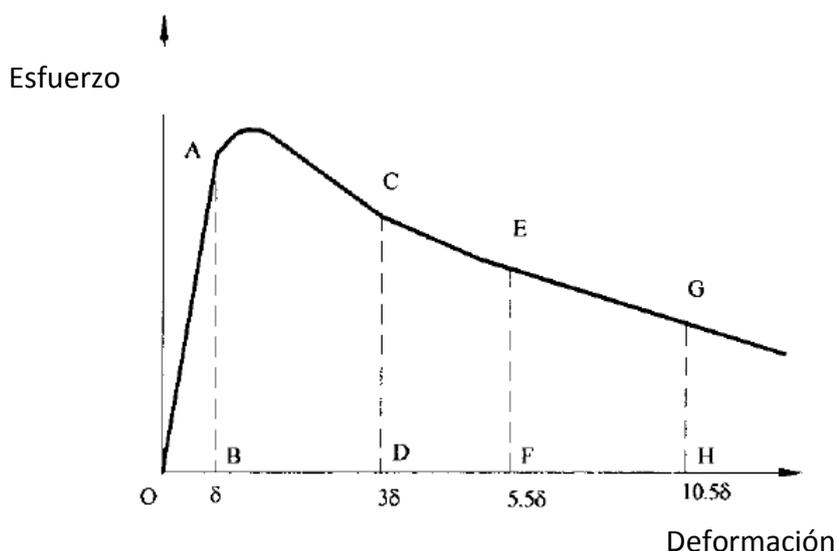


Figura 1.2 Puntos importantes de la curva esfuerzo – deformación de acuerdo con la norma ASTM C1018

1.2.2.5 Resistencia al impacto

Los concretos reforzados con fibras tienen elevada resistencia al impacto, a la acción de cargas explosivas y en general a esfuerzos dinámicos de tensión y compresión.

Después del impacto, las piezas no se desintegran totalmente, como ocurre en el concreto convencional, sino que las fibras mantienen unidos los trozos, evitando posteriores daños por derrumbe de aquellos, conservándose la integridad de la pieza.

La elevada resistencia dinámica de los concretos reforzados con fibras tienen su complemento en una gran capacidad de absorción de energía. En efecto, hay que consumir elevada cantidad de trabajo para arrancar las fibras del seno de la matriz del

concreto, y además los alargamientos de las fibras pueden ser proporcionalmente muy grandes, con lo cual la energía consumida se incrementa notablemente.

1.3 USOS DEL CONCRETO CON FIBRAS

Las fibras se han utilizado convencionalmente como mallas para la estabilización y protección de suelos. Los geosintéticos cumplen labores de refuerzo y abaratan las soluciones tradicionales de la ingeniería civil, pero el escaso desarrollo en la experimentación de otros usos para estos materiales ha ocasionado que las aplicaciones en vivienda, infraestructuras urbanas y otras construcciones de importancia para las comunidades iberoamericanas aún no estén reglamentadas.

La adición de fibras al concreto permite que estructuras sin altas exigencias de cargas puedan hacerse más delgadas de las que usualmente se requieren. Gran número de elementos convencionales prefabricados, necesitan de refuerzo solamente durante el estibaje, manipuleo y transporte, aunque posteriormente no sean sometidos a solicitaciones significativas en su lugar de emplazamiento. Además de las dificultades de instalación, el acero necesita una capa suficiente de concreto sobre él mismo para evitar su posible oxidación y corrosión, y la aparición de manchas posteriores de óxido en las superficies. La utilidad del refuerzo de acero durante la vida de la pieza es prácticamente nula.

Para el uso efectivo de fibras en el concreto endurecido se deben tener contempladas las siguientes características (IMCYC, "El concreto en la obra: Problemas, causas y soluciones", 2007):

- Las fibras deben ser significativamente más rígidas que la matriz, es decir, tener un módulo de elasticidad más alto.
- El contenido de fibras por volumen debe ser adecuado.
- Debe haber una buena adherencia entre la fibra y la matriz.
- La longitud de las fibras debe ser suficiente.
- Las fibras deben tener una alta relación de aspecto; es decir, deben ser largas con relación a su diámetro.

Las fibras deben ser utilizadas para:

- La reducción de la fisuración del concreto provocado por la contracción plástica.
- Un sistema alternativo de refuerzo no estructural, secundario y/o por temperatura.
- Una mayor resistencia del concreto al impacto, a la abrasión y a la rotura.
- Soporte interno y cohesividad, concreto vaciado en inclinaciones abruptas, concreto lanzado, y en formaleas (cimbras) deslizantes.
- La reducción del agrietamiento del concreto como resultado de la contracción plástica.
- Ayudar a disminuir la permeabilidad del concreto.

- Vaciados donde se requieran materiales no metálicos.
- Áreas que requieran materiales a prueba de álcalis así como resistentes a sustancias químicas.

Las fibras no deben ser utilizadas para:

- El control de la fisuración como resultado de fuerzas externas
- Desarrollo de más altas resistencias estructurales.
- Reemplazo de cualquier refuerzo estructural de acero o resistente a momentos.
- Disminución del espesor de las losas sobre el suelo.
- Justificar la reducción de alabeos (pandeos) y/o torsiones
- La disminución del tamaño de las columnas de soporte.
- La disminución del espesor de secciones de capas superiores (recubrimientos) adheridas o no adheridas.

El concreto reforzado con fibras se usa frecuentemente en losas de techo, entrepisos, recubrimientos, prefabricados en general, pavimentos, pisos industriales, piscinas, paredes de tanques, estructuras hidráulicas y marinas, zapatas y tuberías de concreto.

CAPÍTULO 2

1 TIPOS DE FIBRAS SINTÉTICAS

Las fibras sintéticas son artificiales; resultan de la investigación y desarrollo de las industrias petroquímicas y textil. Existen dos formas físicas diferentes de fibras: la de monofilamentos, y las producidas de cintas de fibrilla.

En los últimos cuarenta años han salido al mercado una gran variedad de fibras sintéticas entre las que se pueden mencionar las fibras acrílicas, de carbono, de poliéster, de vidrio, de polietileno, de nylon, de polipropileno, entre otras, siendo las dos últimas fibras aquéllas de mayor desarrollo, pues han permitido mejorar, a un costo razonable, algunas propiedades de morteros y concretos y han facilitado la creación de nuevos materiales de construcción (Laning, 1992).

1.1 DESCRIPCIÓN DE LOS TIPOS DE FIBRAS SINTÉTICAS

1.1.1 Fibras de polipropileno

Las fibras de polipropileno fueron usadas por primera vez en los años sesentas. El polipropileno es un polímero de hidrocarburo sintético cuya fibra está hecha usando procesos de extrusión por medio de estiramiento en caliente del material a través de un troquel. Es producida como monofilamento de sección circular como se puede ver en la Figura 1.1, y se corta según la longitud requerida. Esta fibra es manufacturada también fibrilada o como cinta de sección rectangular (ACI544.1R, 1996).

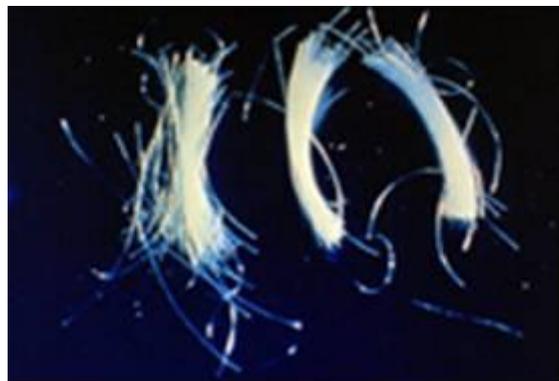


Figura 1.1 Fibras de polipropileno

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

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

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

Las propiedades físicas de las fibras utilizadas son:

Material: 100 % de polipropileno virgen

Capacidad de tensión: $0.67 \text{ kN} / \text{mm}^2$

Módulo (Young): $4.0 \text{ kN} / \text{mm}^2$

Punto de fusión: 165° C

Punto de fundición: 590° C

Resistencia química: excelente

Resistencia a la oxidación: excelente

Absorción: nula

Longitud de la fibra: 19 mm

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

Este tipo de fibras se aplica, principalmente, en la construcción de túneles y taludes como refuerzo secundario permitiendo eliminar el uso de mallas, ya que el concreto lanzado con fibras puede seguir la curvatura irregular de una excavación sin que queden espacios vacíos o sombras, como sí ocurre al utilizar mallas produciendo oxidaciones en ellas y como consecuencia grietas en el concreto lanzado, como se puede observar en la Figura 1.2.



Figura 1.2 Aplicación de Concreto lanzado con fibras y sin fibras en túneles

1.1.2 Fibras de nylon

Es el nombre genérico que identifica una familia de polímeros. Las propiedades de las fibras de nylon son impartidas por el tipo de polímero base, la adición de diferentes niveles de aditivos, las condiciones de fabricación y las dimensiones de las fibras.

Actualmente se comercializan para el concreto sólo dos tipos de fibras de nylon. El nylon es estable en el calor, hidrófilo, relativamente inerte y resistente a una gran variedad de materiales. Es particularmente efectivo para impartir resistencia al impacto y tenacidad a flexión y para sostener e incrementar la capacidad de carga después de la primera grieta del concreto.

1.1.3 Fibras de polietileno

El polietileno ha sido producido para el concreto en forma de monofilamentos con deformaciones superficiales parecidas a verrugas. El polietileno en forma de pulpa puede ser una alternativa a las fibras de asbesto. El concreto reforzado con fibras de polietileno a contenidos de entre 2 y 4% por volumen exhibe un comportamiento de flexión lineal bajo cargas de flexión hasta la primera grieta, seguido por una transferencia de carga aparente a las fibras, permitiendo un incremento en la carga hasta que las fibras se rompen.

1.1.4 Fibras de vidrio

La fibra de vidrio es un tipo de fibra vítrea sintética (synthetic vitreous fiber o SVF, por sus siglas en inglés). Y presenta problemas cuando está en contacto con ácidos fluorhídrico y fosfórico, y con los álcalis fuertes (ejemplo: sosa cáustica, removedores de pinturas alcalinos, productos de cemento) los cuales atacan al vidrio; también presenta deterioro por la acción prolongada del agua.

Dado lo anterior, se descubrió que las fibras de vidrio en la forma en que se usaron primero eran reactivas a álcalis, y los productos en los que eran usados se deterioraban rápidamente. El vidrio resistente a los álcalis con un contenido de 16% de circona fue formulado exitosamente entre 1960 y 1971. Otras fuentes de vidrio resistentes a álcalis fueron desarrolladas durante los años setentas y ochentas, con contenidos más altos de circona. La fibra de vidrio resistente a los álcalis se usa en la fabricación de productos de cemento reforzado con vidrio (GRC: glass reinforced concrete), los cuales tienen un amplio rango de aplicaciones.

Los productos de fibra de vidrio expuestos a la intemperie han mostrado una pérdida de resistencia y ductilidad. Las razones para esto no son claras y se especula que el ataque de los álcalis o la fragilidad de las fibras son las causas posibles. Debido a la falta de datos sobre la durabilidad a largo plazo, el GRC ha sido confinado a usos no estructurales en donde tiene amplias aplicaciones.

Aplicación: La Fibra de vidrio, junto con otros materiales tales como el cemento, poliéster y resinas epóxicas, sirven para crear techos ligero o paneles de paredes de cerramiento parasoles, cisternas y otros elementos de cualquier forma deseada.

Además es adecuado para usarse en técnicas de rociado directo y procesos de premezclado; ha sido usado como reemplazo para fibras de asbesto en hojas planas, tubos y en una variedad de productos prefabricados.

1.1.5 Fibras de poliéster

Las fibras de poliéster están disponibles en forma de monofilamentos y pertenecen al grupo de poliéster termoplástico. Son sensibles a la temperatura, por lo que sus propiedades pueden ser alteradas a temperaturas por encima del servicio normal. Las fibras de poliéster son algo hidrófobas. Se han usado a bajos contenidos (0.1% por volumen) para controlar el agrietamiento por contracción plástica del concreto.

1.1.6 Fibras de carbón

Las fibras de carbón son sustancialmente más costosas que los otros tipos de fibras. Por esta razón su uso comercial ha sido limitado. Las fibras de carbón son fabricadas carbonizando materiales orgánicos adecuados en forma fibrosa a altas temperaturas y luego alineando los cristales de grafito resultantes por medio de estiramiento.

Tienen alta resistencia a tensión y alto módulo de elasticidad y una característica quebradiza bajo esfuerzo de deformación. En la Tabla 1.1 se pueden observar estas características.

Las fibras de carbono se han usado desde ya hace varios años en la industria de la aeronáutica y espacial como material idóneo por su bajo peso y alta resistencia. Fue hasta 1990 cuando los costos de producción de estos materiales permitieron su empleo en otros sectores de la industria como es el de la construcción. Se observó que este tipo de materiales aporta grandes beneficios al incrementar las características de resistencia y de deformación de elementos de concreto reforzado. Las fibras de carbono pueden ser rígidas o flexibles y vienen en dos presentaciones generalmente: en forma de tejidos (el 95 y 98% de las fibras se encuentran orientadas en la dirección longitudinal y entre 2 y 5% están orientadas en la dirección transversal); la otra presentación es en placas rígidas las cuales son elementos laminados en los que se encuentran las fibras y la matriz. (Durán Quintal, 2008)

Tabla 1.1: Características de la fibra de carbón

Material	Módulo Elástico (GPa)	Resistencia a Tensión (MPa)	Deformación Última (%)
Alta resistencia	215-225	3500-4800	1.4-2.0
Ultra Alta resistencia	215-235	3500-6000	1.5-2.3
Alto módulo	350-500	2500-3100	0.5-0.9
Ultra Alto módulo	500-700	2100-2400	0.2-0.4

La Tabla 1.2 muestra algunos tipos de fibras sintéticas y sus principales propiedades.

Tabla 1.2 Tipos y propiedades de algunas fibras sintéticas

Tipo de fibra	Diámetro equivalente um	Densidad relativa	Resistencia a tensión MPa	Módulo de elasticidad GPa	Alargamiento ultimo %	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	7.5-50.0	-	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.

CAPÍTULO 3

1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES COMPONENTES DE LAS MEZCLAS

1.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

En el caso de los agregados es importante considerar la disponibilidad de estos, ya que las opciones para obtenerlos pueden ser limitadas y a veces únicas.

Las características de los agregados y de su influencia en el comportamiento del concreto, no solo es útil para establecer criterios de selección entre dos o más fuentes de suministro, sino también para definir y especificar los tratamientos de beneficio y acondicionamiento a que pueden someterse los agregados que presentan deficiencias.

En las mezclas de concreto hidráulico convencional, los agregados suelen representar entre el 60% y el 70%, del volumen absoluto de todos los componentes, por lo que es importante determinar las características y propiedades de los agregados que influyen en el concreto.

Una característica importante en el concreto es su peso unitario, ya que este influye decisivamente en el empleo que se le da. Esta característica del concreto depende principalmente del peso específico de los agregados que lo integran.

Los agregados de peso normal comúnmente proceden de la desintegración, por causas naturales o medios artificiales, de rocas con peso específico entre 2.4 y 2.8 aproximadamente, obteniéndose concretos con peso volumétrico aproximado de 2200 a 2550 kg/m³.

Las características de estudio en el agregado son: la porosidad, distribución de tamaños, la absorción de humedad, la forma, textura de la superficie, la resistencia a la ruptura, el módulo de elasticidad y el material contaminante que contenga.

En la Tabla 1.1 se relacionan las principales características, importancia y ensayos correspondientes a los agregados.

Tabla 1.1 Características, influencia en el concreto y ensayos de los agregados

CARACTERÍSTICA DE LOS AGREGADOS	ASPECTOS INFLUIDOS EN EL CONCRETO		NORMA ASTM
	CONCRETO FRESCO	CONCRETO ENDURECIDO	
Resistencia a la abrasión	-	Resistencia a la abrasión, Durabilidad	C-131, C-535, C-779
Coefficiente de expansión térmica	-	Propiedades térmicas	C-666, C-682
Resistencia a los sulfatos	-	Durabilidad	C-88
Forma de partículas y textura superficial	Manejabilidad, requerimiento de agua, sangrado	Resistencia mecánica, cambios volumétricos, durabilidad, resistencia al desgaste y economía	C-295
Granulometría	Manejabilidad, requerimiento de agua, sangrado	Resistencia mecánica, cambios volumétricos, economía	C-33
Degradación del agregado fino	Resistencia a la degradación durante el mezclado	Resistencia mecánica, cambios volumétricos, durabilidad, resistencia al desgaste y economía	C-1137
Contenido de vacíos	Trabajabilidad del concreto fresco	Resistencia mecánica, cambios volumétricos, durabilidad, permeabilidad, resistencia al desgaste y economía	C-1252
Densidad (gravedad específica)	Peso unitario	Peso unitario	C-29, C-127, C-128
Absorción y porosidad	Perdida de revenimiento, contracción plástica	Durabilidad, permeabilidad	C-170, C-127, C-128, C-566
Resistencia a compresión y flexión	-	Resistencia mecánica	C-39, C-78
Constituyentes del agregado	Requerimiento de agua, contracción plástica	Durabilidad, resistencia mecánica, cambios volumétricos	C-40, C-87, C-117, C-123, C-142, C-295

1.1.1 Composición granulométrica

El agregado fino abarca nominalmente partículas entre 0.075 y 4.75 mm, mientras que el agregado grueso comprende desde 4.75 mm hasta la dimensión de los fragmentos más grandes que contiene, cuya magnitud define el tamaño máximo del agregado en cada banco de materiales.

El empleo de agregados con granulometría continua en las mezclas de concreto de consistencia plástica, es conveniente por economía y con el fin de lograr una buena manejabilidad de acuerdo con los procedimientos y equipos de trabajo.

Para el caso del presente trabajo de “Concreto Reforzado con Fibras Sintéticas” se empleará grava caliza de 3/4” y 3/8” de tamaño máximo, y arena andesítica. La granulometría se determinó de acuerdo con la norma ASTM C 33.

1.1.1.1 Arena Andesítica

La composición granulométrica de la arena se analiza mediante su separación en siete fracciones, cribándola a través de mallas normalizadas como “serie estándar”. De esta manera para obtener una granulometría continua, la norma ASTM C 33 establece especificaciones para que en cada fracción exista una proporción de partículas comprendida entre ciertos límites establecidos. En la Figura 1.1 se puede observar el Ro-Tap, el cual se utilizó para hacer pasar a los agregados por los diferentes tamices.



Figura 1.1 Ro-Tap empleado para la prueba granulométrica

Los límites, que definen la granulometría se muestran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Límites granulométricos de la arena

SERIE ESTÁNDAR DE MALLAS PARA ARENA		LÍMITES DE TOLERANCIA (% EN PESO)
Abertura en mm	Designación	% que pasa acumulado
9.5	3/8"	100
4.75	No. 4	95 a 100
2.36	No. 8	80 a 100
1.18	No. 16	50 a 85
0.600	No. 30	25 a 60
0.300	No. 50	5 a 30
0.150	No. 100	0 a 10

El análisis granulométrico de la arena se complementa obteniendo su módulo de finura, que es igual a la centésima parte de la suma de los porcentajes retenidos acumulados en cada una de las mallas de la serie estándar. Se considera que la arena presenta un módulo de finura adecuado si no es menor de 2.30 ni mayor de 3.10.

Se realizaron 3 pruebas para el análisis granulométrico de la arena, y así poder obtener un punto de comparación. Los resultados obtenidos se muestran en el Anexo 1, así como sus respectivas gráficas que indican los límites inferior y superior del porcentaje que pasa acumulado. También se puede observar en los datos presentados el módulo de finura obtenido para cada una de las muestras, el cual se determina para realizar el proporcionamiento de cada una de las mezclas de concreto.

Se obtiene un módulo de finura promedio de 2.84 %

Se puede observar en los resultados de las tablas del Anexo 1 que el porcentaje de finos que presenta la arena andesítica es muy alto, por lo que se tiene que llevar a cabo un lavado de la arena de modo de obtener un porcentaje menor de estos finos.

La prueba normal para cuantificar el contenido de finos contaminantes en los agregados, consiste en determinar la proporción de material que pasa la malla de 75 micras (malla 200) mediante lavado.

Para realizar esta prueba, se llevó una subdivisión de la arena en varias fracciones, para su reunificación en una sola arena de granulometría controlada, desechando parcialmente las fracciones en exceso. Se realiza la separación y eliminación de finos indeseables en la arena por medio del lavado. Este procedimiento se llevó a cabo en el laboratorio con la utilización de la revoladora. Se colocó una fracción de arena en la revoladora y se saturó esta de tal forma de eliminar los finos antes de que se sedimentaran. Este procedimiento se llevó a cabo 3 veces, ya que con este número de lavadas se obtuvieron resultados de que la muestra obtenida presenta un porcentaje menor de finos al realizar la prueba de pérdida por lavado (malla 200) como se indica en la Tabla 1.3 la cual es tomada de la ASTM C 33.

El exceso de finos indeseables en los agregados no presenta un impedimento insalvable para su aprovechamiento, ya que pueden ser reducidos a límites tolerables mediante un tratamiento de lavado.

Es importante mencionar que después de llevar a cabo un lavado, se deben de efectuar pruebas para ajustar el proceso con el fin de evitar que junto con los finos indeseables se eliminen también los finos que son necesarios como parte integrante de la arena.

Tabla 1.3 Limitación de finos indeseables en agregados para concreto

Aplicación	Finos que pasan la malla de 75 micras,% máx	
	ASTM c 33	
	Agregado fino	Agregado grueso
En agregados para concreto en general:		
Finos del cualquier tipo	5	1
Finos de fragmentos de roca, libres de arcilla	7	1.5
En agregados para concreto expuesto a la abrasión:		
Finos de cualquier tipo	3	1
Finos de fragmentos de roca, libres de archilla	5	1.5

Cabe mencionar que se llevó a cabo mezclas de concreto para la arena lavada y la arena sin lavar. Utilizándose la arena lavada para el proporcionamiento de la mezcla con la grava caliza de 3/8", mientras que la arena sin lavar se utilizó en el proporcionamiento de la mezcla de concreto con la grava caliza de 3/4".

Los resultados para la arena lavada se muestran en el Anexo 2, así como la prueba de la malla 200 para la arena lavada tres veces en el Anexo 3 obteniendo un módulo de finura promedio de 3.10.

1.1.1.2 Grava Caliza

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

Se realizaron 3 pruebas para el análisis granulométrico de la grava caliza de 3/4" para obtener un punto de comparación. En el Anexo se pueden observar todos los resultados realizados para la grava de 3/4" y 3/8", así como sus respectivas gráficas que indican los límites inferior y superior del porcentaje que pasa acumulado. También

se puede observar que la curva granulométrica de la grava de 3/4", se encuentra dentro de los límites especificados por la norma ASTM C33, por lo cual la grava se encuentra bien graduada y se producirán concretos trabajables.

Para el caso de la grava caliza de 3/8" como no se contaba con grava de este tamaño máximo se tuvo que cribar cierta cantidad de grava, de tal forma que la curva quedara dentro de los límites fijados. Para este caso es posible sacar un promedio de los límites de la norma, y a partir de estos determinar las cantidades en gramos que se requiere tener en cada una de las mallas, para que la curva quede dentro. Sin embargo, después de establecer la granulometría adecuada de la grava total, se le debe conservar uniforme para que no sea fuente de cambios imprevistos en las características y propiedades del concreto durante su producción.

La granulometría de cada una de las gravas se pueden observar en el Anexo 4.

En la Tabla 1.4 se muestran los límites granulométricos recomendables para cada tamaño de grava de acuerdo con la ASTM C33.

Tabla 1.4 Límites granulométricos para la grava

Size Number	Nominal Size (Sieves with Square Openings)	Amounts Finer than Each Laboratory Sieve (Square-Openings), Mass Percent													
		100 mm (4 in.)	90 mm (3½ in.)	75 mm (3 in.)	63 mm (2½ in.)	50 mm (2 in.)	37.5 mm (1½ in.)	25.0 mm (1 in.)	19.0 mm (¾ in.)	12.5 mm (½ in.)	9.5 mm (¾ in.)	4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16)	300 µm (No.50)
1	90 to 37.5 mm (3½ to 1½ in.)	100	90 to 100	...	25 to 60	...	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...	...
2	63 to 37.5 mm (2½ to 1½ in.)	...	...	100	90 to 100	35 to 70	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...	...
3	50 to 25.0 mm (2 to 1 in.)	...	...	...	100	90 to 100	35 to 70	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...
357	50 to 4.75 mm (2 in. to No. 4)	...	...	...	100	95 to 100	...	35 to 70	...	10 to 30	...	0 to 5	...	...	...
4	37.5 to 19.0 mm (1½ to ¾ in.)	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...
467	37.5 to 4.75 mm (1½ in. to No. 4)	...	...	...	...	100	95 to 100	...	35 to 70	...	10 to 30	0 to 5	...	...	...
5	25.0 to 12.5 mm (1 to ½ in.)	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 10	0 to 5	...	...	...	...
56	25.0 to 9.5 mm (1 to ¾ in.)	...	...	...	...	...	100	90 to 100	40 to 85	10 to 40	0 to 15	0 to 5	...	...	...
57	25.0 to 4.75 mm (1 in. to No. 4)	...	...	...	...	...	100	95 to 100	...	25 to 60	...	0 to 10	0 to 5	...	...
6	19.0 to 9.5 mm (¾ to ¾ in.)	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 15	0 to 5	...	...	...
67	19.0 to 4.75 mm (¾ in. to No. 4)	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	...	20 to 55	0 to 10	0 to 5	...	...
7	12.5 to 4.75 mm (½ in. to No. 4)	...	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	40 to 70	0 to 15	0 to 5	...	...
8	9.5 to 2.36 mm (¾ in. to No. 8)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 to 100	10 to 30	0 to 10	0 to 5	...
89	9.5 to 1.18 mm (¾ in. to No. 16)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	5 to 30	0 to 10	0 to 5
9 ^A	4.75 to 1.18 mm (No. 4 to No. 16)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 to 100	10 to 40	0 to 10	0 to 5

1.1.2 Peso específico

En el caso de los agregados corresponde al peso específico en masa, que es el cociente resultante de dividir el peso en el aire de un cierto volumen de agregado en condición saturada y superficialmente seca, entre el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada libre de aire, a la misma temperatura (ASTM C 127 y C 128).

Deben emplearse agregados con peso específico comprendido entre 2.4 y 2.8, aproximadamente, para obtener concretos cuyo peso unitario varía entre 2200 y 2550 kg/m³ (Kosmatka, Kerkhoff, & Panarese, 2004)

Se tiene que la densidad para los materiales es la siguiente:

Arena sin lavar: 2.31

Arena lavada: 2.40

Grava de 3/4": 2.51

Grava de 3/8": 2.51

1.1.3 Porosidad y absorción

La porosidad es la relación de su volumen de vacíos entre su volumen total, y se expresa como un porcentaje en volumen. La medición de la porosidad de las rocas suele requerir de procedimientos relativamente complicados, por tal motivo no es una característica que se acostumbre determinar, sin embargo, es posible tener una idea aproximada de la porosidad de los agregados mediante la determinación de su capacidad para absorber agua en condiciones establecidas.

En el caso de la absorción, esta se determina por medio de un periodo de inmersión del agregado durante 24 horas en agua, conforme a los métodos de prueba (ASTM C 127 y C 128). El agregado en condición seca se sumerge en agua, y esta comienza a penetrar rápidamente en los poros permeables de la roca, desplazando el aire que así tiende a ser expulsado. La absorción se expresa en porcentaje y depende directamente de la porosidad del material y de la intercomunicación de sus poros. Determinar la absorción en los agregados es de suma importancia, pues fija la cantidad de agua en la dosificación de los concretos y morteros, ya que además del agua necesaria para la hidratación de los aglomerantes hay que agregar la que absorberán los agregados, de lo contrario, faltará agua para la reacción de hidratación y fraguado. Los materiales que presentan menor porcentaje de absorción garantizan, mejor control del agua en el proporcionamiento, menor ligereza y más resistencia en los concretos.

En el Anexo 5 se observan los resultados de absorción y peso específico para cada uno de los agregados a emplear en las mezclas de concreto.

Se tiene que la absorción de los materiales es la siguiente:

Arena sin lavar: 9.05%

Arena lavada: 5.63%

Grava de 3/4": 1.73%

Grava de 3/8": 1.73%

Los resultados altos de la andesita, muestran que es un material muy absorbente y presenta una gran ligereza, lo cual puede repercutir en la resistencia del concreto a realizar. El efecto de una elevada absorción se refleja en la contracción por secado, presentando mayores valores. Los resultados de la absorción de la grava, se encuentran dentro de lo establecido.

1.1.4 Peso volumétrico

El peso unitario o peso volumétrico seco suelto del agregado fino, al igual que para el agregado grueso, es el peso de agregado necesario para llenar un recipiente de volumen conocido; volumen ocupado por el agregado y los vacíos entre sus partículas. En la Figura 1.2 se puede observar los materiales que se requieren para llevar a cabo la prueba.

La masa volumétrica aproximada del agregado comúnmente usado en el concreto de peso normal varía de 1200 a 1750 kg/m³ (Kosmatka, Kerkhoff, & Panarese, 2004).

En el Anexo 6 se observan los resultados de peso volumétrico para cada uno de los materiales, y se puede observar que los valores se encuentran dentro de los parámetros establecidos para concretos convencionales.



Figura 1.2 Peso volumétrico de los agregados

A continuación se muestra en la Tabla 1.5 un resumen de la caracterización de los agregados:

Tabla 1.5 Propiedades de los materiales

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES				
Característica	Arena	Arena	Grava	Grava
	natural	lavada	9.5 mm	19 mm
Densidad (seco)	2.11	2.28	2.46	2.46
Densidad (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	-	-
Tamaño máximo, pulg	-	-	3/8	3/4

1.2 CEMENTO

Para el caso en estudio, se emplea el cemento CPO 30R, el cual es Cemento Portland Ordinario, y conforme a la norma NMX-C-414-ONNCCE, se tiene:

Máximo desempeño de alta resistencia, fraguado rápido y durabilidad en la construcción de losas de concreto, columnas, castillos, dalas, zapatas, alcantarillados, obras sanitarias y prefabricados de todo tipo (pretensados, tabicones, adoquines, adocretos, bloques, postes de luz, lavaderos, balaustradas, piletas, etc.

Este cemento es compatible con todos los materiales convencionales, tales como: arenas, gravas, piedras, cantera, mármol, etc., así como con los pigmentos (preferentemente los que resisten la acción solar) y aditivos, siempre que se usen con los cuidados y dosificaciones que recomienden sus fabricantes.

1.3 ADITIVO

Se usó un superplastificante de nueva generación (ASTM C494, tipo F), en las mezclas de baja trabajabilidad con el fin de mantener el revenimiento en el límite establecido, definido en 100 ± 25 mm .

En este trabajo se empleó GLENIUM 3150 SR el cual es un aditivo de nueva generación compuesto en base a cadenas de éteres policarboxílicos modificados,

desarrollado para la industria del concreto premezclado en climas cálidos donde se requiere de alta resistencia, durabilidad¹, y que además se mantenga la trabajabilidad.

El excelente efecto dispersante del GLENIUM 3150 SR lo hace el aditivo ideal para la industria del concreto premezclado. Por su capacidad para trabajar con muy baja relación agua/cemento manteniendo el revenimiento, permite producir concreto de alta calidad sin el riesgo que supone la adición de más agua.

1.4 FIBRA POLIMÉRICA

La fibra empleada es de tipo monofilamento, no fibrilada, totalmente orientada, formando un perfil que permite anclarlo a la matriz cementicia produciendo un concreto de alto desempeño. Esta fibra se utiliza para sustituir eficientemente el refuerzo por temperatura a base de malla electrosoldada y/o fibras metálicas, brindando grandes ventajas técnicas y económicas. En la Tabla 1.6, se observan características de la fibra empleada.

Tabla 1.6 Propiedades de la fibra sintética

TIPO DE FIBRA	MONOFILAMENTO DE COPOLÍMERO VIRGEN	APARIENCIA
Color	Gris	
Longitud, mm	38	
Resistencia a tensión, kg/cm ²	6328 – 7031	
Módulo elástico, GPa	4.3	
Gravedad específica	0.93	
Punto de ignición, °C	177	

CAPÍTULO 4

1 DISEÑO DE MEZCLAS, MEZCLADO, MANEJO Y COMPACTACIÓN DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS

Los procedimientos de producción y construcción no difieren grandemente de los usados para el concreto convencional. Sin embargo, se requiere mucho cuidado durante el mezclado, la colocación y el acabado, a fin de evitar el desarrollo de bolas de fibras, la adición de agua al concreto en el lugar y la posibilidad de fibras visibles en la superficie del concreto.

1.1 DISEÑO DE MEZCLAS

El objetivo al diseñar una mezcla de concreto consiste en determinar la combinación más práctica y económica de los materiales disponibles, para producir un concreto que satisfaga los requisitos de desempeño bajo las condiciones particulares de su uso. Para lograr tal objetivo, una mezcla de concreto bien proporcionada deberá poseer las propiedades siguientes:

1. En el concreto fresco, trabajabilidad aceptable.
2. En el concreto endurecido, durabilidad, resistencia y presentación uniforme.
3. Economía.

Al agregar al concreto, fibras en pequeños volúmenes, de acuerdo con una dosificación, se obtienen beneficios que no se encuentran en el concreto convencional.

Las fibras vienen en una variedad de materiales, longitudes, diámetros y geometrías. Las formas de las fibras de acero incluyen las redondas, ovaladas, rectangulares y con secciones transversales en forma de media luna. Las fibras sintéticas, hechas generalmente de nylon o polipropileno, pueden ser angulares fibriladas o tener un solo filamento suave y redondo.

Para llevar a cabo el diseño de la mezcla, es necesario tener primero la caracterización de los agregados, ya que estos le dan propiedades a la mezcla. También es importante mantener una relación A/C adecuada, ya que las relaciones A/C menores a 0.4 producen pastas de consistencias entre semiplásticas y duras, que no son fácilmente moldeables en condiciones ordinarias, a menos que se les incorporen aditivos especiales. Opuestamente las pastas con relaciones A/C mayores de 0.8 además de que conducen a

resistencia demasiado bajas para fines estructurales, tienen el inconveniente de que no producen suspensiones estables, por lo que su empleo en el concreto propicia la segregación y el sangrado de las mezclas.

1.1.1 Diseño de la Mezcla con Fibras Sintéticas

El diseño de mezclas se llevó a cabo de acuerdo con las recomendaciones del ACI 211.1 (“Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete”), y por el método de Mínimos Vacíos (Volúmenes Absolutos). Este diseño y el proporcionamiento de los materiales, se basaron en pruebas preliminares que se realizaron en el laboratorio. La variable principal para este procedimiento fue alcanzar mezclas de consistencia adecuada, de 10 ± 2.5 cm de revenimiento, para facilitar la manipulación, colocación y compactación, determinada por la prueba de revenimiento (ASTM C143), y una resistencia de 300 kg/cm^2 .

De las tablas del (ACI211.1, 1991), para el concreto de referencia, primero se determinó la cantidad aproximada del agua de mezclado y el contenido de aire atrapado en la mezcla, para el tamaño máximo del agregado y el revenimiento deseado. De la misma tabla, se eligió la relación agua/cemento para la resistencia de diseño especificada. Con estos datos se calcula las cantidades de agua y cemento en la mezcla, y por volúmenes absolutos se determinan las cantidades de grava y arena.

En el caso de las mezclas de concreto con fibra de polipropileno, se usó el mismo diseño de la mezcla de concreto de referencia, y no se realizó ningún cambio, más que agregarle fibra. Sin embargo, en algunos casos fue necesario añadir una cantidad de superplastificante, para conseguir el revenimiento deseado de 10 ± 2.5 cm.

Se fabricaron 4 mezclas: una mezcla de referencia (sin fibra sintética), y tres mezclas con cantidades de fibra sintética de 1, 3 y 5 kg/m^3 , que corresponden a porcentajes volumétricos de 0.11, 0.32 y 0.54 %.

1.1.1.1 Proporcionamiento de la mezcla con agregado de 19 mm (3/4")

Para la mezcla se tienen las siguientes variables:

Tamaño Máximo de Agregado, T.M.A. = 19 mm (3/4")

Resistencia a compresión a 28 días, $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$

Módulo de finura, M.F. = 2.84

Revenimiento = 10 cm

Se determina primero un proporcionamiento con el método del ACI 211, y luego se lleva a cabo un reajuste mediante pruebas preliminares. Con el T.M.A y el revenimiento, se obtiene la cantidad de agua que debe de contener un metro cúbico de la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Requisitos Aproximados de Agua de Mezcla y Contenido de Aire para Diferentes tamaños de agregado

Revenimiento (asentamiento) (mm)	Agua, kilogramos por metro cúbico de concreto, para los tamaños de agregado indicados*							
	9.5 mm	12.5 mm	19 mm	25 mm	37.5 mm	50 mm**	75 mm**	150 mm**
Concreto sin aire incluido								
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	—
Cantidad aproximada de aire atrapado en un concreto sin aire incluido, porcentaje	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido								
25 a 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 a 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 a 175	216	205	197	184	174	166	154	—
Promedio del contenido de aire total recomendado, para el nivel de exposición, porcentaje†								
Exposición leve	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposición moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

Ya obtenida el agua necesaria, se recurre a la Tabla 1.2 para determinar la relación agua/cemento y el cemento que se requiere por metro cúbico.

Tabla 1.2 Dependencia entre la Relación Agua-Material Cementante y la Resistencia a Compresión del Concreto

Resistencia a Compresión a los 28 Días, kg/cm ² (MPa)	Relación agua-material cementante en masa	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
450 (45)	0.38	0.31
400 (40)	0.43	0.34
350 (35)	0.48	0.40
300 (30)	0.55	0.46
250 (25)	0.62	0.53
200 (20)	0.70	0.61
150 (15)	0.80	0.72

Con la relación agua/cemento de 0.55, se determina el consumo de cemento de 380 kg/m³.

De la Tabla 1.3, conocido el módulo de finura de la arena y el tamaño máximo de agregado, se determina el volumen de agregado por volumen unitario de concreto.

Tabla 1.3 Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto

Tamaño máximo nominal del agregado mm (pulg.)	Volumen del agregado grueso varillado (compactado) en seco por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura de agregado fino*			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5 (3/8)	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2)	0.59	0.57	0.55	0.53
19.00 (3/4)	0.66	0.64	0.62	0.60
25.00 (1)	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 (1 1/2)	0.75	0.73	0.71	0.69
50 (2)	0.78	0.76	0.74	0.72
75 (3)	0.82	0.80	0.78	0.76
150 (6)	0.87	0.85	0.83	0.81

El valor obtenido de volumen de agregado es de 0.62, el cual se multiplica después por el peso volumétrico compactado de la grava (1612.81kg/m³), obteniendo así el peso de la grava por metro cúbico que es de 998 kg.

Conocidas las cantidades por metro cúbico de agua, cemento y grava, solo falta determinar la cantidad de arena, la cual se calcula por el método de volúmenes absolutos, donde:

$$Vol. Abs. Cemento = \frac{Peso\ Cemento}{Peso\ específico\ del\ Cemento \times 1000} = \frac{380}{3150} = 0.121$$

$$Vol. Abs. Grava = \frac{Peso\ Grava}{Peso\ específico\ de\ la\ Grava \times 1000} = \frac{998}{2.46 \times 1000} = 0.405$$

$$Vol. Abs. Agua = \frac{Peso\ Agua}{Peso\ específico\ del\ Agua \times 1000} = \frac{205}{1000} = 0.205$$

$$Vol. Abs. Aire = \frac{Porcentaje\ de\ Aire}{100} = 0.020$$

$$Vol. Abs. Arena = \frac{Peso\ Arena}{Peso\ específico\ de\ la\ Arena \times 1000} = ?$$

Por lo tanto, el volumen absoluto de la arena es igual a: 1 menos la suma de todos los demás volúmenes absolutos, dando como resultado 0.249. Y en consecuencia, el peso de la arena es igual a:

$$\text{Peso de la Arena} = \text{Vol. Abs. Arena} \times \text{Peso específico de la Arena} \times 1000$$

$$\text{Peso de la Arena} = 0.249 \times 2.12 \times 1000 = 527 \text{ kg}$$

Obteniendo un proporcionamiento inicial como se puede ver en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4 Proporcionamiento inicial para las mezclas con grava de 3/4"

Material	Kg /m ³ diseño
Cemento	380
Agua	205
Arena	527
Grava	998

Con el proporcionamiento inicial, se llevan a cabo las mezclas preliminares, en donde se determina si este proporcionamiento cumple con las características de trabajabilidad para la mezcla.

Para este procedimiento, se lleva a cabo la mezcla con las correcciones por contenido de humedad y absorción, y se saca el revenimiento. Para la primera mezcla, se obtuvo un revenimiento mayor al esperado, por lo que se quitan unos cuantos mililitros de agua a la mezcla (se considera que por cada centímetro de revenimiento requerido, se aumentan o se reducen 2000 ml/m³ de concreto). Se lleva el recálculo de los materiales y también se considera una relación arena/grava diferente debido a que la primera mezcla presenta poca cohesión; en este caso se considera una relación a/g=0.44/0.56.

Para corregir los valores de diseño por contenido de humedad y absorción, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\text{Peso Arena Corregida} = \text{Peso Arena diseño} (1 + C.H.)$$

$$\text{Peso Grava Corregida} = \text{Peso Grava diseño} (1 + C.H)$$

$$\text{Peso Agua Corregida} = \text{Peso Agua diseño} - \text{Peso Arena diseño} (C.H) + \text{Peso Arena diseño} (\% \text{Absorción}) - \text{Peso Grava diseño} (C.H) + \text{Peso Grava diseño} (\% \text{Absorción})$$

Realizada la mezcla por segunda ocasión, se observa que sobra un poco de agua, por lo que se hace el recálculo de las cantidades y ahora en esta ocasión, se considera el peso volumétrico del concreto, para sacar el rendimiento de la mezcla y volver a calcular las cantidades de material. En este caso se va de los pesos corregidos a los pesos de diseño.

A continuación se ilustra una iteración del procedimiento, para el recálculo de los materiales.

Iteración:

Material	kg /m ³ diseño	kg /m ³ corregido	1 tanda
Cemento	357.143	357.143	8.929
Agua	175.000	238.579	5.964
Arena	643.728	650.165	16.254
Grava	953.758	958.527	23.963

Excedente de agua = 0.100 kg

Peso volumétrico = 2300.94 kg/m³

Rendimiento = (8.929 + 5.964 + 16.254 + 23.963 – 0.100)/2300.94 = 0.0239

Volumen de la tanda = 0.025 m³

Con el rendimiento se calculan los pesos corregidos considerando el agua realmente empleada en la mezcla de prueba, y para esto cada uno de los materiales utilizados en la tanda anterior, se dividen entre el rendimiento. Después se obtiene el peso de diseño de una forma inversa con las ecuaciones mencionadas con anterioridad:

Material	kg/m ³ corregido	kg/m ³ diseño
Cemento	373.459	373.459
Agua	245.296	178.209
Arena	679.868	673.137
Grava	1002.318	997.331

Finalmente después de 1 ó 2 iteraciones se llega al diseño final, obteniendo como proporcionamiento para la mezcla con agregado de 3/4" las cantidades que se observan en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5 Proporcionamiento de la mezcla con agregado de 3/4"

Material	kg /m ³ diseño
Cemento	362
Agua	177
Arena	742
Grava	936

Relación Arena/Grava = 0.44/0.56

Relación Agua/Cemento = 0.49

1.1.1.2 Proporcionamiento de la mezcla con agregado de 9.5 mm (3/8")

Para la mezcla se tienen las siguientes variables:

Tamaño Máximo de Agregado , T.M.A = 9.5 mm (3/8")

Resistencia a compresión a 28 días, $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$

Módulo de finura , M. F. = 3.10

Revenimiento = 10 cm

De la misma forma como el proporcionamiento de la mezcla con agregado de 3/4", se lleva a cabo el cálculo de los materiales para las mezclas con agregado de 3/8". Es importante realizar los recálculos de material en base a las mezclas de prueba, para poder determinar las cantidades precisas para obtener una mezcla con una buena trabajabilidad y que mantenga los parámetros de diseño. En la Tabla 1.6, se puede observar el proporcionamiento final de la mezcla.

Tabla 1.6 Proporcionamiento de la mezcla con agregado de 3/8"

Material	kg /m ³ diseño
Cemento	426.324
Agua	213.873
Arena	772.548
Grava	835.953

Relación Arena/Grava = 0.48/0.52

Relación Agua/Cemento = 0.50

Cuando se tienen los valores definidos por el proporcionamiento, estos pesos también deben de ser corregidos por humedad y absorción como en el caso de las mezclas con agregado de 3/4".

1.2 MEZCLADO

Las fibras sintéticas que son específicamente diseñadas para el concreto se fabrican a partir de materiales sintéticos que pueden resistir a largo plazo el medio ambiente alcalino del concreto. Las fibras sintéticas son añadidas al concreto antes o durante la operación de mezclado. El uso de fibras sintéticas en proporciones típicas no requiere de ningún cambio en el diseño de la mezcla.

Las fibras sintéticas se empaican, de manera suelta, en bolsas degradables que pueden agregarse a la mezcla en la planta de dosificación o echarse al camión mezclador en el lugar de la obra. Sin embargo, se recomiendan agregar las fibras en una planta de

dosificación confiable, al menos por dos razones: Primero, se proporciona una medida adicional de control; y segundo, es muy importante que las fibras sintéticas se mezclen por lo menos de dos a cinco minutos, algo que no siempre es posible en el lugar de la obra. La agitación mecánica apropiada asegura la separación de las fibras, eliminando virtualmente la formación de bolas de fibras en el concreto. También distribuye las fibras de una manera completa y uniforme en toda la mezcla.

En el ACI 544, se recomienda tomar en cuenta:

- Permitir que el ingeniero del proyecto revise y apruebe el equipo y el método utilizado para agregar las fibras a la mezcla.
- Efectuar una prueba a gran escala, al menos ocho días antes de la primera colocación.
- No permitir que las fibras se apilen o se deslicen hacia abajo de las espas de un tambor parcialmente lleno.
- No usar equipo con las espas de mezclado desgastadas.
- No exceder el tiempo de mezclado, ya que esto puede causar la formación de bolas de fibras mojadas (compuestas tanto de fibras como de la matriz de la pasta de cemento).

Es importante asegurarse de consultar a los productores de las fibras para obtener información actualizada, y así tener la recomendación adecuada para llevar a cabo las mezclas con diferentes tipos de fibras.

Todas las mezclas fueron fabricadas en una mezcladora con capacidad de 90 litros. El procedimiento de mezclado fue el siguiente:

Para las mezclas de concreto de referencia (sin fibras) se colocó en la mezcladora, la grava, la arena y una cantidad de agua equivalente al agua de absorción, dejándose mezclar durante 1 minuto. Enseguida se añadió el cemento, y el agua restante, dejando mezclar durante 3 minutos. Después se dejó en reposo durante 3 minutos para romper el falso fraguado del cemento en caso de que se presente, cubriendo la mezcladora con una tela húmeda. Posterior al reposo, se reinició el mezclado y se dejó mezclar durante 2 minutos finales. En total fueron 9 minutos de mezclado.

Para las mezclas con fibra el procedimiento de mezclado fue el siguiente: Para las mezclas sin superplastificante el tiempo de mezclado fue de 11 minutos, 9 minutos de mezclado inicial similar al concreto de referencia, después del cual se añadió la fibra dejándose mezclar durante 2 minutos finales. Para las mezclas que requirieron superplastificante el tiempo de mezclado fue de 13 minutos, 11 minutos de mezclado inicial, similar al anterior de las mezclas con fibra, después del cual se añadió el superplastificante para alcanzar el revenimiento deseado, dejándose mezclar durante 2 minutos finales. En todos los casos las pruebas en estado fresco se realizaron al final del tiempo de mezclado, es decir, después de 9, 11 ó 13 minutos

1.3 COLOCACIÓN

El concreto reforzado con fibras sintéticas se puede colocar empleando equipo convencional de colocación tal como canaletas de camión, cubos de concreto, bandas transportadoras y bombas. El equipo debe estar limpio y en buenas condiciones para asegurar que el concreto reforzado con fibras fluya fácilmente.

En las mezclas realizadas en el laboratorio, se tiene que para una cantidad de 1 y 3 kg/m³ de fibra, el revenimiento no es afectado y se encuentra dentro de los límites establecidos, aunque para 5 kg/m³ el revenimiento se reduce, haciendo que el concreto bien proporcionado parezca más rígido y menos trabajable. Aunque el concreto reforzado con fibras parezca más rígido, es relativamente fácil de colocar y consolidar. Para mejorar la trabajabilidad, es necesario ajustar la granulometría del agregado y agregar un reductor de agua de mediano o alto rango a la mezcla en vez de agua. Al igual que con el concreto convencional.

1.4 ACABADO

Aunque las operaciones de acabado del concreto reforzado con fibras son muy similares a las utilizadas para concreto simple, existen algunas diferencias.

Operaciones de enrase. Para el acabado del concreto reforzado con fibras se usa vibración externa del molde o cimbra con una regla vibratoria, enrasadora eléctrica portátil o enrasadora guiada por láser, para nivelar el concreto. En algunas obras, este paso puede ser esencial. La vibración externa hace que la pasta salga a la superficie y cubra las fibras localizadas en la superficie de la losa, encapsulándolas en el concreto y minimizando así la exposición de las fibras.

Periodo de espera. Los millones de fibras sintéticas en el concreto pueden bloquear o retardar la aparición de agua de sangrado en la superficie. Por lo tanto, es importante verificar que toda el agua de sangrado se haya evaporado antes de comenzar con el acabado del concreto. Puesto que el concreto reforzado con fibras no parece nada diferente del concreto simple, se trata simplemente de esperar un poco más de tiempo que el de costumbre. Si se llega a trabajar sobre el concreto demasiado pronto, se incrementa la posibilidad de que se tengan fibras expuestas.

Operaciones finales de acabado. Las fibras sintéticas son compatibles con casi todos los tratamientos y acabados de las superficies de concreto, incluyendo estampado de patrones, agregado expuesto, escobillado y llanado manual o mecánico

Si se desea una superficie texturizada, se puede utilizar una escoba con cerdas duras o un rastrillo texturizador (con aproximadamente 60 puntas), a condición de que se pase en una sola dirección. Si el rastrillo o la escoba se impulsan hacia atrás y hacia adelante, pueden desacomodar las fibras.

Fibras expuestas. Si hay fibras expuestas en la superficie de la losa, las fibras sintéticas relativamente suaves desaparecen por lo regular rápidamente bajo un tránsito ligero. Las fibras de acero al carbono salientes se corroen en la superficie. Bajo un tránsito ligero, las fibras corroídas se pueden quitar con cepillo, pero dejarán pequeñas manchas de herrumbre en la superficie de la losa. En áreas de tránsito intenso, esto generalmente no es motivo de preocupación.

CAPÍTULO 5

1 ENSAYOS A REALIZAR

1.1 VARIABLES A CONSIDERAR

Las variables que se consideraron para la elaboración de las mezclas fueron las cantidades de fibra por metro cúbico que se emplearon (0, 1, 3 y 5 kg/m³) para cada una de las mezclas. Se elaboran 8 mezclas, las cuales están compuestas por cemento Portland ordinario (CPO-30R, ASTM C150 Tipo II); grava triturada de origen calizo de 3/4" y 3/8" de tamaño máximo, arena de origen andesítico, agua, y una fibra sintética de polipropileno. Se usó un superplastificante de nueva generación (ASTM C494, tipo F), en las mezclas de baja trabajabilidad con el fin de mantener el revenimiento en el límite, definido en 100 ± 25 mm. La fibra sintética usada en este trabajo fue de tipo monofilamento no fibrilada.

1.2 CONCRETO EN ESTADO FRESCO

Una de las características del concreto fresco antes de fraguarse es la trabajabilidad, que se considera como el índice que expresa su aptitud para la aplicación, y su calidad y homogeneidad después del fraguado. La facilidad de aplicación se define principalmente por la consistencia, que varía por la cantidad de agua que contiene el concreto.

1.2.1 Revenimiento

La prueba de revenimiento, se realiza con la mezcla tentativa para definir la adecuada formulación del concreto que satisfaga los requisitos.

La prueba se realiza para el control de calidad en las plantas de concreto y como inspección de entrada del concreto premezclado en las obras de construcción. El concreto que tiene un revenimiento extraordinariamente alto, obtenido por alto consumo de agua, no sólo es poco resistente a la compresión sino también muestra una segregación muy grande de materiales, además de una serie de desventajas, como el aumento de sangrado, la reducción de impermeabilidad por la formación de una membrana acuosa en la superficie inferior de los agregados y el incremento de la contracción por secado.

La prueba de revenimiento se llevará a cabo al realizar todas las mezclas de concreto con fibras sintéticas y a las mezclas de control, para lo cual se requerirá:

Cono de revenimiento: Un cono de acero de 30 cm de altura, 10 cm de diámetro interior en la punta superior y de 20 cm de diámetro interior en la punta inferior con sujetadores y asas en los lugares apropiados.

Varilla compactadora: varilla redonda de acero de 16 mm de diámetro y 60 cm de largo, con punta semiesférica (punta de bala).

Placa impermeable: una placa cuadrada de acero de 60 cm de lado con un espesor de 10 mm o similar.

Regla o escala para medir el revenimiento con divisiones mínimas de 0.5 cm.

En la Figura 1.1 se puede observar la prueba de revenimiento realizada en el laboratorio.



Figura 1.1 Prueba de revenimiento realizada en el laboratorio

El revenimiento de las mezclas puede disminuir conforme se añade fibra a estas, y en ese caso se emplea un superplastificante, para regresarle la trabajabilidad a la mezcla.

1.2.2 Contenido de aire y peso unitario

La prueba de contenido de aire se realiza de acuerdo con la norma ASTM C231 y se basa en la medición del cambio de volumen del concreto sometido a un cambio de presión; mientras que la prueba de peso unitario se realiza conforme la norma ASTM C138. En la Figura 1.2 se puede observar el equipo empleado.



Figura 1.2 Equipo para la prueba de contenido de aire

1.2.3 Resistencia al agrietamiento por contracción plástica

Las grietas por contracción plástica son grietas que aparecen en ocasiones, en la superficie del concreto fresco, y se desarrollan por la pérdida de agua por evaporación de la superficie del concreto y generalmente se asocian con los colados en climas cálidos; sin embargo pueden ocurrir en cualquier ocasión en que las condiciones ambientales produzcan una evaporación rápida del agua en la superficie del concreto con mayor rapidez que con la que puede aparecer en la superficie durante el proceso de sangrado.

Las grietas por contracción plástica se originan debido al cambio de volumen en el concreto plástico. Las siguientes condiciones, solas o de manera colectiva, incrementan la evaporación del agua en la superficie y aumentan la posibilidad del agrietamiento por contracción plástica:

- Temperatura elevada del aire
- Humedad relativa baja
- Vientos fuertes
- Temperatura elevada del concreto

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

La prueba se basa en muestras de anillos de 80 mm de altura y diámetros interior y exterior de 280 y 580 mm, respectivamente, moldeados sobre una superficie metálica no absorbente. El molde metálico sobre el cual se fabrica el espécimen tiene 12 restricciones

metálicas colocadas simétricamente sobre el anillo metálico exterior. Las dimensiones de las restricciones son de 5 mm de espesor, 30 mm de longitud y 80 mm de altura como se observa en la Figura 1.3.



Figura 1.3 Anillo de contracción plástica

El moldeado de los anillos se realiza en una sola capa y la compactación se lleva a cabo mediante una mesa de vibrado por 25 segundos. La prueba consiste en monitorear la aparición de grietas sobre la superficie del concreto, y tiene una duración aproximada de 6 horas desde la aparición de las primeras grietas hasta que ya no se presentan mayor cantidad de ellas o hasta que se detiene el desarrollo de las mismas. En el caso de la prueba se tomó como parámetro el tiempo de 6 horas, para que todas las mezclas presentaran el mismo tiempo, y fuera posible comparar los resultados. En la Figura 1.4 se puede observar el equipo para la prueba en conjunto, en donde se emplearon unos calefactores para poder mantener las condiciones de temperatura y humedad relativa.



Figura 1.4 Equipo de la prueba de contracción plástica

1.3 CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

1.3.1 Resistencia a compresión

Es la capacidad de carga a compresión por unidad de área del concreto hidráulico, medida en ensayos de especímenes cilíndricos elaborados, curados y probados en las condiciones estándar especificadas, generalmente es expresada en kg/cm^2 . La resistencia mecánica del concreto frecuentemente se identifica con su resistencia a compresión, porque ésta representa la condición de carga en que el concreto exhibe mayor capacidad para soportar esfuerzos.

El ensayo de resistencia a compresión para concreto reforzado con fibra, se realiza de acuerdo a la norma ASTM C39, utilizada para concreto convencional. Los cilindros que se deben de usar para la prueba son de 6×12 pulgadas (150×300 mm), los cilindros se moldean en dos capas el compactado se realiza por medio de vibración externa, empleando una mesa de vibrado durante 25 segundos. Es preferible usar una vibración externa, ya que un vibrador interno puede influir en la distribución aleatoria de la fibra y la alineación (ACI544.2R, 1989).

Los cilindros son desmoldados después de 24 horas de colado, y se colocan en una cámara de curado con humedad y temperatura controladas, donde permanecen hasta la edad de la prueba de 7 y 28 días como lo establece la norma ASTM C192. Los especímenes son retirados en los días de prueba, medidos y pesados para ser cabeceados después. En los especímenes, es muy importante el acondicionamiento de las superficies de las cabezas, a través de las cuales se transmiten las cargas de compresión, a fin de eliminar defectos que puedan producir concentraciones de esfuerzos en el espécimen y hacerlo fallar de manera irregular. El cabeceado se realiza de acuerdo con la norma ASTM C617. Una vez cabeceados los cilindros, se les aplica una carga axial de compresión creciente hasta su ruptura; la carga máxima que se alcanza dividida entre la sección transversal del espécimen corresponde al esfuerzo máximo aplicado que define la resistencia del concreto a compresión.

El método de prueba ASTM C 39, establece que el ensaye se realice aplicando los esfuerzos de compresión a una velocidad comprendida entre 1.5 y $3.5 \text{ kg}/\text{cm}^2/\text{s}$, lo cual representa una velocidad de aplicación de carga entre 16 y 38 toneladas por minuto. La prueba se realiza a una velocidad de 25 t/min empleando una prensa universal modelo SATEC con capacidad de 250 t.

1.3.2 Módulo elástico y relación de Poisson

El módulo elástico se determina de acuerdo con la norma ASTM C469 y para ello se lleva a cabo 5 precargas hasta un nivel de 40% de la carga de rotura de los cilindros ensayados en la prueba de compresión, finalmente, en la última carga se lleva la prueba a la falla. El módulo elástico se obtiene a partir de las gráficas esfuerzo-deformación de los cilindros ensayados a compresión. Para determinarlo se utiliza el criterio del módulo secante, haciendo pasar una recta por el 40% del esfuerzo máximo y la deformación unitaria correspondiente a 50 millonésimas. Para el registro de las deformaciones axiales y transversales se utilizó un compresómetro que consta de transductores de desplazamiento tipo LVDT (Linear Variable Differential Transformers) de ± 25 mm de rango. La distancia de referencia para el cálculo de las deformaciones unitarias fue de 200 mm, como se puede observar en la Figura 1.5. Para la adquisición de los datos (cargas y desplazamientos) se utilizó un sistema de captura multicanal TDS-302, integrado a una computadora a través de un puerto de entrada/salida (puerto de serie). En esta computadora se registran los datos, que posteriormente son procesados. La frecuencia del registro es cada 2 segundos. La relación de Poisson del concreto puede oscilar entre 0.11 y 0.27, aproximadamente.



Figura 1.5 Compresómetro para determinar módulo elástico y relación de Poisson

1.3.3 Resistencia a tensión por compresión diametral

Las pruebas de resistencia a tensión por compresión diametral se realizaron de acuerdo con la norma ASTM C496. Se utiliza el mismo equipo empleado en las pruebas de

resistencia a compresión, y la velocidad de aplicación de carga es de 7 t/min. Previo a la prueba los especímenes son pesados y medidos.

Se ensayaron especímenes cilíndricos en posición horizontal, sometiéndolos a la acción de dos fuerzas opuestas de compresión uniformemente distribuidas a lo largo de las generatrices contenidas en su plano vertical de simetría. A fin de reducir la concentración de esfuerzos de compresión que se producen a lo largo de las generatrices en que se aplican las cargas, se colocan dos tiras de material compresible (madera laminada) entre la superficie de concreto del espécimen y las placas que transmiten la carga, para evitar la ruptura del concreto por aplastamiento en la zona de contacto, consiguiendo que el espécimen falle por efecto de los esfuerzos de tensión.

1.3.4 Resistencia a flexión y tenacidad

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

Para determinar la tenacidad en el concreto reforzado con fibras, se utiliza el ensayo de flexión recomendado por el ACI 544.2R, que hace hincapié en la norma del ASTM C 1018, para lo cual se fabricaron vigas de 150 X 150 X 600 mm, las cuales fueron moldeadas y curadas con el mismo procedimiento que se utilizó para los cilindros de compresión, módulo y tensión.

El ensayo a tensión por flexión consiste esencialmente en colocar la viga en posición horizontal, apoyada libremente en sus extremos, y transmitirle a todo lo ancho de la viga dos cargas iguales en los tercios del claro, para lo cual se utilizó un equipo servohidráulico con una capacidad de 25 t a una velocidad de 0.1 mm/min, el equipo se conforma de un marco rígido el cual se encuentra controlado por un sistema analógico de lazo cerrado MTS que permite el control por desplazamiento, para obtener la respuesta carga – desplazamiento después de que se presenta el agrietamiento. La falla de la viga debe ocurrir dentro del tercio central, el módulo de ruptura se determina en kg/cm^2 .

La información que se obtiene después del agrietamiento, permite calcular la tenacidad y los índices de tenacidad Índices *I5*, *I10*, e *I20* para deflexiones de 3, 5,5 y 15,5 veces la deflexión de primera rotura como se puede observar en la Figura 1.6.

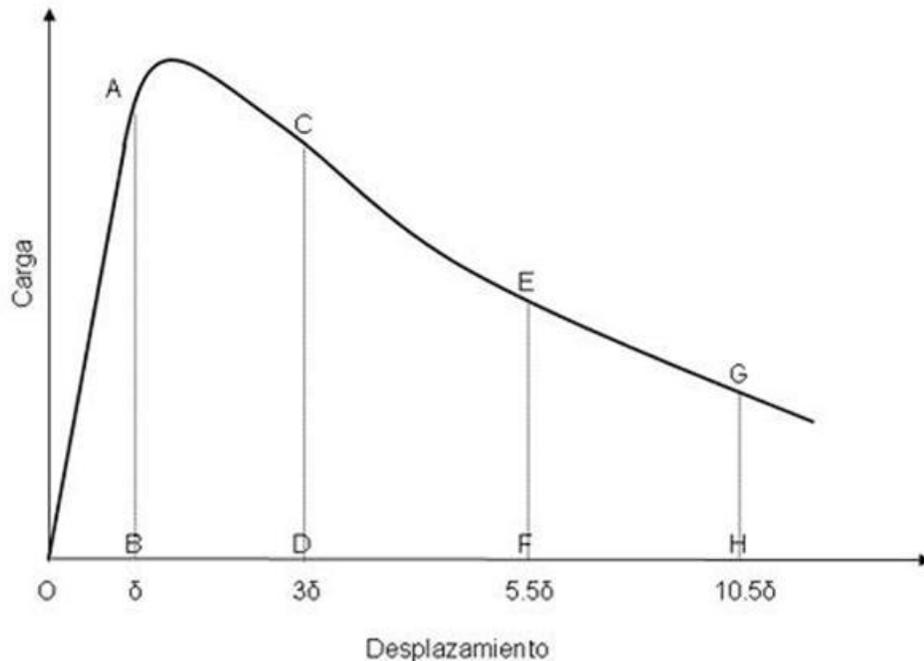


Figura 1.6 Tenacidad de acuerdo con la norma ASTM C1018

De la Figura 1.6 se tiene:

Área OAB = Tenacidad correspondiente al desplazamiento δ .

Área OCD = Tenacidad correspondiente al desplazamiento 3δ .

Área OAEF = Tenacidad correspondiente al desplazamiento 5.5δ .

Área OAGH = Tenacidad correspondiente al desplazamiento 10.5δ .

Asimismo, es posible determinar los Índices de Tenacidad que es la relación entre la tenacidad en el postpico y la tenacidad del prepico (elástica), de acuerdo con lo siguiente:

$$I_5 = \text{Área OACD} / \text{Área OAB}$$

$$I_{10} = \text{Área OAEF} / \text{Área OAB}$$

$$I_{20} = \text{Área OAGH} / \text{Área OAB}$$

La instrumentación que se utilizó para obtener la información se realizó mediante transductores de desplazamiento tipo LVDTs de 100 mm de rango y con una cámara Krypton 600 para mediciones ópticas en 3 dimensiones que permiten obtener información del desplazamiento de la viga en varios puntos definidos (iluminación con LEDs). En la Figura 1.7 se puede observar la instrumentación y el marco rígido empleado para la prueba.



Figura 1.7 Dispositivo para la prueba de flexión y tenacidad

1.3.5 Resistencia al impacto

De acuerdo con la recomendación del ACI 544.2R (ACI 544.2R “*Measurements of Properties of Fiber Reinforced Concrete*”), la prueba se realiza sobre una muestra circular de concreto de 150 mm de diámetro y 63.5 mm de espesor, por lo que se fabricaron cilindros de 150 × 300 mm, para minimizar el posible alineamiento de las fibras y de ahí obtener los especímenes de ensaye.

La prueba consiste en dejar caer repetidamente un peso de acero de 4.54 kg desde una altura de 457 mm sobre la muestra de concreto, y se registra el número de veces necesario para generar la primera fisura sobre la parte superior de la muestra y hasta causar la falla última, debiendo reportarse ambos datos. La falla Inicial se identifica al aparecer una grieta visible, por lo tanto, la resistencia al impacto a la primera grieta (RPG) se registrará por el número total de golpes necesarios para iniciar una grieta visible. En la Figura 1.8 se puede observar un esquema del dispositivo para la prueba de impacto, según las recomendaciones de ACI 544.2R.

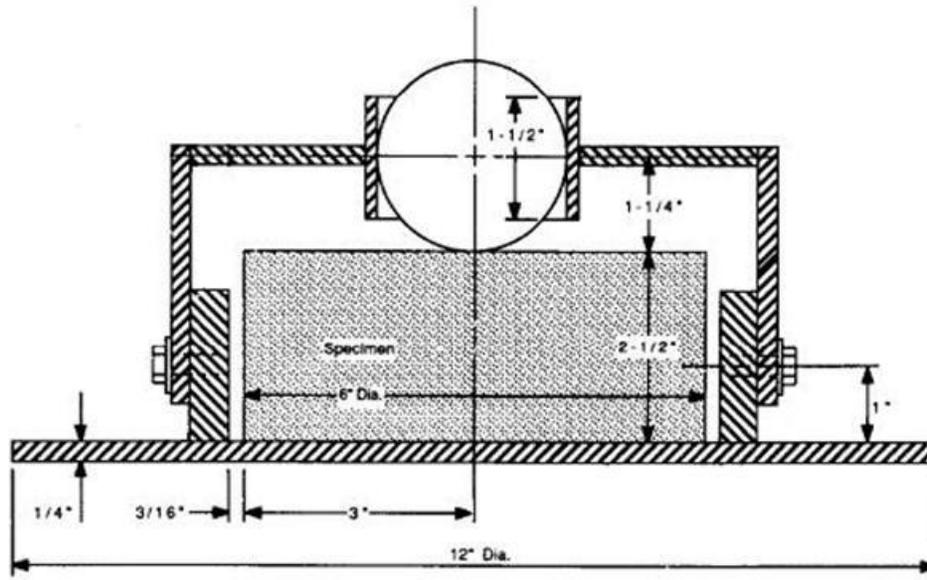


Figura 1.8 Esquema del dispositivo para la prueba de impacto según (ACI544.2R, 1989)

La falla completa ocurre cuando se llega a aplicar el número de golpes necesarios para extender las grietas lo suficiente, de tal forma que la muestra llega a tocar los extremos del molde de acero sobre el cual es colocado la muestra, para llevar a cabo la prueba. Por lo tanto, la resistencia al impacto último (RIU) corresponde al número total de golpes necesarios para iniciar y propagar las grietas hasta la falla última.

Para las muestras se utilizan 3 cilindros, por lo que se obtienen 12 muestras para cada una de las mezclas, como se puede observar en la Figura 1.9.

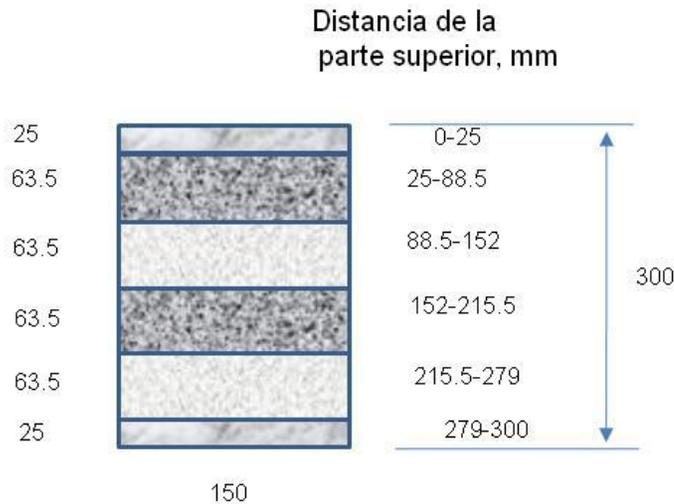


Figura 1.9 Esquema de cortes para la prueba de Resistencia al Impacto

Para llevar a cabo la prueba, se mandó a hacer una placa para sostener al espécimen de concreto, y para el peso que se dejaba caer, se empleó un pisón el cual cumple con los requisitos del peso (ACI544.2R, 1989). El peso de la masa de impacto corresponde a un martillo Proctor Modificado que cumple con los requisitos de la norma (ASTMD1557), el cual se emplea para pruebas de consolidación en suelos según se indica en la norma, y es de 4.54 kg. La altura de caída para la aplicación de los golpes de impacto fue de 457 mm (18"). En la Figura 1.10 se puede observar el equipo utilizado para desarrollar la prueba de impacto.



Figura 1.10 Equipo de la prueba de impacto

1.3.6 Contracción por secado

La rápida pérdida del agua interna del concreto recién colocado en los moldes, es causa principal de la contracción plástica que éste experimenta en sus primeras horas de edad. En condiciones ambientales ordinarias, el concreto después de fraguado sigue expuesto a perder más agua por efecto de la evaporación y por el consumo debido a la hidratación del cemento, y esta reducción de agua, que progresa paulatinamente con la edad del concreto, es motivo de que éste se contraiga gradualmente a medida que endurece, como consecuencia de un fenómeno que se denomina contracción por secado.

Cuando el concreto es expuesto a su ambiente de servicio tiende a alcanzar un equilibrio con ese ambiente. Si el medio ambiente es una atmósfera seca, la superficie expuesta del concreto pierde agua por evaporación. La velocidad de evaporación dependerá de la humedad relativa, la temperatura, la velocidad del viento, la relación agua-cemento y el área de la superficie expuesta del concreto (IMCYC, Contracción por secado del concreto, 2006).

Algunas de las medidas que pueden tomarse para reducir la contracción por secado del concreto incluyen:

- Uso de un mínimo contenido de agua (consistente con los requisitos de colocación y acabado).
- Empleo de la fracción de volumen más alta posible de agregado de buena calidad, y tamaño máximo posible del agregado.
- Uso de cemento de contracción compensada cuando pueda disponerse de éste.
- Utilizando aditivos que no incrementen la contracción por secado; por ejemplo, evitar el uso de los que contienen cloruro de calcio.
- Asegurándose de que el concreto sea apropiadamente colocado, compactado y curado.

Para las pruebas de contracción por secado se fabricaron barras de 7.5 X 7.5 X 28 cm, y el procedimiento de moldeado de estas barras se lleva a cabo de acuerdo con la norma ASTM C 157. Para la preparación de los moldes, se arman estos y se aprietan los tornillos, colocando los índices utilizando un comparador de medición, para determinar la variación de longitud en cada una de las barras, como se puede observar en la Figura 1.11.



Figura 1.11 Moldes para las barras de contracción por secado

El moldeado de las barras se llevó a cabo en dos capas y se vibró en una mesa vibradora por 25 segundos. Las barras son desmoldadas a las 24 horas y se realiza la medición de su longitud antes de ser sumergidas en un recipiente con agua saturada con cal, manteniéndolas en este estado durante 28 días, cuando son retiradas y llevadas a la cámara seca en donde se mantendrán a una temperatura entre 20 y 27.5°C, con una humedad relativa no menor del 50%. Las lecturas son tomadas en esta cámara durante todos los días con la ayuda del comparador de longitudes, calibrando el aparato antes de llevar a cabo las mediciones.

En la Figura 1.12 se puede observar el dispositivo empleado, para determinar la contracción por secado.



Figura 1.12 Dispositivo para la prueba de contracción por secado

CAPÍTULO 6

1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.1 PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO

Para el caso de las primeras mezclas de concreto fabricadas con agregado de 3/4", de la M1 a la M4, el revenimiento muestra una ligera disminución conforme se incrementa la cantidad de fibra en la mezcla como se observa en la Tabla 1.1, sin embargo se pudo hacer el moldeado de los especímenes. La trabajabilidad se puede afectar con altos consumos de fibra y bajas relaciones agua/cemento, y esto se puede corregir añadiendo una dosis adecuada de un superplastificante para renovar la trabajabilidad perdida, como es el caso de este trabajo, que para la mezcla M4 con 5 kg/m³ de fibra se añadió un superplastificante para alcanzar el revenimiento deseado (Glenium 3150 SR). Por otro lado, el revenimiento depende principalmente de la absorción de agua y porosidad de los agregados, contenido de agua en la mezcla, cantidad de agregados fino y grueso en la mezcla, forma y superficie de los agregados, por lo que podría no ser suficiente la adición de un superplastificante, sino además podría ser necesario modificar el proporcionamiento de la mezcla para conseguir una adecuada trabajabilidad.

El peso unitario no presenta variación significativa cuando se incorpora las fibras a la mezcla. Así por ejemplo, el peso unitario para la mezcla M1, de referencia sin fibra, es 2281kg/m³, y para las mezclas con fibra (M2 a M4) es de 2272 kg/m³, en promedio.

El contenido de aire para la mezcla M1 sin fibra fue de 2.0% y para las mezclas con fibra (M2 a M4) fue de 2.3%, en promedio. Los valores se consideran como normales para ambas mezclas, lo que puede indicar que no hay efecto significativo por la adición de la fibra.

Tabla 1.1 Propiedades en estado fresco de las mezclas con grava de 3/4" y arena sin lavar

MEZCLA	REVENIMIENTO, CM	PESO UNITARIO, KG/M ³	% DE AIRE
M1 (0 kg/m ³ de fibra)	12.0	2281	2.0
M2 (1 kg/m ³ de fibra)	9.9	2271	2.4
M3 (3 kg/m ³ de fibra)	8.7	2280	2.2
M4 (5 kg/m ³ de fibra)	9.8	2266	2.2

Para el caso de las últimas mezclas de concreto fabricadas con agregado de 3/8", de la M5 a la M8, se puede observar que se presenta una disminución en el revenimiento,

debido a la incorporación de las fibras. Sin embargo, se puede observar que se encuentra dentro de los valores establecidos, y por lo mismo fue posible llevarse a cabo el vaciado y moldeado de los especímenes.

El peso unitario no presenta variación significativa cuando se incorpora las fibras a la mezcla. El peso unitario para la mezcla M5, de referencia sin fibra, es 2238 kg/m^3 , y para las mezclas con fibra (M6 a M8) es de 2247 kg/m^3 , en promedio.

El contenido de aire para la mezcla M5 sin fibra fue de 3.4% y para las mezclas con fibra (M6 a M8) fue de 2.7%, en promedio. Los valores se consideran normales para ambas mezclas, lo que puede indicar que no hay efecto significativo por la adición de la fibra, sin embargo la diferencia es un poco mayor que para el caso de las mezclas con agregado de 3/4", En la Tabla 1.2, se observan las propiedades de las mezclas de 3/8".

Tabla 1.2 Propiedades en estado fresco de las mezclas con grava de 3/8" y la arena lavada

MEZCLA	REVENIMIENTO, CM	PESO UNITARIO, KG/M^3	% DE AIRE
M5 (0 kg/m^3 de fibra)	10	2238	3.4
M6 (1 kg/m^3 de fibra)	10.7	2249	2.8
M7 (3 kg/m^3 de fibra)	9.2	2257	2.5
M8 (5 kg/m^3 de fibra)	7.1	2234	2.8

1.1.1 Contracción Plástica

La Figura 1.1 muestra la configuración de la prueba. Las condiciones del ambiente se mantuvieron de 20° a 25° de temperatura, 35% a 45% de humedad relativa y una velocidad de viento de 4 m/s. El objetivo es determinar un índice de grieta, el cual se calcula como el promedio de los anchos de grieta sobre la sección 1 y la sección 2. En la Figura 1.2 se puede observar un esquema del desarrollo de las grietas durante la prueba.



Figura 1.1 Configuración de la prueba

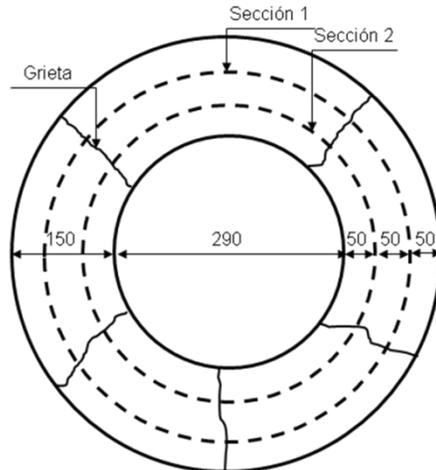


Figura 1.2 Esquema de desarrollo de grietas

A continuación se muestran los resultados obtenidos para las 8 mezclas.

Tabla 1.3 Índice de grieta por contracción plástica

MEZCLAS	NÚMERO DE GRIETAS	ÍNDICE DE GRIETA (mm)
	ANILLO 1 – ANILLO 2	
Grava 3/4"		
M1 (0 kg/m ³ de fibra)	9-9	0.23
M2 (1 kg/m ³ de fibra)	4-3	0.18
M3 (3 kg/m ³ de fibra)	1-1	0.08
M4 (5 kg/m ³ de fibra)	0-0	-
Grava 3/8"		
M5 (0 kg/m ³ de fibra)	5-3	0.11
M6 (1 kg/m ³ de fibra)	2-1	0.07
M7 (3 kg/m ³ de fibra)	1-1	0.04
M8 (5 kg/m ³ de fibra)	0-0	-

Con respecto al índice de grieta, se puede observar en la Tabla 1.3, que a medida que se incrementa el contenido de fibra de 0 a 5 kg/m³, la presencia de fibras permite que este índice de grieta sea menor. El índice de grieta varía de 0.23 a 0, y de 0.11 a 0, para las mezclas con agregado de 3/4" y 3/8" y consumos de fibra entre 0 y 5 kg/m³. Los valores son menores en el caso de las mezclas con agregado de 3/8", lo que indica que las grietas presentaron menor espesor, lo cual era de esperar.

Se puede observar en la Tabla 1.3, que se obtuvo una reducción cercana al 62% del número de grietas para una dosificación de 1 kg/m³ de fibra; y del 100% del número de grietas para los consumos de fibra de 3 kg/m³ y 5 kg/m³, y agregado de 3/4" y 3/8", respectivamente.

Se puede observar en el Anexo 7 los resultados de la aparición de grietas para cada una de las mezclas, así como la longitud e índice de grieta que presentó cada uno de los anillos.

Otros estudios comparables de otras investigaciones reportan resultados de que existe una reducción del número de grietas del orden de la tercera parte cuando se adiciona 1 kg/m^3 de una fibra sintética de 38 mm de longitud, con agregado de 19.0 mm (3/4") (Dahl, 1985). También se tiene una reducción del número de grietas del orden de 60% y 100% cuando se añade 0.1% y 0.5% de fibra de 25 mm de longitud (equivale aproximadamente a 1 y 3 kg/m^3 de fibra) con agregado de 10 mm (3/8") (Banthia y Cheng Yan, 2000). Y también del 60% y entre 85% y 100% de reducción del número de grietas cuando se añade 0.1% y 0.30% de una fibra de 18 mm de longitud usando agregado de 12 mm (Senthilkumar y Natesan, 2004).

Por otro lado, existe información bibliográfica de estudios que demuestran que la fibra sintética, en especial las de polipropileno, contribuye significativamente en la reducción de la aparición de grietas en el concreto, en comparación con las fibras metálicas (A. Sivakumar y Manu Santhanam, 2007), cuando se usaron fibras de polipropileno de 20 mm de longitud, 0.9 de densidad, una dosis de 0.5% de fibra y agregados de 10 y 20 mm, comparadas con fibras de acero (30mm, densidad 7.8, 0.5% de fibra), de vidrio (6 mm, densidad 2.72, 0.5% de fibra) y poliéster (12 mm, densidad 1.35, 0.5% de fibra). Estos resultados contribuyen al mayor uso de este tipo de fibras en la industria de la construcción, en especial en pisos industriales.

1.2 PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO

1.2.1 Resistencia a compresión

Bajo compresión uniaxial, el modo de falla de los cilindros presenta una fisuración típica, caracterizada por la formación de grietas paralelas a la dirección de la carga, como se muestra en la Figura 1.3 y en la Figura 1.4. Como se observa, a medida que se incrementa el contenido de la fibra, entre 3 y 5 kg/m^3 , la presencia de las fibras permite que, en la falla, el cilindro no se destruya completamente, como es el caso de la mezcla sin fibra, donde el espécimen se destruye por completo.

Los resultados se presentan en la Tabla 1.4 y en la Tabla 1.5 y son el promedio de tres pruebas.

Existe una disminución de la resistencia a compresión a medida que se incrementa la cantidad de la fibra en la mezcla. Esto puede estar asociado a que las fibras sintéticas son un material hidrofóbico debido a su estructura química lo que genera una baja

adherencia fisicoquímica de las fibras con la pasta de cemento, afectando negativamente su dispersión en la matriz.

La disminución de la resistencia es del 5% para una dosis de 1 kg/m^3 , sin embargo, a medida que se incrementa la dosis a 3 kg/m^3 , el porcentaje de disminución aumenta a cerca de 9%, como se observa en la Tabla 1.4 que presenta los resultados de las mezclas con grava de $3/4''$. También puede ser que gran parte de la matriz está ocupada por un material con más vacíos o a causa de insuficiente compactación debido a la presencia de la fibra, lo que genera el descenso de la resistencia. Al parecer la incorporación del superplastificante favorece y mejora la dispersión de la fibra en la matriz dando como resultado un leve incremento de la resistencia como se observa en la mezcla M4 en la que se añadió el superplastificante.

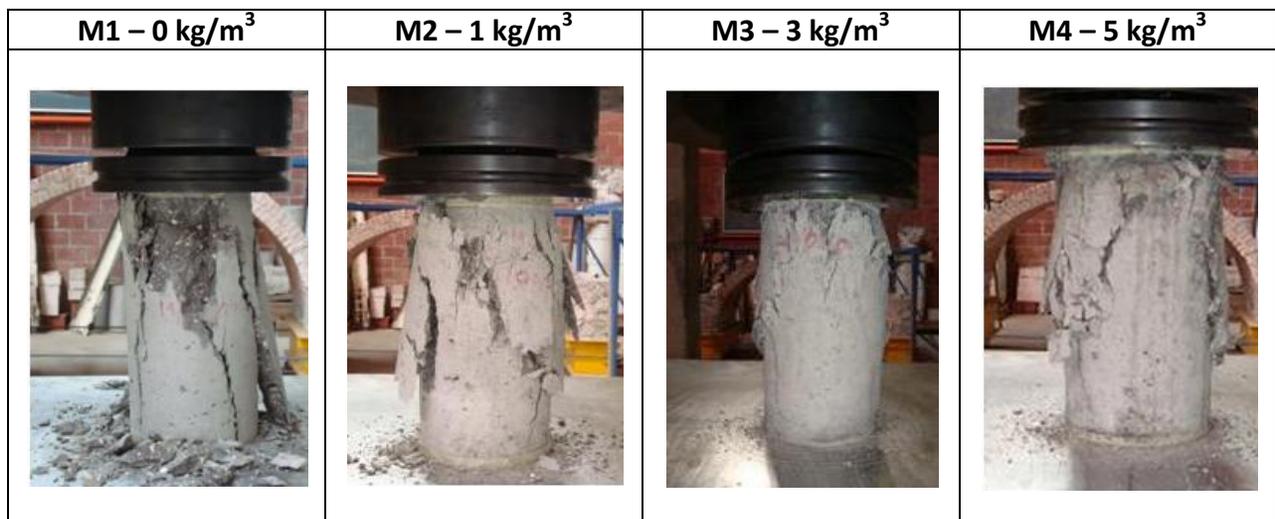


Figura 1.3 Modo de falla de las muestras de resistencia a compresión para las mezclas con grava de $3/4''$

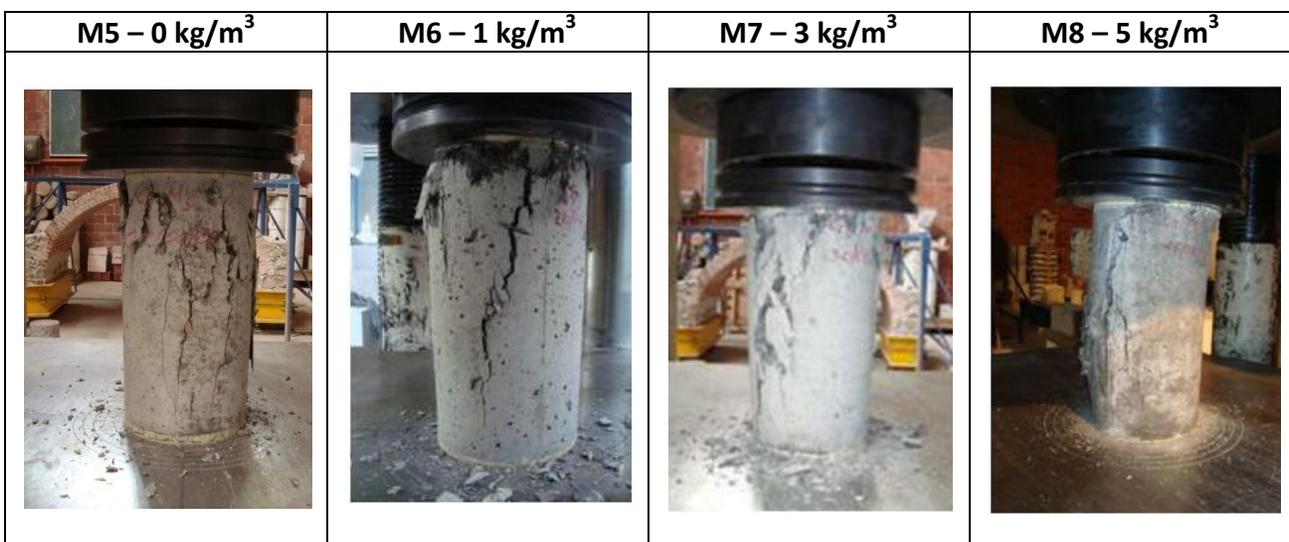


Figura 1.4 Modo de falla de las muestras de resistencia a compresión para las mezclas con grava de $3/8''$

La relación entre la resistencia a compresión de 7 a 28 días fue de 0.65 para la mezcla M1 sin fibras, mientras que para las mezclas con fibra (M2 a M4) fue de 0.70, en promedio. Es decir, no existe variación importante en el desarrollo de resistencias a esas edades, debido a la incorporación de las fibras.

Tabla 1.4 Resistencia a compresión de las mezclas con grava de 3/4" y arena sin lavar

ID	RESISTENCIA A COMPRESIÓN kg/cm ²		F _{C7 DÍAS} /F _{C28DÍAS}
	7 días	28 días	
M1 (0 kg/m ³ de fibra)	238	366	0.65
M2 (1 kg/m ³ de fibra)	241	346	0.70
M3 (3 kg/m ³ de fibra)	230	334	0.69
M4 (5 kg/m ³ de fibra)	252	365	0.69

Tabla 1.5 Resistencia a compresión de las mezclas con grava de 3/8" y arena lavada

ID	RESISTENCIA A COMPRESIÓN kg/cm ²		F _{C7 DÍAS} /F _{C28DÍAS}
	7 días	28 días	
M5 (0 kg/m ³ de fibra)	251	350	0.72
M6 (1 kg/m ³ de fibra)	264	352	0.75
M7 (3 kg/m ³ de fibra)	243	336	0.72
M8 (5 kg/m ³ de fibra)	245	334	0.73

Para las mezclas con agregado de 3/8", se observa que la disminución de la resistencia es de 5% para un consumo de fibra de 5 kg/m³, por lo que se puede decir que el añadir fibras sintéticas al concreto reduce la resistencia a compresión, aunque esta reducción no es importante.

La relación entre la resistencia a compresión a 7 y 28 días fue de 0.72 para la mezcla M5 sin fibras, mientras que para las mezclas con fibra (M6 a M8) fue de 0.73, en promedio. Es decir, no existe variación importante en el desarrollo de resistencias a esas edades, debido a la incorporación de las fibras para las mezclas con grava de 3/8".

En comparación con otros estudios, se tiene que no hay una variación significativa en la resistencia a compresión conforme se incorpora la fibra a las mezclas, con porcentajes volumétricos de fibra de 0.1 a 2% (ACI544.1R, 1996).

En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los resultados de todos los especímenes que se realizaron para cada una de las pruebas.

1.2.2 Módulo elástico y relación de Poisson

Se puede observar que para las mezclas de grava de 3/4", los módulos elásticos son similares para las mezclas con fibra y la mezcla de referencia. También se puede ver en la Tabla 1.6 los resultados del módulo elástico, los cuales son el promedio de 3 pruebas que se realizaron en el laboratorio, y se encuentra que los valores están dentro del rango de valores comúnmente registrados para concretos convencionales. Se tiene un valor promedio de módulo elástico para estas mezclas de 243,000 kg/cm². En la Tabla 1.6, también se incluye la relación entre el módulo elástico y la raíz cuadrada de su resistencia a compresión a los 28 días, y se observa que presenta un valor cercano al que se obtiene para concretos convencionales, el cual se encuentra alrededor de 14,000

La relación de Poisson que relaciona la deformación transversal con respecto a su deformación axial, fue en promedio, de 0.22 para las mezclas con fibra, mientras que para la mezcla de referencia sin fibra fue de 0.26. Los valores obtenidos están dentro del rango esperado (entre 0.11 y 0.27).

La deformación unitaria correspondiente al esfuerzo máximo es en promedio, 2.6×10^{-3} para la mezcla de referencia y para las mezclas con fibra, lo cual representa un valor normal para concretos convencionales, por lo que se ve, que al agregarle fibras a las mezclas no se afecta tampoco a la deformación el esfuerzo máximo.

Tabla 1.6 Resistencia compresión, módulo elástico y relación de Poisson para las mezclas con grava de 3/4"

ID	RESISTENCIA A COMPRESIÓN kg/cm ²	MÓDULO ELÁSTICO kg/cm ²	RELACIÓN DE POISSON 28 días	DEFORMACIÓN UNITARIA MÁXIMA ϵ_o	$E_c/\sqrt{f'_c}$
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

Para las mezclas de concreto con grava de 3/8" se puede observar que los módulos elásticos, también se encuentran dentro de los valores registrados para concretos convencionales, como se puede observar en la Tabla 1.7. Se tiene un valor promedio de módulo elástico de 230,00 kg/cm². El módulo elástico puede variar en función de diversos factores tales como el estado de humedad y de compactación del concreto, la relación agua/cemento y edad de la pasta y las características de los agregados, principalmente (CFE, 1994).

Tabla 1.7 Resistencia compresión, módulo elástico y relación de Poisson para las mezclas con grava de 3/8"

ID	RESISTENCIA A COMPRESIÓN kg/cm ²	MÓDULO ELÁSTICO kg/cm ²	RELACIÓN DE POISSON 28 días	DEFORMACIÓN UNITARIA MÁXIMA ε _o	E _c /√f' _c
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

La relación de Poisson para la mezcla de referencia es de 0.2, mientras que para las mezclas con fibra es en promedio de 0.23, por lo que se puede decir que los valores obtenidos para las mezclas con grava de 3/8", se encuentran dentro de los valores establecidos para concretos convencionales.

La deformación unitaria correspondiente al esfuerzo máximo es en promedio 2.9×10^{-3} para la mezcla de referencia y para la mezclas con fibra, lo cual se encuentra dentro de los datos registrados para concreto convencionales.

1.2.3 Resistencia a tensión por flexión

El mayor incremento se alcanzó cuando se añadió 5 kg/m³ de fibra. La Tabla 1.8 también muestra la relación entre la resistencia a flexión y su correspondiente resistencia a compresión para las mezclas con agregado de 3/4". En promedio, a 28 días de edad, la resistencia a flexión es 11% de su resistencia a compresión para las mezclas con fibra, y casi 10% para la mezcla sin fibra. Además, la tabla presenta la expresión que relaciona la resistencia a flexión con la raíz cuadrada de su resistencia a compresión. Evidentemente, el coeficiente que relaciona estos valores es ligeramente mayor en el caso de las mezclas con fibra, de 2.1, en comparación con 1.8 para la mezcla sin fibras.

Tabla 1.8 Resistencia a tensión por flexión de las mezclas con grava de 3/4" y arena sin lavar

ID	RESISTENCIA A COMPRESIÓN kg/cm ²	RESISTENCIA A FLEXIÓN kg/cm ²	f _f /f _c %	f _f /√f' _c
M1	366	35	9.6	1.83
M2	346	39	11.3	2.10
M3	334	39	11.7	2.13
M4	365	40	11.0	2.10

La Tabla 1.9 muestra la relación entre la resistencia a flexión y su correspondiente resistencia a compresión para las mezclas con agregado de 3/8". En promedio, a 28 días de edad, la resistencia a flexión es 12% de su resistencia a compresión para las mezclas con fibra, y casi 14% para la mezcla sin fibra, esto pudo deberse al vibrado de los elementos. Además, la tabla presenta la expresión que relaciona la resistencia a flexión con la raíz cuadrada de su resistencia a compresión. El coeficiente que relaciona estos valores es del mismo orden para todas las mezclas. Es evidente que se obtiene mayor resistencia a flexión con las mezclas de agregado de 3/8", debido al mejor reacomodo de los materiales.

Tabla 1.9 Resistencia a tensión por flexión de las mezclas con grava de 3/8" y la arena lavada

ID	RESISTENCIA A COMPRESIÓN kg/cm ²	RESISTENCIA A FLEXIÓN kg/cm ²	f_f/f_c %	$f_f/\sqrt{f_c}$
M5	350	48	13.7	2.56
M6	352	35	9.9	1.89
M7	336	41	12.2	2.22
M8	334	43	12.9	2.34

1.2.4 Resistencia a tensión por compresión diametral

Los cilindros de concreto de referencia presentan una falla típica que se caracteriza por la rotura repentina del cilindro, que se considera como falla frágil; mientras que los cilindros de concreto con fibra presentan una falla dúctil típica. (ver Figura 1.5.)

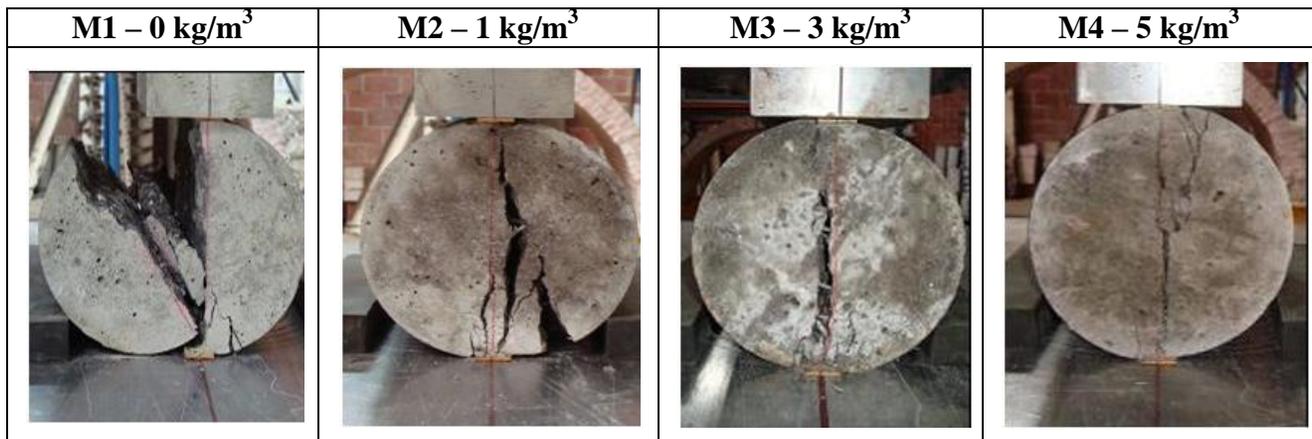


Figura 1.5 Modo de falla de las muestras de resistencia a compresión diametral para las mezclas con grava de 3/4"

Como se observa en la Tabla 1.10, la resistencia a tensión determinada mediante la prueba de compresión diametral en cilindros, muestra valores menores en comparación con los que se determinan bajo la prueba de resistencia a flexión. Sin embargo, no se observa diferencia entre los valores encontrados para las mezclas sin fibra y con fibra.

En promedio, la resistencia a tensión por compresión diametral es 30 kg/cm^2 , para las mezclas con grava de $3/4''$. En promedio, la resistencia a tensión por compresión diametral de las mezclas con fibra es de 8.7% de su resistencia a compresión correspondiente, a 28 días. La Tabla 1.10 presenta la relación entre la resistencia a tensión por compresión diametral con su correspondiente raíz cuadrada de la resistencia a compresión. Los valores encontrados son bastantes similares para ambos tipos de mezclas, con valores de 1.52 para las mezclas sin fibra y de 1.62 para las mezclas con fibra. Las fallas que presentan los cilindros con grava de $3/8''$, se pueden observar en la Figura 1.6. Las fibras cambian al tipo de falla, de frágil a dúctil.

Tabla 1.10 Resultado de las pruebas de resistencia a tensión por compresión diametral de las mezclas con grava de $3/4''$ y arena sin lavar

ID	RESISTENCIA A COMPRESIÓN kg/cm^2	RESISTENCIA A TENSIÓN kg/cm^2	f_t/f_c %	$f_t/\sqrt{f_c}$
M1	366	29	7.9	1.52
M2	346	30	8.7	1.61
M3	334	29	8.7	1.59
M4	365	32	8.8	1.67

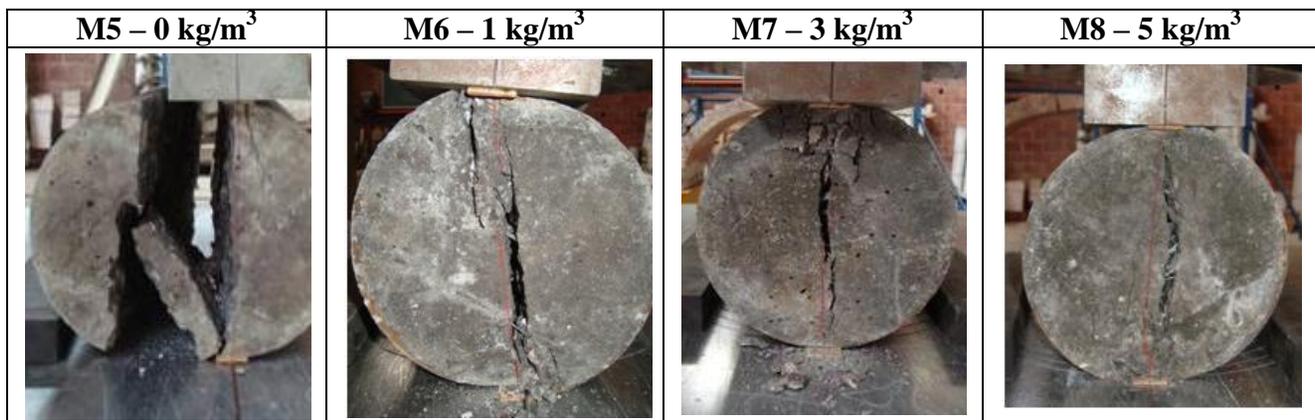


Figura 1.6 Modo de falla de las muestras de resistencia a compresión diametral para las mezclas con grava de $3/8''$

En la Tabla 1.11, se puede observar los resultados para las mezclas con grava de $3/8''$. En promedio, la resistencia a tensión por compresión diametral es casi 32 kg/cm^2 , para las mezclas con grava de $3/8''$. En promedio, la resistencia a tensión por compresión diametral de las mezclas con fibra es de 9.2% de su resistencia a compresión correspondiente, a 28 días. La Tabla 1.11 presenta la relación entre la resistencia a tensión por compresión diametral con su correspondiente raíz cuadrada de su resistencia a compresión. Los valores encontrados son bastantes similares para ambos tipos de mezclas, con valores de 1.80 para las mezclas sin fibra y de 1.69 para las mezclas con fibra.

Tabla 1.11 Resultado de las pruebas de resistencia a tensión por compresión diametral de las mezclas con grava de 3/8" y la arena lavada

ID	RESISTENCIA A COMPRESIÓN kg/cm ²	RESISTENCIA A TENSIÓN kg/cm ²	f_t/f_c %	$f_t/\sqrt{f_c}$
M1	350	34	9.6	1.80
M2	352	31	8.7	1.63
M3	336	30	9.1	1.66
M4	334	33	9.9	1.80

1.2.5 Resistencia al impacto

Los resultados para las mezclas con agregado de 3/4" y 3/8" se presentan en la Tabla 1.12 y en la Tabla 1.13.

Es posible ver en los resultados que la incorporación de la fibra tuvo un efecto positivo en la resistencia al impacto. Es evidente que, a mayor contenido de fibras por metro cúbico, mayor es la resistencia al impacto, para el mismo nivel de resistencia a compresión, que es del orden de 350 kg/cm².

La resistencia al impacto para la aparición de la primera grieta (RIPG), la cual es dada como el número de golpes necesario para generar la primera fisura es casi el doble cuando se incorpora 5 kg/m³ de fibra como se puede observar en la Tabla 1.12. Del mismo modo, la resistencia al impacto para la falla total, definida como la resistencia al impacto último (RIU), dada como el número de golpes necesario para generar la falla total es más del doble cuando se incorpora 5 kg/m³ de fibra, para el caso de las mezclas con grava de 3/4".

Tabla 1.12 Resultado de las pruebas de resistencia al impacto de las mezclas con grava de 3/4" y arena sin lavar

ID	RESISTENCIA AL IMPACTO (RI)	
	NÚMERO DE GOLPES	
	PRIMERA GRIETA (RIPG)	ÚLTIMA GRIETA (RIU)
M1	347	350
M2	225	255
M3	446	490
M4	693	764

La Figura 1.7, muestra la falla provocada al aplicar la prueba de resistencia al impacto, de las muestras ensayadas para las mezclas con grava de 3/4". Se puede observar que en general se presentan 3 grietas radiales, y en algunos casos se presentó una falla diametral, probablemente porque las muestras presentaron menor capacidad

para absorber la energía. En general las muestras que presentaron este tipo de falla tuvieron una cantidad menor de golpes.

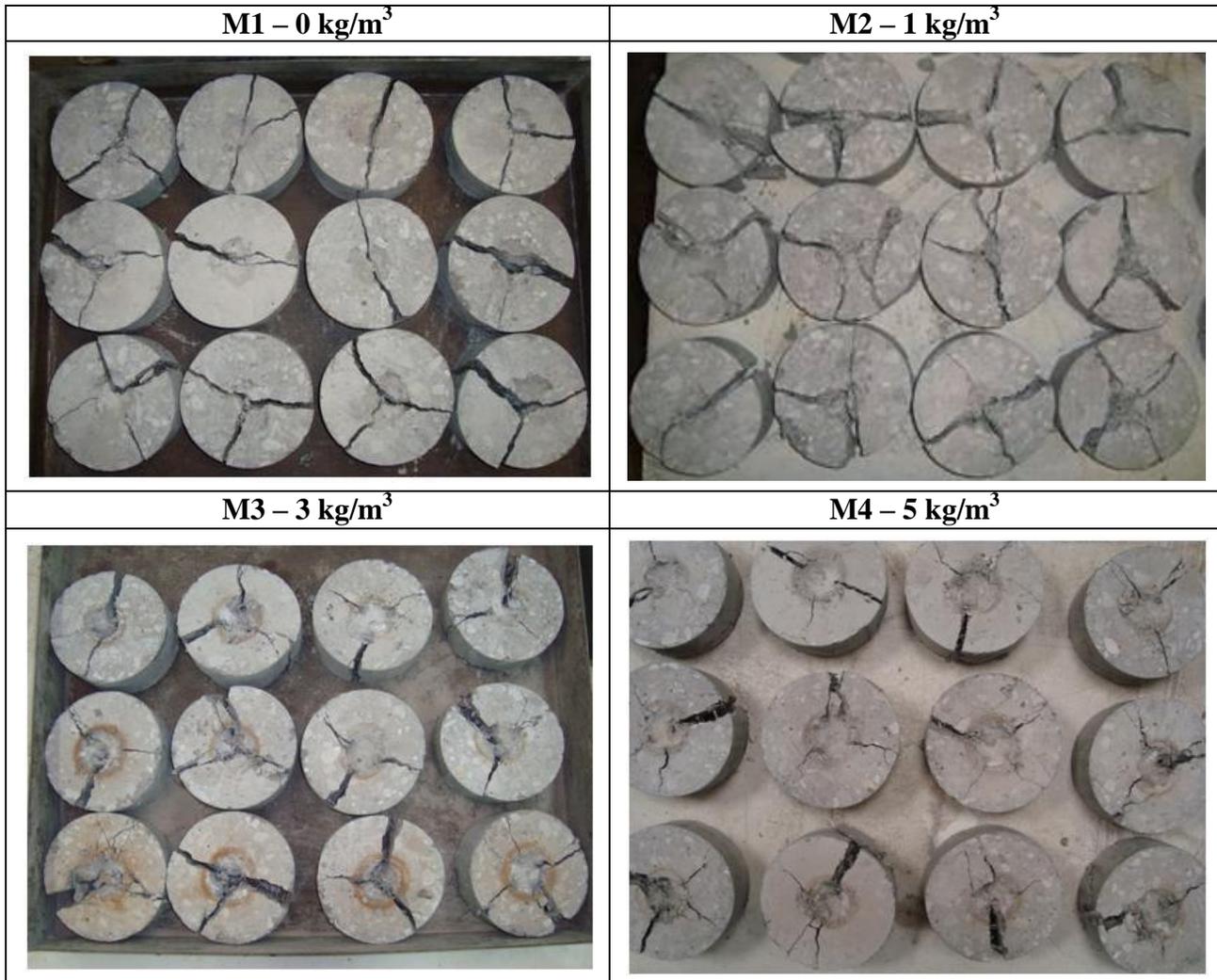


Figura 1.7 Modo de falla de las muestras de resistencia al impacto de las mezclas con grava de 3/4"

En la Tabla 1.13 se pueden observar los resultados obtenidos para las mezclas con grava d 3/8", y se puede ver que los resultados son mayores en comparación a los resultados mostrados en la Tabla 1.12, debido probablemente a que la mezcla con agregado de 3/8" presenta un mejor acomodo de las fibras entre sus partículas, permitiendo absorber mayor energía a la hora del impacto. Se puede ver que conforme se va añadiendo fibra a las mezclas, el concreto requiere de un mayor número de golpes para llegar a la resistencia al impacto última (RIU).

Tabla 1.13 Resultado de las pruebas de resistencia al impacto de las mezclas con grava de 3/8" y arena lavada

ID	RESISTENCIA AL IMPACTO (RI)	
	NÚMERO DE GOLPES	
	PRIMERA GRIETA (RIPG)	ÚLTIMA GRIETA (RIU)
M1	553	555
M2	639	667
M3	706	776
M4	815	969

A continuación en la Figura 1.8 se puede observar las fallas de las muestras originadas por la aplicación de la prueba para determinar su resistencia al impacto de las mezclas con grava de 3/8".

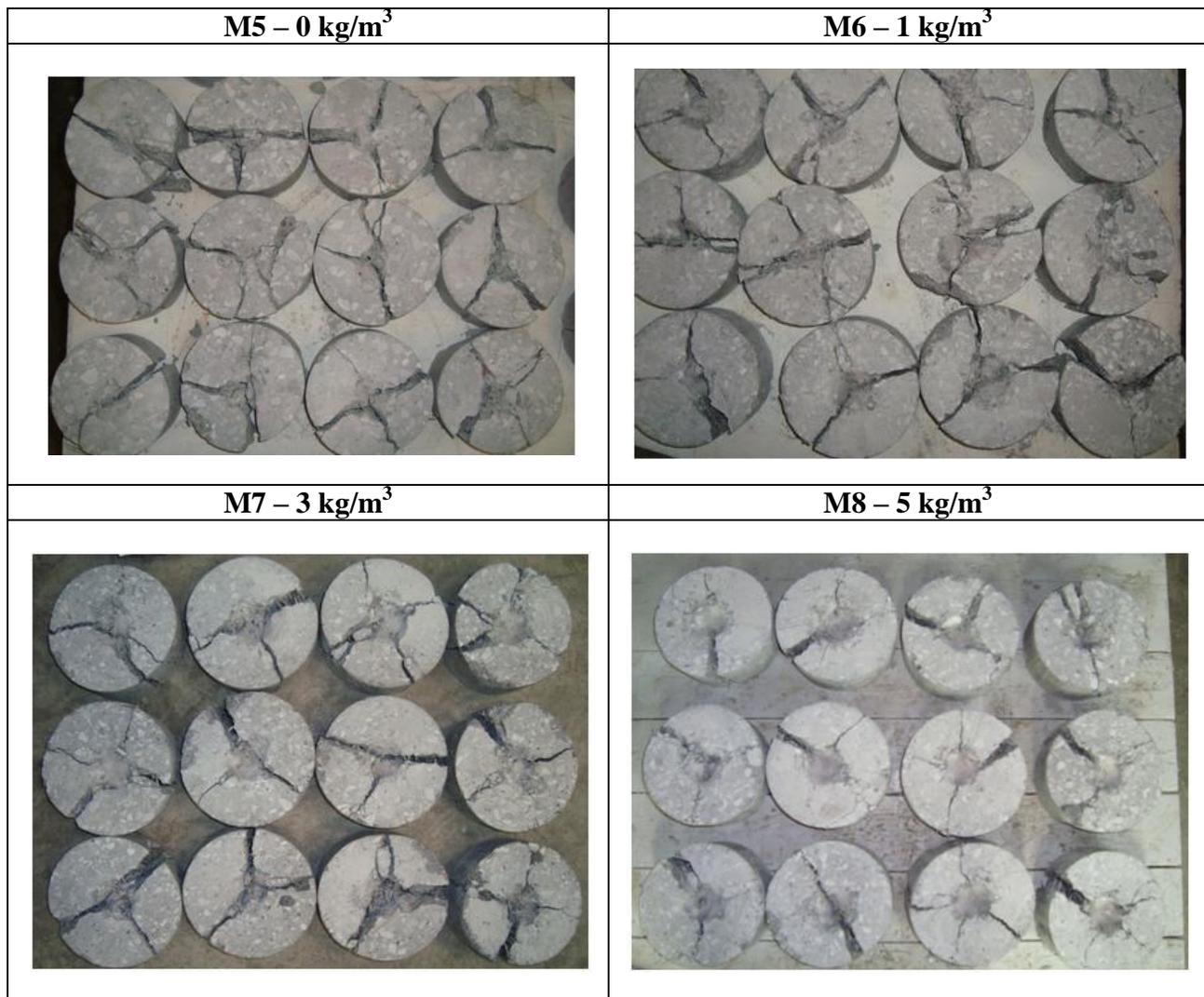


Figura 1.8 Modo de falla de las muestras de resistencia al impacto de las mezclas con grava de 3/8"

Es evidente el efecto de la inclusión de la fibra en la resistencia al impacto; lo cual puede atribuirse o ser el resultado de una buena dispersión dentro de la matriz de concreto. Esta mejora en la resistencia al impacto y por lo tanto resistencia al agrietamiento, permite obtener un material con propiedades adecuadas para aplicaciones como pisos industriales o en recubrimientos de losas de puentes y otras aplicaciones donde se requiera de estas cualidades

1.2.6 Tenacidad

Los resultados se muestran en la Tabla 1.14 y Tabla 1.15, Figura 1.9 y Figura 1.10.

La Tabla 1.14 muestra los resultados de tenacidad para las mezclas con agregado de 3/4". La tenacidad se incrementa a medida que se incrementa la cantidad de fibra en la mezcla. Esto es más evidente con los mayores valores de índice de tenacidad para los mayores consumos de fibra. Esto quiere decir que a mayor cantidad de fibra el concreto presenta mayor capacidad de absorción de energía.

Se tiene que para la mezcla M4 que contiene 5 kg/m^3 , el índice de tenacidad I_{20} igual a 6.16, es 2.65 veces más alto que el índice de tenacidad I_{20} igual a 2.32 de la mezcla M2 que contiene 1 kg/m^3 , por lo que se observa que se tiene mayor absorción de energía.

Tabla 1.14 Resultado de las pruebas de tenacidad de las mezclas con grava de 3/4" y arena sin lavar

ID	TENACIDAD (JOULES)				ÍNDICES DE TENACIDAD		
	T_{δ}	T_{36}	$T_{5.56}$	$T_{10.56}$	I_5	I_{10}	I_{20}
M2	35.65	62.46	69.82	82.64	1.75	1.96	2.32
M3	27.95	50.08	70.93	99.64	1.79	2.54	3.57
M4	32.08	71.94	119.16	197.11	2.24	3.72	6.16

En la Figura 1.9, se presenta el comportamiento de las mezclas con agregado de 3/4", y se ve que las cargas máximas para todas las curvas son similares, pero su post-pico en la curva se va levantando soportando un poco más de carga, conforme el contenido de fibras va aumentando para cada una de las mezclas.

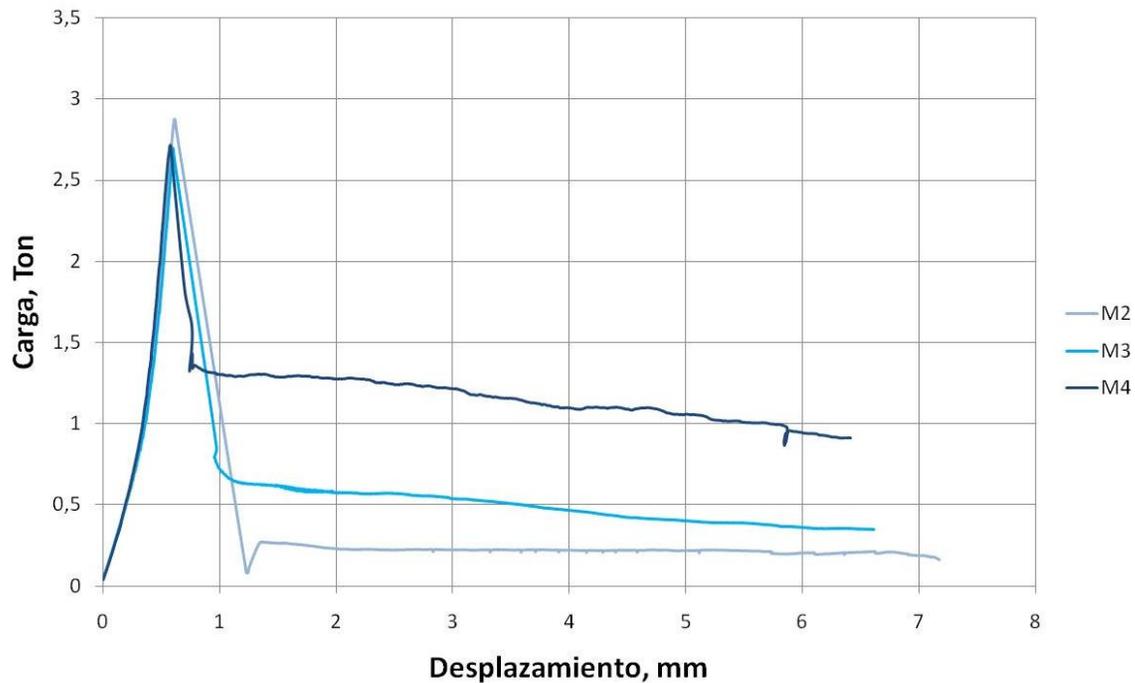


Figura 1.9 Comportamiento carga - desplazamiento para las mezclas con agregado de 3/4"

La Tabla 1.15 muestra los resultados de tenacidad para las mezclas con agregado de 3/8". La tenacidad se incrementa conforme se aumenta la cantidad de fibra en la mezcla. Esto quiere decir que a mayor cantidad de fibra el concreto presenta mayor capacidad de absorción de energía. Se puede observar que para la mezcla M8 que contiene 5 kg/m^3 , el índice de tenacidad I_{20} igual a 10.14, es 3.12 veces más alto que el índice de tenacidad I_{20} igual a 3.25 de la mezcla M6 que contiene 1 kg/m^3 , por lo que se observa que se tiene mayor absorción de energía.

Tabla 1.15 Resultado de las pruebas de tenacidad de las mezclas con grava de 3/8" y la arena lavada

ID	TENACIDAD (JOULES)				ÍNDICES DE TENACIDAD		
	T_{δ}	T_{36}	$T_{5.56}$	$T_{10.56}$	I_5	I_{10}	I_{20}
M6	19.20	39.15	52.69	65.43	2.00	2.62	3.25
M7	5.24	16.20	23.76	36.29	3.10	4.54	6.93
M8	4.87	17.73	29.04	48.19	3.70	6.08	10.14

Es evidente, comparando la Tabla 1.14 y Tabla 1.15, que la tenacidad es mayor para las mezclas con agregado de 3/8", ya que presentan mayor valor para el índice de tenacidad, y en consecuencia mayor absorción de energía.

En la Figura 1.10 se observa el comportamiento de la curva para las mezclas con agregado de 3/8", y se ve que las cargas máximas para todas las curvas son similares, sin embargo, se observa que después del agrietamiento, las curvas se van levantando soportando un poco más de carga. Se tiene que para la mezcla M8 se llega a soportar

después del agrietamiento una carga de 1.6 T, mientras que para la mezcla M4 que contiene la misma cantidad de fibra de 5 kg/m³, la carga que soporta es de 1.2 T, por lo que se observa que se tiene mayor absorción de energía con las mezclas de agregado de 3/8”.

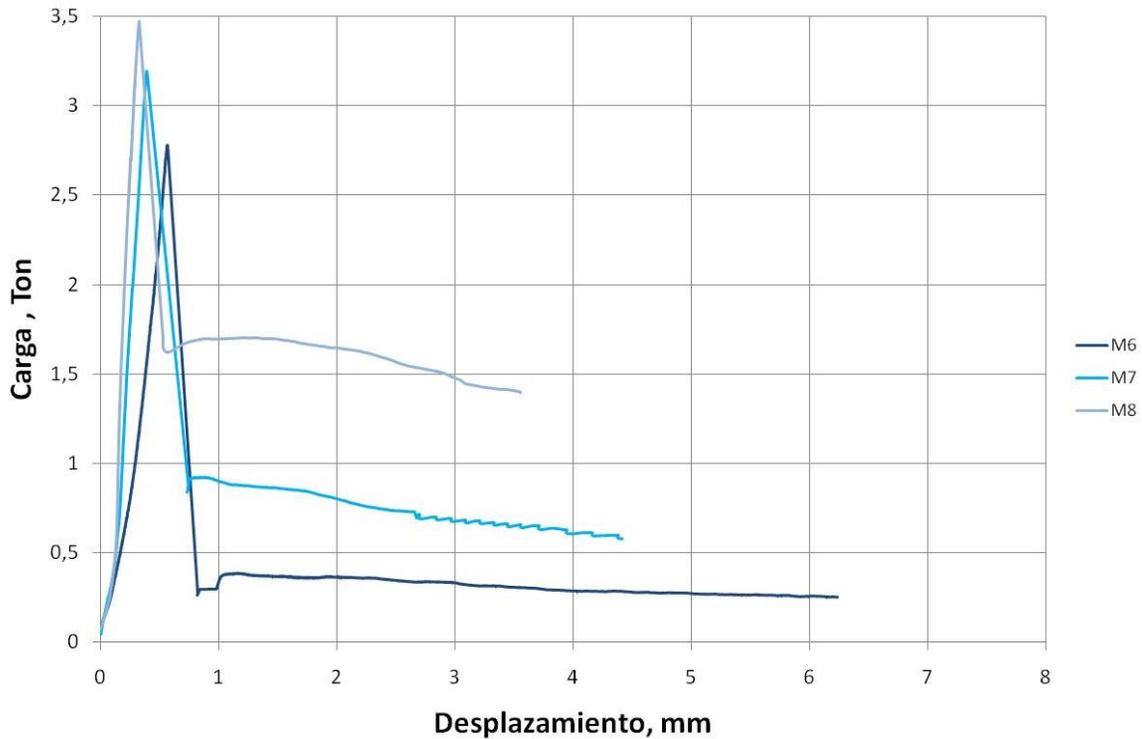


Figura 1.10 Comportamiento carga - desplazamiento para las mezclas con agregado de 3/8"

Existen estudios comparativos sobre el comportamiento de la tenacidad cuando se usan fibras de acero, de vidrio, poliéster y polietileno los cuales demuestran que es posible reemplazar parte de las fibras de acero por fibras no metálicas, en particular de polipropileno y proveer una tenacidad similar al concreto reforzado con fibra de acero (A. Sivakumar, 2007).

1.2.7 Contracción por secado

La Tabla 1.16 presenta los resultados de contracción por secado de las mezclas con grava de 3/4", así como la ecuación para su cálculo en el tiempo. En promedio, la contracción por secado para las mezclas con fibra es de 503×10^{-6} . Se puede observar que la contracción por secado para la mezcla sin fibras es mayor, por lo que se puede ver que conforme se incrementa la cantidad de fibras a la mezcla, se registra una contracción por secado menor. Para reducir la contracción por secado, se puede disminuir el contenido de agua, por lo tanto reducir la relación agua/cemento.

Tabla 1.16 Contracción por secado última de las mezclas con grava de 3/4" y arena sin lavar

ID	$\varepsilon_t = \frac{t^a}{b+t^a}(\varepsilon_c)_u$		
	a	b	$(\varepsilon_c)_u \times 10^{-6}$
M1	1	7,31	558
M2	1	11.3	535
M3	1	16.5	492
M4	1	10.9	483

En la Figura 1.11 se puede observar la contracción por secado de las mezclas M1 a M4, a través del paso del tiempo, el cual está considerado en días a partir de la fecha de inicio de secado.

Figura 1.11 Contracción por secado a través del tiempo para las mezclas con grava de 3/4"

La Tabla 1.17 muestra los resultados de contracción por secado para las mezclas de grava de 3/8". Se puede observar que estos resultados en promedio son menores que los resultados que se obtuvieron para la grava de 3/4", debido a los agregados que se emplearon para estas mezclas. Se tiene como valor promedio para contracción por secado de las mezclas con fibra un valor de 306×10^{-6} . Como se observó en los resultados de contracción plástica, las mezclas con agregado de 3/8" presentan un índice de grieta menor en comparación con las mezclas con agregado de 3/4", por lo que su contracción por secado también es menor.

Tabla 1.17 Contracción por secado última de las mezclas con grava de 3/8" y la arena lavada

ID	$\varepsilon_t = \frac{t^a}{b+t^a}(\varepsilon_c)_u$		
	a	b	$(\varepsilon_c)_u \times 10^{-6}$
M5	1	13.0	466
M6	1	9.15	394
M7	1	5.05	308
M8	1	1.74	217

En la Figura 1.11 se puede observar la contracción por secado de las mezclas M5 a M8, a través del paso del tiempo, el cual está considerado en días a partir de la fecha de secado.

También es posible observar que para la mezcla de 3/4" sin fibra, se obtiene un valor de contracción por secado de 558×10^{-6} , mientras que para la mezcla de 3/8" sin fibra, se registra un valor de 466×10^{-6} , por lo que se observa que es menor, debido a que estas mezclas se realizaron con la arena lavada, la cual contiene menor cantidad de finos, por lo que la contracción es menor.

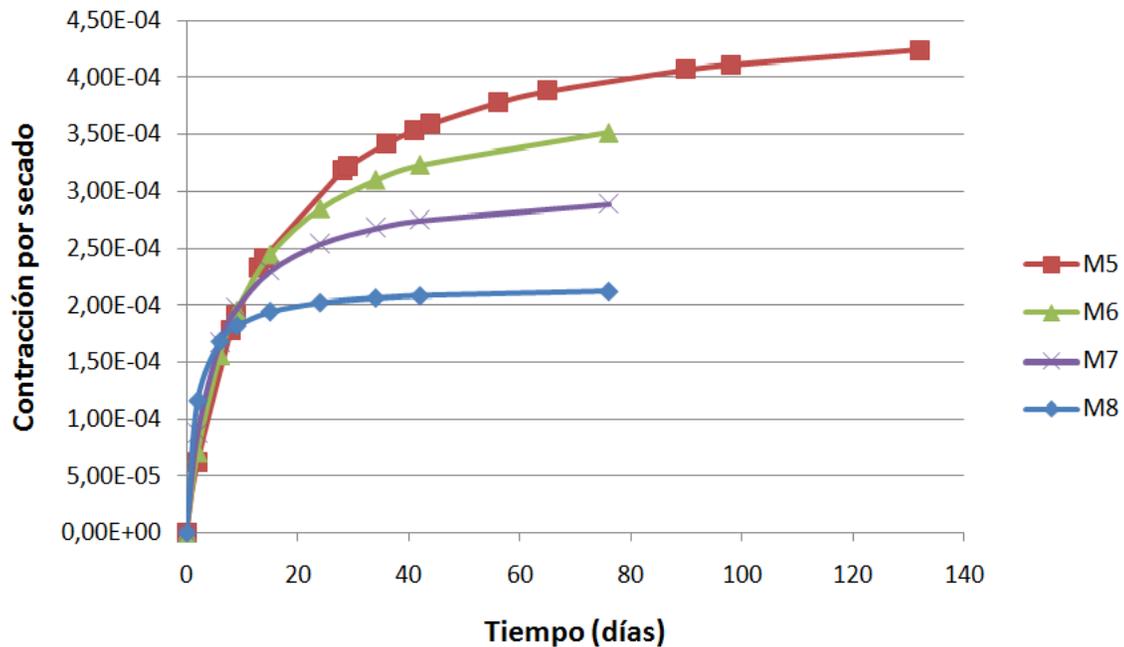


Figura 1.12 Contracción por secado a través del tiempo para las mezclas con grava de 3/8"

CONCLUSIONES

Se determinaron las propiedades en estado plástico de revenimiento, peso unitario, contracción plástica y contenido de aire, así como las propiedades mecánicas de resistencia a compresión, a tensión, a flexión, al impacto, el módulo elástico, la contracción por secado y la tenacidad.

El revenimiento disminuye ligeramente cuando se incorpora la fibra, aunque se puede recuperar la trabajabilidad usando un aditivo superplastificante. El peso unitario y contenido de aire no presentaron cambios.

La contracción plástica, medida por la aparición y medición de fisuras en anillos de concreto sometidas a ambientes de temperatura, humedad relativa y velocidad de viento presenta un cambio conforme se aumenta el contenido de fibra en la mezcla y se tiene que el índice de grieta disminuye a mayor cantidad de fibra en la mezcla. En el caso de las mezclas realizadas con la arena lavada, se observó menor presencia de fisuras, por lo que se registró un índice de grieta menor. Se presenta una reducción en la aparición de grietas conforme se incorpora fibra a la mezcla, obteniéndose una reducción cercana al 62% del para una dosificación de 1 kg/m^3 .

La resistencia a compresión de los concretos con fibra es menor, lo que puede asociarse a su baja adherencia fisicoquímica de las fibras con la pasta de cemento. Los valores encontrados de módulo elástico y relación de Poisson se encuentran dentro de los valores establecidos para concretos normales, así como su deformación unitaria correspondiente al esfuerzo máximo.

La incorporación de la fibra no se ve muy reflejada en la resistencia a flexión a 28 días, sin embargo se observa que al incrementar el contenido de fibra, la tenacidad, la cual es medida como el área bajo la curva carga – desplazamiento, muestra un incremento por lo que se absorbe mayor energía.

Otra característica importante que obtuvo la inclusión de fibras en los elementos, es que se tuvo un efecto positivo en la resistencia al impacto. Observándose que a mayor contenido de fibras, mayor es la resistencia al impacto de los elementos, lo cual presenta una característica importante para el desarrollo de losas industriales.

La contracción por secado última de las mezclas se encuentra en el rango esperado para concreto convencional. Y se observa que cuando se incrementa la cantidad de fibra, la contracción por secado última es menor. Además, se presenta una menor contracción en las mezclas que fueron realizadas con arena lavada, debido a la reducción de finos en las mezclas de concreto.

REFERENCIAS

- A. Sivakumar y Manu Santhanam. (2007). *A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete*. (I. I. Department of Civil Engineering, Ed.) Madras, India.
- A. Sivakumar, M. S. (2007). *Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres*. (I. M. Department of Civil Engineering, Ed.) Chennai, India.
- ACI116. (1990). *"Cement and Concrete Terminology"*. Detroit, Mich.: American Concrete Institute.
- ACI211.1. (1991). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. Reported by ACI Committee 211*.
- ACI544.1R. (1996). *Report on Fiber Reinforced Concrete. Reported by ACI Committee 544*.
- ACI544.2R, C. (1989). *"Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete"*.
- Alhozaimy A., S. P. (1996). *Mechanical Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete and the Effects of Pozzolanic Materials*. . Cement & Concrete Composites .
- ASTMC127. (s.f.). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.
- ASTMC128. (s.f.). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate.
- ASTMC33. (s.f.). Standard Specification for Concrete Aggregates.
- ASTMD1557. (s.f.). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort.
- Banthia y Cheng Yan. (2000). *Shrinkage Cracking in Polyolefin Fiber-Reinforced Concrete*. ACI Materials Journal.
- Banthia, S. M. (1994). "Fiber Reinforced Cementitious Composites: Current Practice and Future Prospects". 144.
- CFE, C. F. (1994). *"Manual de Tecnología del Concreto"*. México: Limusa.
- Chan Yam, J. L., Solís Carcaño, R., & Moreno, E. I. (2003). *Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto*.
- Dahl, P. A. (1985). *Plastic Shrinkage and Cracking Tendency of Mortar and Concrete Containing Fibermesh*. FCB Cement and Concrete Institute, Trondheim.
- Durán Quintal, C. I. (2008). *"Tesis: Refuerzo con bandas de fibras de carbono en columnas cortas de concreto reforzado, estudio exploratorio"*. México.
- Freedman, S. (1974). *Properties of Materials for Reinforced Concrete. Handbook of Concrete Engineering*. New York: Von Nostrand Reinhold Company.
- Hughes, B. y. (1976). *Improving the toughness of high strength cement paste with fiber reinforcement*.
- IMCYC. (Febrero de 2007). "El concreto en la obra: Problemas, causas y soluciones".
- IMCYC. (Febrero de 2008). "Premezclados: Concreto con fibras".

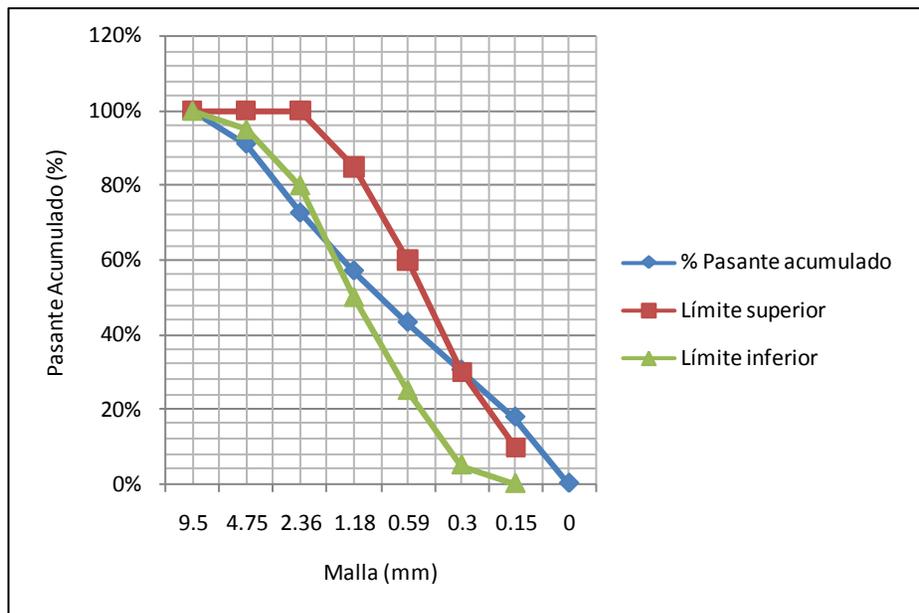
- IMCYC. (Agosto de 2006). Contracción por secado del concreto. *Construcción y Tecnología*
- Jonhston, C. D. (1994). "Fibre-Reinforced Cement and Concrete". En V. Malhotra, *Advances in Concrete Technology*. Canadá: CANMET.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. México: Portland Cement Association.
- Kraai P. (1985). *Proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete*. . Concrete Construction, 30,.
- Laning, A. (1992). *Synthetic Fiber: Primarily used to reduce shrinkage cracking, polypropylene, nylon, and polyester fibers offer other benefit as well*.
- Malisch W. (1986). *Polypropylene Fibers in Concrete, What do the test tell us?* Concrete Construction.
- Mindness S. y Vondran G. (1988). *"Properties of concrete reinforced with fibrillated polypropylene fibers under impact loading"*. Cement and Concrete Research.
- Neville, A. (1999). *Tecnología del Concreto*. México: IMCYC.
- Rey, A. S. (Febrero de 1978). "Los hormigones reforzados con fibras".
- Senthilkumar y Natesan. (2004). *Effect of Polypropylene Fibre Addition on Restrained Plastic Shrinkage Cracking of Cement Composites* (Vol. vol. 85). Calcutta: Institution of Engineers.
- Zollo, R. F. (1986). *"Plastic and Drying Shrinkage in Concrete Containing Collated Fibrillated Polypropylene Fibers*.

1 ANEXOS

ANEXO 1: PRUEBAS GRANULOMÉTRICAS DE LA ARENA ANDESÍTICA SIN LAVAR

Tabla 1.1 Arena Andesítica Muestra M1

Malla (pulgadas)	Malla (milímetros)	Peso retenido (gr)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (acumulado)	Norma C33	
1 1/2"	37.5				100%		
1"	25				100%		
3/4"	19				100%		
3/8"	9.5				100%	100%	100%
#4	4.75	132.1	8.8%	8.8%	91.2%	95%	100%
#8	2.36	277.4	18.5%	27.4%	72.6%	80%	100%
#16	1.18	232.5	15.5%	42.9%	57.1%	50%	85%
#30	0.59	206.7	13.8%	56.7%	43.3%	25%	60%
#50	0.3	191.8	12.8%	69.6%	30.4%	5%	30%
#100	0.15	189.1	12.6%	82.2%	17.8%	0%	10%
<#100	0	266	17.8%	100.0%	0.0%		
	Total	1495.6					
Perdida	%	0.29%					
			Módulo de finura	2.88%			



1.1 Gráfica del % pasante acumulado de M1

Tabla 1.2 Arena Andesítica Muestra M2

Malla (pulgadas)	Malla (milímetros)	Peso retenido (gr)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (acumulado)	Norma C33	
1 1/2"	37.5				100%		
1"	25				100%		
3/4"	19				100%		
3/8"	9.5				100%	100%	100%
#4	4.75	108.4	7.2%	7.2%	92.8%	95%	100%
#8	2.36	251.7	16.8%	24.0%	76.0%	80%	100%
#16	1.18	233.3	15.6%	39.6%	60.4%	50%	85%
#30	0.59	215.1	14.3%	53.9%	46.1%	25%	60%
#50	0.3	201.8	13.5%	67.4%	32.6%	5%	30%
#100	0.15	196.8	13.1%	80.5%	19.5%	0%	10%
<#100	0	292.2	19.5%	100.0%	0.0%		
	Total	1499.3					
Perdida	%	0.05%					
			Módulo de finura	2.73%			

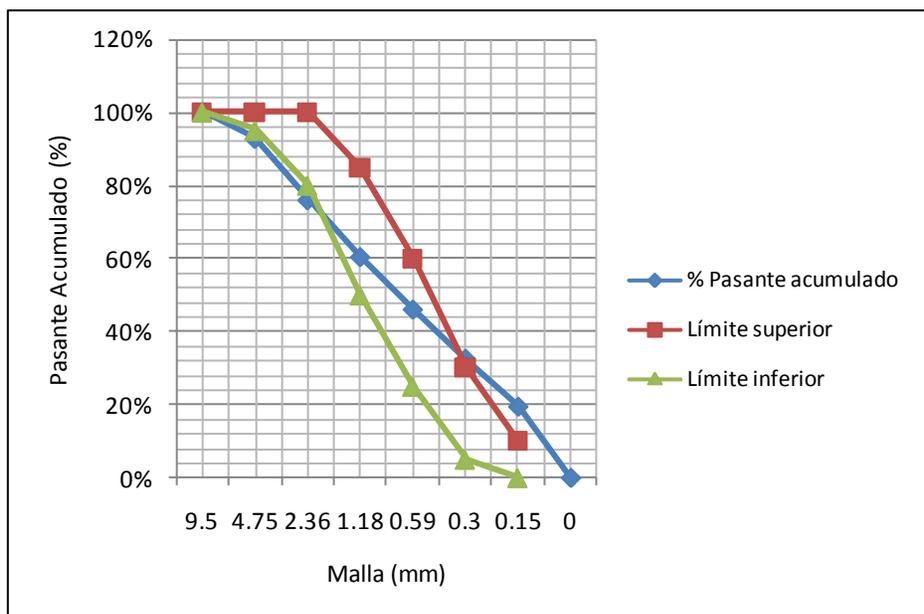


Figura 1.2 Gráfica del % pasante acumulado de M2

Tabla 1.3 Arena Andesítica Muestra M3

Malla (pulgadas)	Malla (milímetros)	Peso retenido (gr)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (acumulado)	Norma C33	
1 1/2"	37.5				100%		
1"	25				100%		
3/4"	19				100%		
3/8"	9.5				100%	100%	100%
#4	4.75	130.4	8.7%	8.7%	91.3%	95%	100%
#8	2.36	290.8	19.4%	28.1%	71.9%	80%	100%
#16	1.18	243.6	16.3%	44.4%	55.6%	50%	85%
#30	0.59	206.6	13.8%	58.2%	41.8%	25%	60%
#50	0.3	183.1	12.2%	70.4%	29.6%	5%	30%
#100	0.15	170.2	11.4%	81.7%	18.3%	0%	10%
<#100	0	273.6	18.3%	100.0%	0.0%		
	Total	1498.3					
Perdida	%	0.11%					
			Módulo de finura	2.91%			

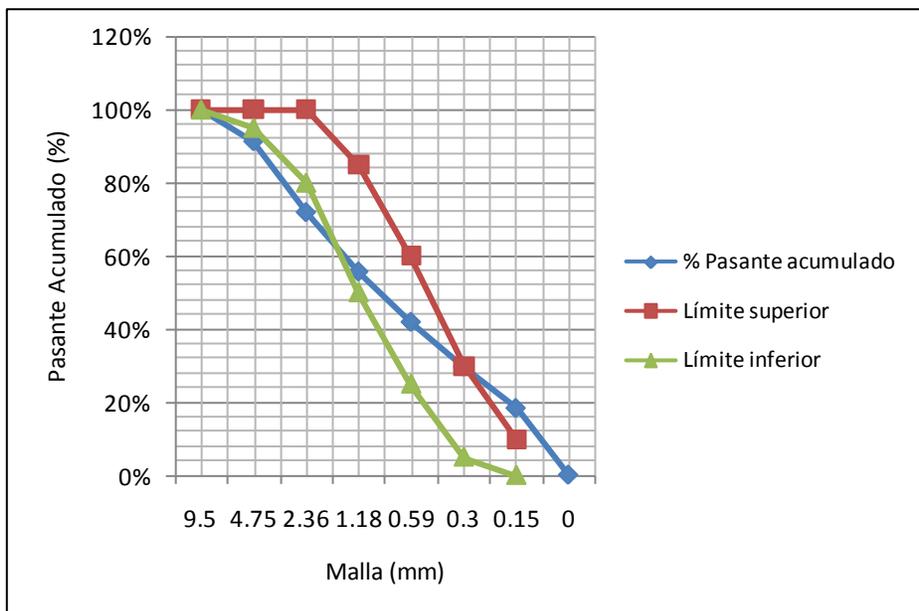


Figura 1.3 Gráfica del % pasante acumulado de M3

ANEXO 2: PRUEBAS GRANULOMÉTRICAS DE LA ARENA ANDESÍTICA LAVADA

Tabla 1.4 Arena Andesítica 2 Lavadas, Muestra 1

Malla (pulgadas)	Malla (milímetros)	Peso retenido (gr)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (acumulado)	Norma C33	
1 1/2"	37.5				100%		
1"	25				100%		
3/4"	19				100%		
3/8"	9.5				100%	100%	100%
#4	4.75	129.3	8.6%	8.6%	91.4%	95%	100%
#8	2.36	210.8	14.1%	22.7%	77.3%	80%	100%
#16	1.18	252.3	16.8%	39.5%	60.5%	50%	85%
#30	0.59	242.3	16.2%	55.7%	44.3%	25%	60%
#50	0.3	222.6	14.9%	70.6%	29.4%	5%	30%
#100	0.15	214.0	14.3%	84.9%	15.1%	0%	10%
<#100	0	226.7	15.1%	100.0%	0.0%		
	Total	1498					
Perdida	%	0.13%					
			Módulo de finura	2.82%			

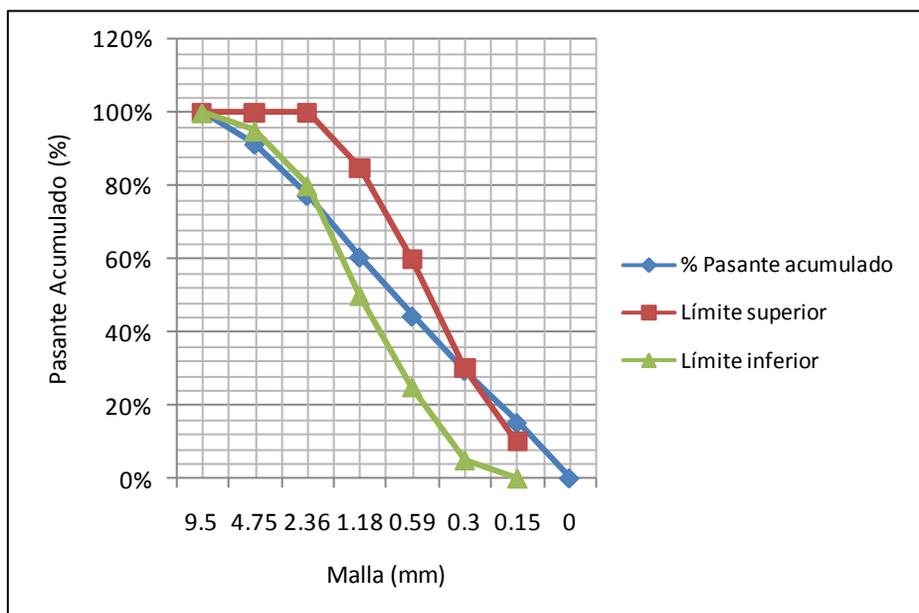


Figura 1.4 Gráfica del % pasante acumulado de M1

Tabla 1.5 Arena Andesítica 2 Lavadas, Muestra 2

Malla (pulgadas)	Malla (milímetros)	Peso retenido (gr)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (acumulado)	Norma C33	
1 1/2"	37.5				100%		
1"	25				100%		
3/4"	19				100%		
3/8"	9.5				100%	100%	100%
#4	4.75	118.7	7.9%	7.9%	92.1%	95%	100%
#8	2.36	209.3	14.0%	21.9%	78.1%	80%	100%
#16	1.18	266.2	17.8%	39.7%	60.3%	50%	85%
#30	0.59	255.6	17.1%	56.7%	43.3%	25%	60%
#50	0.3	236.2	15.8%	72.5%	27.5%	5%	30%
#100	0.15	212.0	14.1%	86.6%	13.4%	0%	10%
<#100	0	200.5	13.4%	100.0%	0.0%		
	Total	1498.5					
Perdida	%	0.10%					
			Módulo de finura	2.85%			

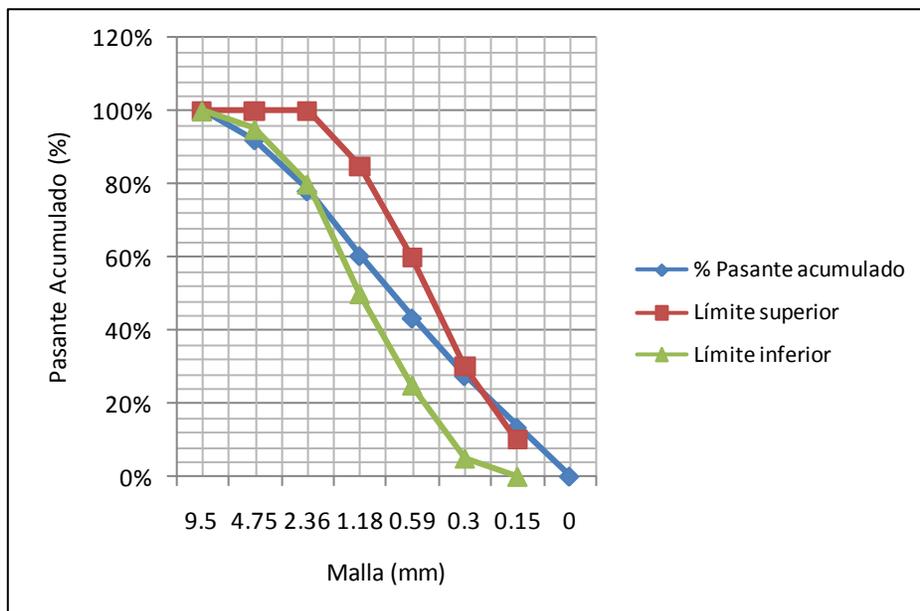


Figura 1.5 Gráfica del % pasante acumulado de M2

Tabla 1.6 Arena Andesítica 3 Lavadas, Muestra 1

Malla (pulgadas)	Malla (milímetros)	Peso retenido (gr)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (acumulado)	Norma C33	
1 1/2"	37.5				100%		
1"	25				100%		
3/4"	19				100%		
3/8"	9.5				100%	100%	100%
#4	4.75	169.7	11.3%	11.3%	88.7%	95%	100%
#8	2.36	236.7	15.8%	27.1%	72.9%	80%	100%
#16	1.18	258.0	17.2%	44.4%	55.6%	50%	85%
#30	0.59	244.6	16.3%	60.7%	39.3%	25%	60%
#50	0.3	214.4	14.3%	75.0%	25.0%	5%	30%
#100	0.15	192.0	12.8%	87.8%	12.2%	0%	10%
<#100	0	182.0	12.2%	100.0%	0.0%		
	Total	1497.4					
Perdida	%	0.17%					
			Módulo de finura	3.06%			

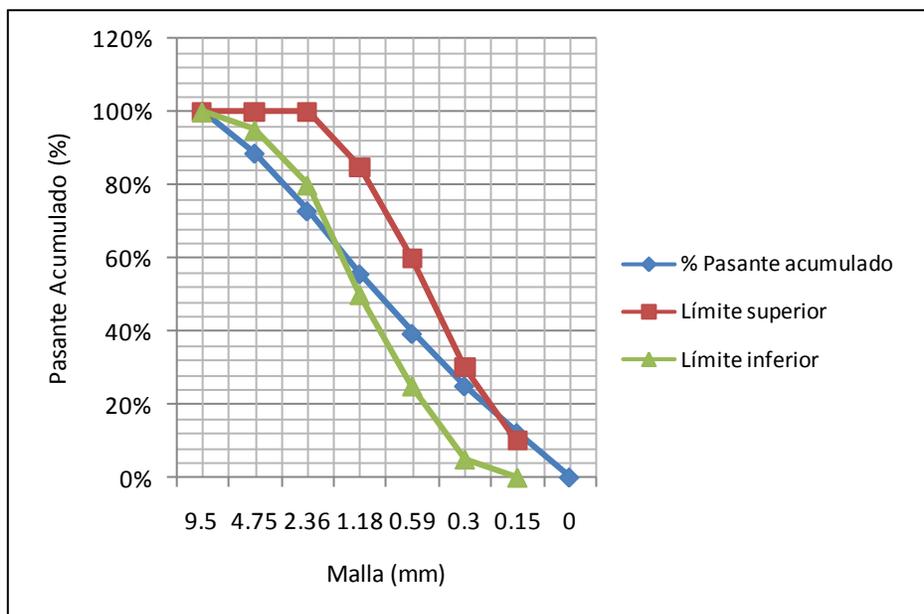


Figura 1.6 Gráfica del % pasante acumulado de M1

Tabla 1.7 Arena Andesítica 3 Lavadas, Muestra 2

Malla (pulgadas)	Malla (milímetros)	Peso retenido (gr)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (acumulado)	Norma C33	
1 1/2"	37.5				100%		
1"	25				100%		
3/4"	19				100%		
3/8"	9.5				100%	100%	100%
#4	4.75	178.8	11.9%	11.9%	88.1%	95%	100%
#8	2.36	252.9	16.9%	28.8%	71.2%	80%	100%
#16	1.18	262.4	17.5%	46.3%	53.7%	50%	85%
#30	0.59	241.1	16.1%	62.4%	37.6%	25%	60%
#50	0.3	208.8	13.9%	76.4%	23.6%	5%	30%
#100	0.15	183.1	12.2%	88.6%	11.4%	0%	10%
<#100	0	171.2	11.4%	100.0%	0.0%		
	Total	1498.3					
Perdida	%	0.11%					
			Módulo de finura	3.14%			

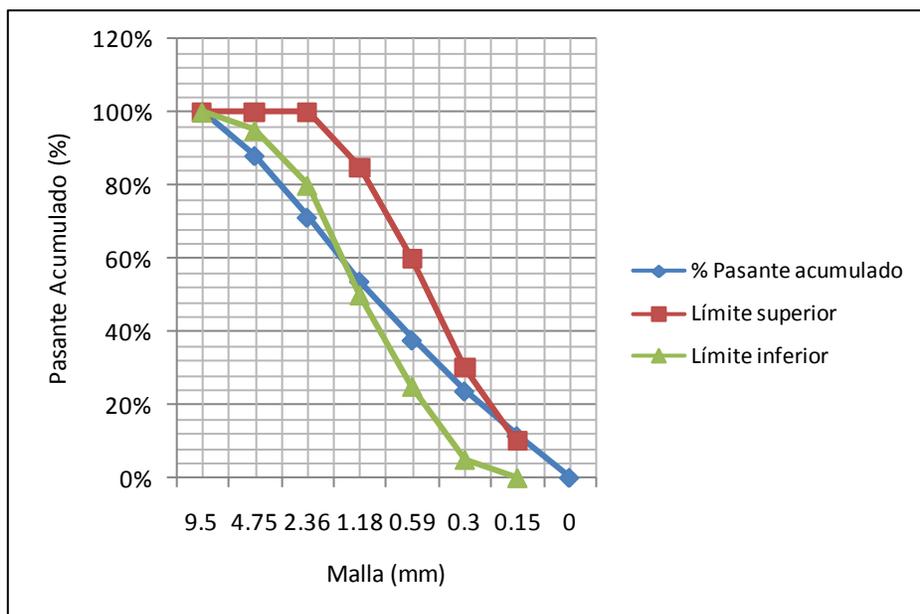


Figura 1.7 Gráfica del % pasante acumulado de M2

ANEXO 3: PRUEBA DE PÉRDIDA POR LAVADO (MALLA 200) PARA LA ARENA ANDESÍTICA DE 2 Y 3 LAVADAS

Tabla 1.8 Perdida por lavado, malla 200

		Arena andesítica 2 LAVADAS		Arena andesítica 3 LAVADAS	
	Unidad	M1	M2	M1	M2
Peso del material seco antes del lavado	gr	500	500	500	500
Peso del material seco después del lavado	gr	440.7	447.1	462.7	464.1
Pérdida por lavado	%	11.86%	10.58%	7.46%	7.18%
		Arena andesítica B1		Arena andesítica B2	
		11.86%	10.58%	7.46%	7.18%
Pérdida por lavado			11.22%		7.32%

ANEXO 4: PRUEBAS GRANULOMÉTRICAS DE LA GRAVA CALIZA DE 3/4" Y 3/8"

Tabla 1.9 Grava caliza de 3/4", M1

Malla (pulgadas)	Malla (milímetros)		Peso retenido (gr)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (acumulado)	Norma C33 Size 67	
1 1/2"	37.5		0	0.0%	0.0%	100%		
1"	25		0	0.0%	0.0%	100.0%	100%	100%
3/4"	19		17.1	1.1%	1.1%	98.9%	90%	100%
1/2"	12.5	404.2		0.0%	1.1%	98.9%		
3/8"	9.5	357.7	761.9	50.8%	51.9%	48.1%	20%	55%
1/4"	6	398.9		0.0%	51.9%	48.1%		
#4	4.75	235.4	634.3	42.3%	94.2%	5.8%	0%	10%
Charola	0		87.4	5.8%	100.0%	0.0%	0%	5%
#8	2.36							
#16	1.18							
#30	0.59							
#50	0.3							
#100	0.15							
<#100	0							
		Total	1500.7					
		Perdida	%	-0.040%				

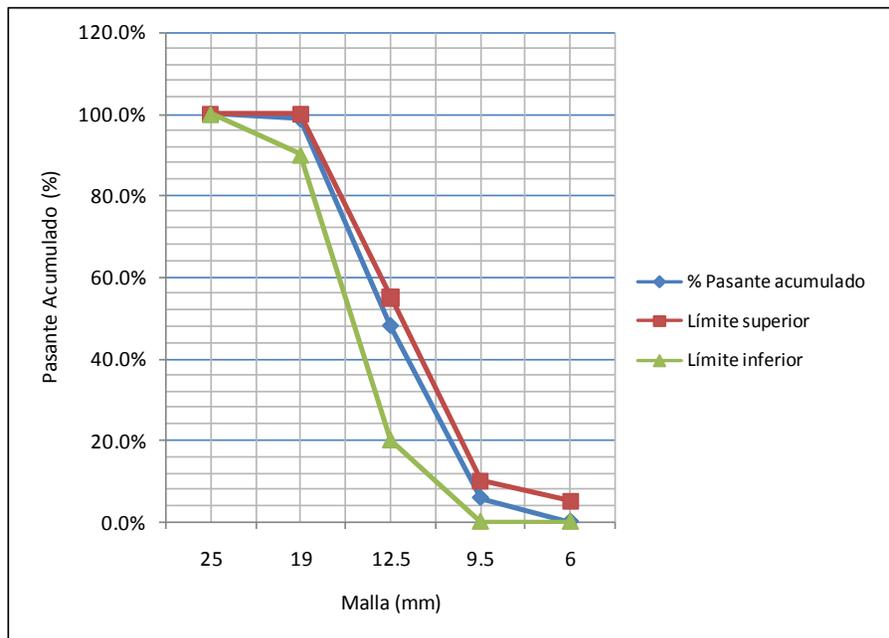


Figura 1.8 Gráfica del % pasante acumulado de grava de 3/4", M1

Tabla 1.10 Grava caliza de 3/4", M2

Malla (pulgadas)	Malla (milímetros)		Peso retenido (gr)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (acumulado)	Norma C33 Size 67	
1 1/2"	37.5		0	0.0%	0.0%	100%		
1"	25		0	0.0%	0.0%	100.0%	100%	100%
3/4"	19		10.4	0.7%	0.7%	99.3%	90%	100%
1/2"	12.5	375.3		0.0%	0.7%	99.3%		
3/8"	9.5	384.4	759.7	50.7%	51.4%	48.6%	20%	55%
1/4"	6	374.3		0.0%	51.4%	48.6%		
#4	4.75	247.1	621.4	41.4%	92.8%	7.2%	0%	10%
Charola	0		107.9	7.2%	100.0%	0.0%	0%	5%
#8	2.36							
#16	1.18							
#30	0.59							
#50	0.3							
#100	0.15							
<#100	0							
		Total	1499.4					
		Perdida	%	0.053%				

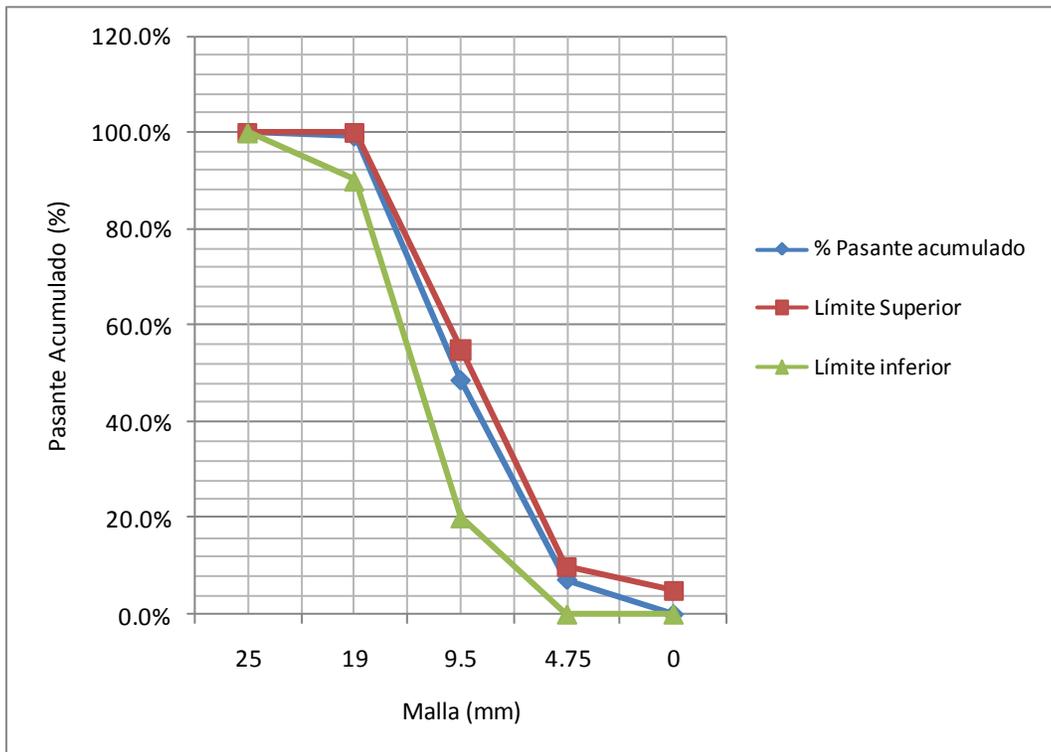


Figura 1.9 Gráfica del % pasante acumulado de grava de 3/4", M2

Tabla 1.11 Grava caliza de 3/4", M3

Malla (pulgadas)	Malla (milímetros)		Peso retenido (gr)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (acumulado)	Norma C33 Size 67	
1 1/2"	37.5		0	0.0%	0.0%	100%		
1"	25		0	0.0%	0.0%	100.0%	100%	100%
3/4"	19		0	0.0%	0.0%	100.0%	90%	100%
1/2"	12.5	366.9		0.0%	0.0%	100.0%		
3/8"	9.5	333.0	699.9	46.7%	46.7%	53.3%	20%	55%
1/4"	6	416.0		0.0%	46.7%	53.3%		
#4	4.75	243.6	659.6	44.0%	90.7%	9.3%	0%	10%
Charola	0		140.2	9.3%	100.0%	0.0%	0%	5%
#8	2.36							
#16	1.18							
#30	0.59							
#50	0.3							
#100	0.15							
<#100	0							
		Total	1499.7					
		Perdida	%	0.020%				

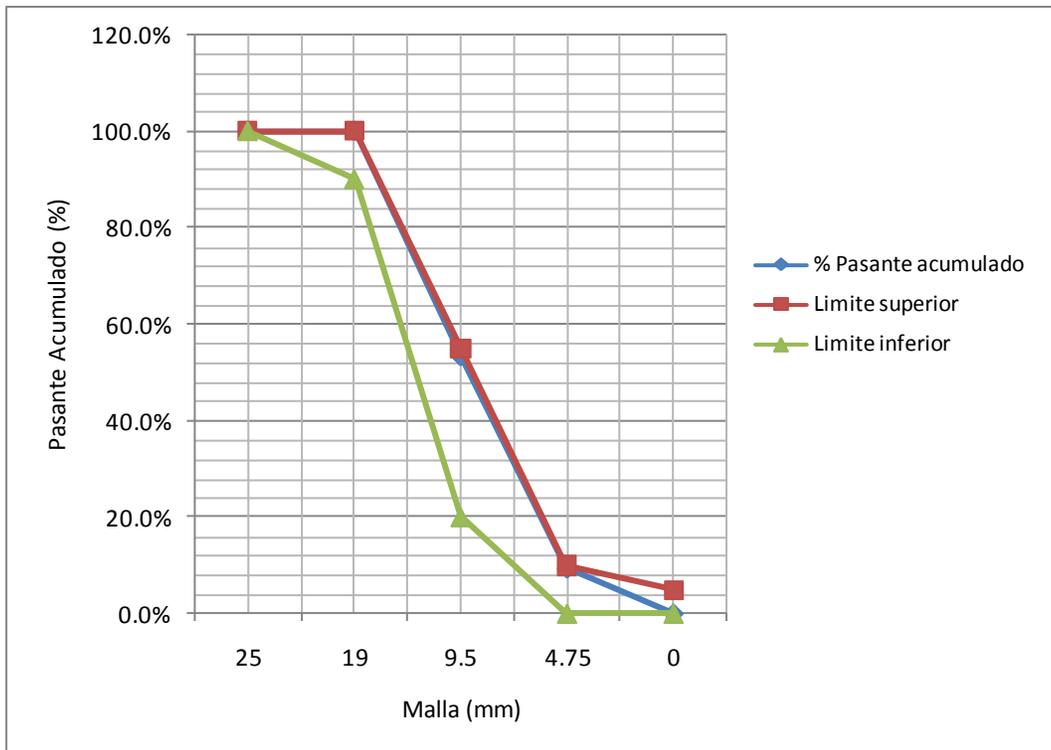


Figura 1.10 Gráfica del % pasante acumulado de grava de 3/4", M3

Tabla 1.12 Grava caliza de 3/8"

Malla (pulgadas)	Malla (milímetros)	(LN)	Peso retenido (gr)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (acumulado)	Norma C33 Size 8	
1 1/2"	37.5		0	0.0%	0.0%	100%		
1"	25		0	0.0%	0.0%	100.0%		
3/4"	19		0	0.0%	0.0%	100.0%		
1/2"	12.5		0	0.0%	0.0%	100.0%	100%	100%
3/8"	9.5		95250	7.5%	7.5%	92.5%	85%	100%
1/4"	6	1070.5		0.0%	7.5%	92.5%		
#4	4.75	366.7	920750	72.5%	80.0%	20.0%	10%	30%
#8	2.36		190500	15.0%	95.0%	5.0%	0%	10%
#16	1.18		63500	5.0%	100.0%	0.0%	0%	5%
charola	0							
#30	0.59							
#50	0.3		1270000					
#100	0.15							
<#100	0							
		Total	1270000					

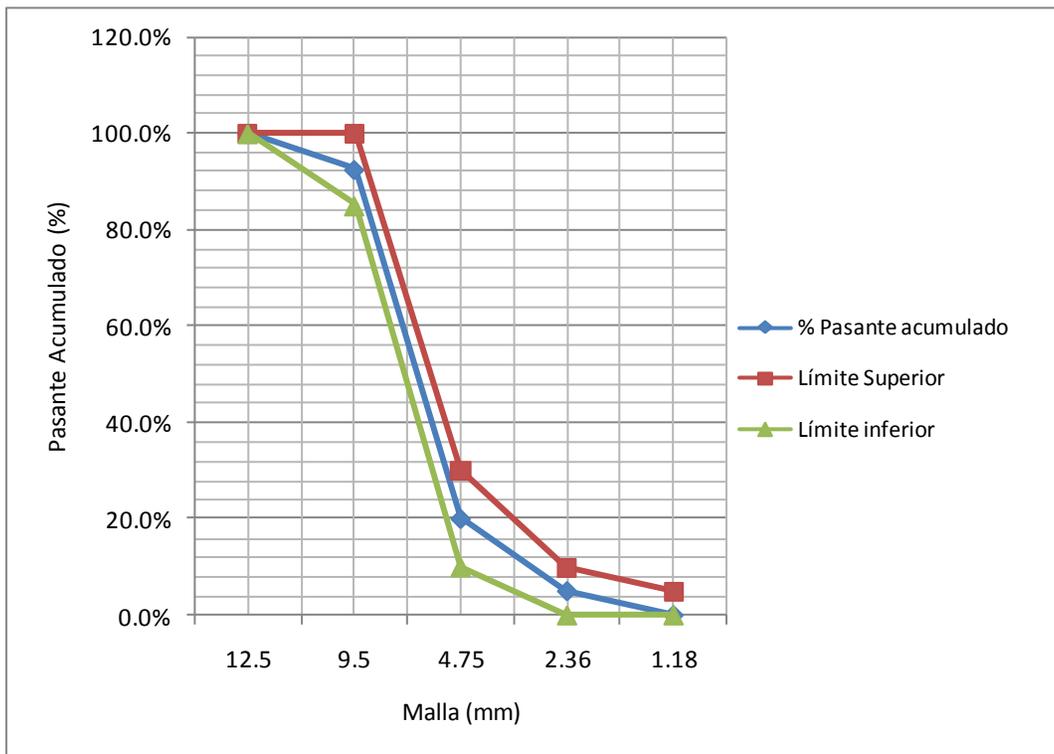


Figura 1.11 Gráfica del % pasante acumulado de grava de 3/8"

ANEXO 5: PRUEBAS DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN PARA LA ARENA Y LA GRAVA

Tabla 1.13 Peso específico y absorción de los materiales

PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN	Unidad	Grava Caliza 3/4 última			Arena 3Lavada		Arena Andesítica B2	
		M1	M2	M3	M1	M2	M1	M2
Peso seco	gr	1479	1473.4	1471.5	474.2	472.5	458	459
Peso SSS	gr	1500.2	1500.1	1500.2	500	500	500	500
Peso de sumergido + peso canastilla	gr	1153.0	1151.0	1156.0				
Peso de canastilla	gr	252	252	252				
Peso sumergido	gr	901.0	899.0	904.0				
Picnómetro con agua	ml				200	200	200	200
Picnómetro con arena + agua	ml				409	407	417	416.5
Volumen de agregados	l	0.60	0.60	0.60	0.209	0.21	0.217	0.22
Peso específico de masa seca	kg/l	2.47	2.45	2.47	2.27	2.28	2.11	2.12
Peso específico de masa saturado		2.50	2.50	2.52	2.39	2.42	2.30	2.31
Absorción		1.43%	1.81%	1.95%	5.44%	5.82%	9.17%	8.93%
			1.73%			5.63%		9.05%
		Grava Caliza			Arena Andesítica B1		Arena Andesítica B2	
Peso específico de masa	kg/l	2.47	2.45	2.47	2.27	2.28	2.11	2.12
	0		2.46			2.276		2.115

ANEXO 6: PRUEBAS DE PESO VOLUMÉTRICO DE LA ARENA Y LA GRAVA

Tabla 1.14 Peso volumétrico de los materiales

	UNIDAD	Grava Caliza 3/4 última			Grava de 3/8 última			Arena Andesítica 3Lavada			Arena Andesítica		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3	M3	M2	M3	M1	M2	M3
Peso del material suelto + la olla	gr	18670	18727	18765	18615	18614	18716	19300	19240	19410	19283	19582	19532
Peso del material compacto + la olla	gr	19816	19798	19805	19621	19560	19646	19970	20020	20060	20133	20112	20170
Peso de la olla	gr	9040	9040	9040	9040	9040	9040	9040	9040	9040	9040	9040	9040
Volumen de la olla	l	6.67553	6.67553	6.67553	6.67553	6.67553	6.67553	6.67553	6.67553	6.67553	6.67553	6.67553	6.67553
		Grava Caliza			Grava Caliza 3/8			Arena Andesítica B1			Arena Andesítica B1		
Peso volumétrico suelto		1442.58	1451.12	1456.81	1434.34	1434.19	1449.47	1536.96	1527.97	1553.43	1534.41	1579.20	1571.71
			1450.17			1439.34			1539.45			1561.77	
Peso Volumétrico compactado		1614.25	1611.56	1612.61	1585.04	1575.90	1588.79	1637.32	1644.81	1650.81	1661.74	1658.59	1667.28
			1612.81			1583.25			1644.31			1662.54	

ANEXO 7: ANCHO Y LONGITUD DE GRIETA POR CONTRACCIÓN PLÁSTICA

Figura 1.12 Grietas de Contracción Plástica de la Mezcla 1

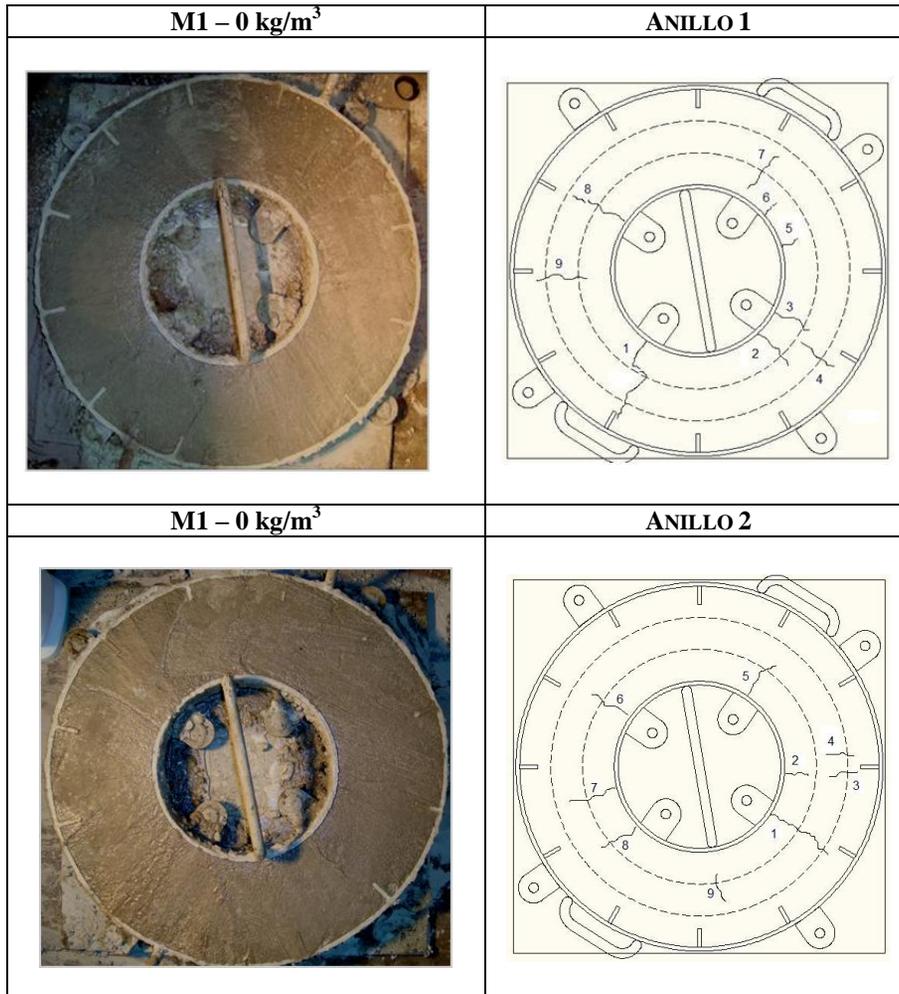


Tabla 1.15 Anchos de grieta e índice de grieta para la Mezcla 1

	ANILLO 1			ANILLO 2		
	Longitud de grieta en cm	Ancho de grieta en mm		Longitud de grieta en cm	Ancho de grieta en mm	
		Sec. 1	Sec. 2		Sec. 1	Sec. 2
1	11.2	0.65	0.65	8.7	0.15	0.50
2	5.5	-	0.05	3.4	-	-
3	6.3	-	0.10	4.2	0.05	-
4	6.2	0.20	-	7.2	0.4	-
5	4.5	-	-	7.4	-	0.05
6	3	-	-	5.1	-	0.05
7	6	-	0.40	7.7	-	0.05
8	9.5	-	0.075	6.6	-	0.015
9	7	0.25	0.05	4	-	0.05
Suma de todas la grietas en la sección		1.1	1.33		0.6	0.715
Promedio en la sección		0.36	0.22		0.2	0.12
Promedio total		0.29			0.16	

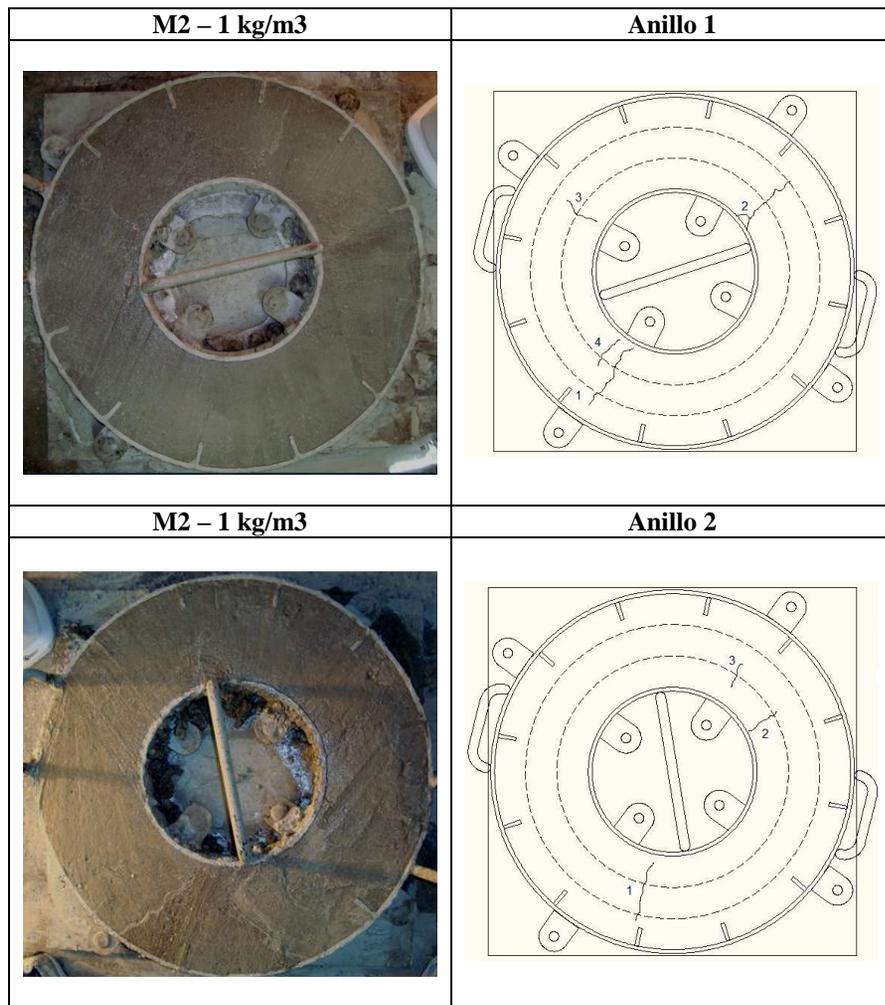


Figura 1.13 Grietas de Contracción Plástica de la Mezcla 2

Tabla 1.16 Anchos de grieta e índice de grieta para la Mezcla 2

	ANILLO 1			ANILLO 2		
	Longitud de grieta en cm	Ancho de grieta en mm		Longitud de grieta en cm	Ancho de grieta en mm	
		Sec. 1	Sec. 2		Sec. 1	Sec. 2
1	10.5	0.25	0.05	8.2	0.25	0.1
2	7.5	0.15	0.3	5.5	-	0.05
3	6.4	-	0.15	2.0	-	0.15
4	4.1	-	0.15	-	-	-
Suma de todas la grietas en la sección		0.40	0.65		0.25	0.3
Promedio en la sección		0.20	0.16		0.25	0.1
Promedio total		0.18			0.18	

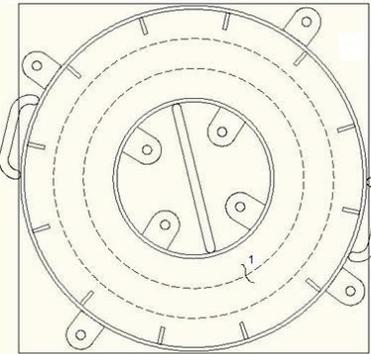
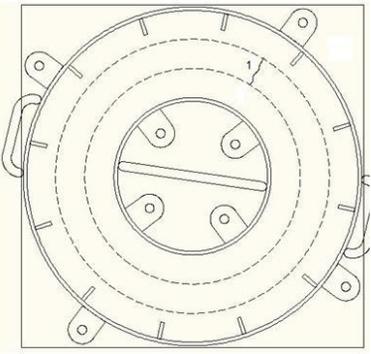
M3 – 3 kg/m³	ANILLO 1
	
M3 – 3 kg/m³	ANILLO 2
<p>No se reportó imagen, por que el grosor de la grieta era muy pequeño y no se alcanzaba a notar en la fotografía.</p>	

Figura 1.14 Grietas de Contracción Plástica de la Mezcla 3

Tabla 1.17 Anchos de grieta e índice de grieta para la Mezcla 3

	ANILLO 1			ANILLO 2		
	Longitud de grieta en cm	Ancho de grieta en mm		Longitud de grieta en cm	Ancho de grieta en mm	
		Sec. 1	Sec. 2		Sec. 1	Sec. 2
1	3.00	-	0.15	5	0.075	0.075
Suma de todas la grietas en la sección		-	0.15		0.075	0.075
Promedio en la sección		-	0.15		0.075	0.075
Promedio total		0.08			0.08	

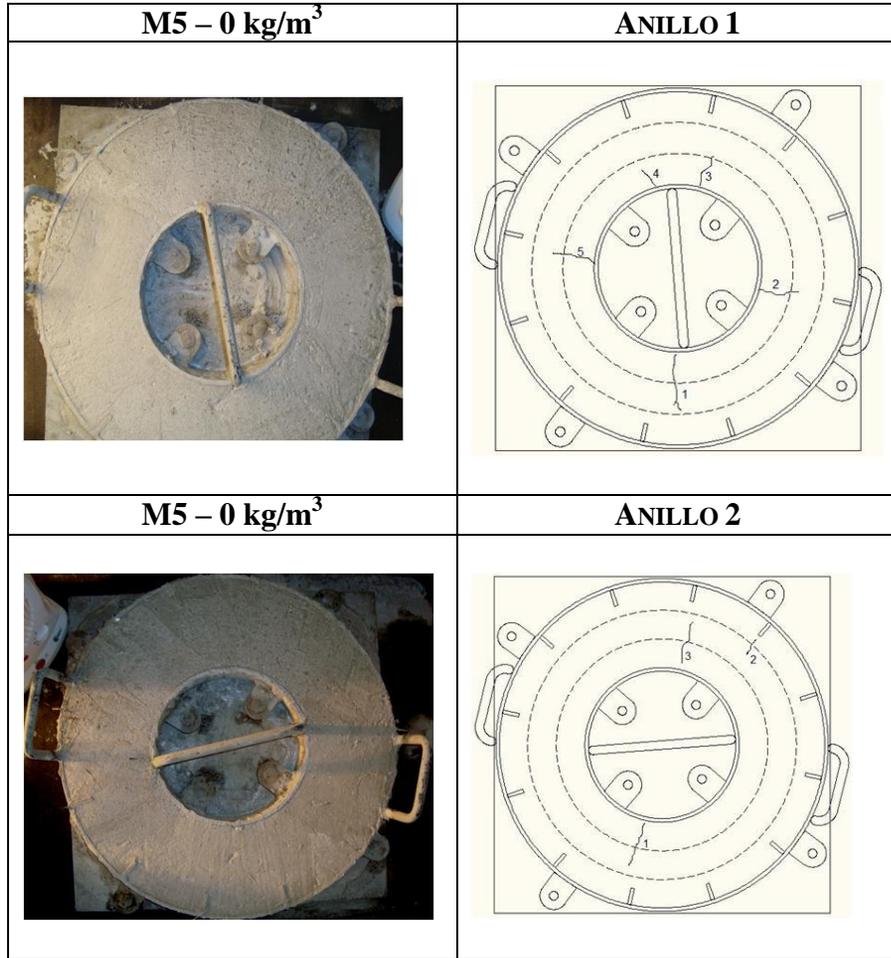


Figura 1.15 Grietas de Contracción Plástica de la Mezcla 5

Tabla 1.18 Anchos de grieta e índice de grieta para la Mezcla 5

	ANILLO 1			ANILLO 2		
	Longitud de grieta en cm	Ancho de grieta en mm		Longitud de grieta en cm	Ancho de grieta en mm	
		Sec. 1	Sec. 2		Sec. 1	Sec. 2
1	10.5	-	0.3	9.9	-	0.15
2	7.5	-	0.15	3.3	0.15	-
3	5.3	-	0.10	9.2	-	0.1
4	3.0	-	-	-	-	-
5	7.0	-	0.1	-	-	-
Suma de todas la grietas en la sección		-	0.65		0.15	0.25
Promedio en la sección		-	0.16		0.15	0.13
Promedio total		0.08			0.14	

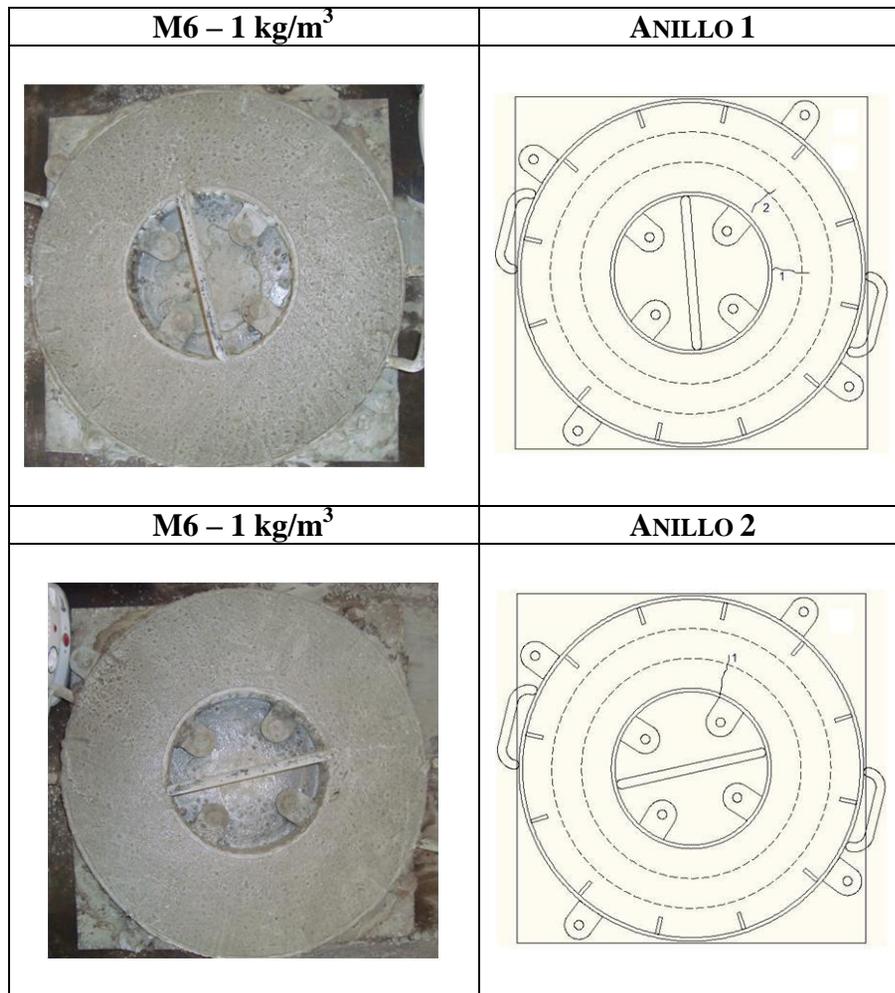


Figura 1.16 Grietas de Contracción Plástica de la Mezcla 6

Tabla 1.19 Anchos de grieta e índice de grieta para la Mezcla 6

	ANILLO 1			ANILLO 2		
	Longitud de grieta en cm	Ancho de grieta en mm		Longitud de grieta en cm	Ancho de grieta en mm	
		Sec. 1	Sec. 2		Sec. 1	Sec. 2
1	7.3	-	0.20	7.0	-	0.1
2	5.6	-	0.15	-	-	-
Suma de todas la grietas en la sección		-	0.35		-	0.1
Promedio en la sección		-	0.18		-	0.1
Promedio total		0.09			0.05	

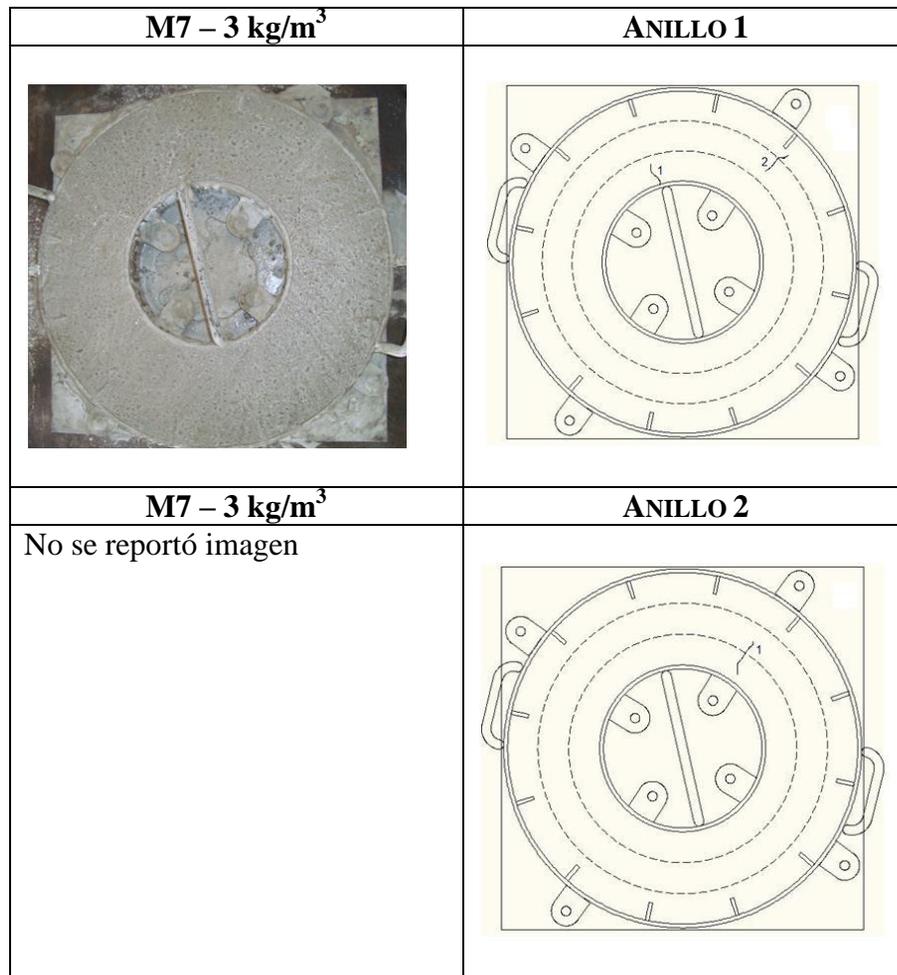


Figura 1.17 Grietas de Contracción Plástica de la Mezcla 7

Tabla 1.20 Anchos de grieta e índice de grieta para la Mezcla 7

	ANILLO 1			ANILLO 2		
	Longitud de grieta en cm	Ancho de grieta en mm		Longitud de grieta en cm	Ancho de grieta en mm	
		Sec. 1	Sec. 2		Sec. 1	Sec. 2
1	3.0	-	-	5.0	-	0.075
2	5.0	0.1	-	-	-	-
Suma de todas la grietas en la sección		0.1	-		-	0.075
Promedio en la sección		0.1	-		-	0.075
Promedio total		0.05			0.038	

ANEXO 8: RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE TODAS LAS MEZCLAS

ID	CLAVE	COLADO	ENSAYE	EDAD	D (m)	L (m)	VOLUMEN (m ³)	PESO (kg)	PESO VOLUMÉTRICO (kg/m ³)	CARGA APLICADA A LA RUPTURA (Kg)	f'c kg/cm ²	PROMEDIO f'c	PESO VOLUMÉTRICO PROMEDIO
M1	M1-S/F-C1	19/05/2009	26/05/2009	7	0,1512	0,3043	0,00546	12,450	2279,39	41400	230,674		
	M1-S/F-C2	19/05/2009	26/05/2009	7	0,1517	0,3030	0,00547	12,425	2269,78	44800	247,975	238	2269,746
	M1-S/F-C3	19/05/2009	26/05/2009	7	0,1518	0,3040	0,00550	12,440	2260,07	42800	236,385		
M1	M1-S/F-C4	19/05/2009	16/06/2009	28	0,1497	0,3000	0,00528	11,975	2268,89	63400	360,370		
	M1-S/F-C5	19/05/2009	16/06/2009	28	0,1515	0,3043	0,00549	12,570	2291,24	65500	363,351	366	2282,196
	M1-S/F-C6	19/05/2009	16/06/2009	28	0,1515	0,3040	0,00548	12,530	2286,45	67500	374,446		
M2	M2-C/F/1KG-C2	21/05/2009	28/05/2009	7	0,1497	0,3013	0,00530	11,790	2223,96	40800	231,910		
	M2-C/F/1KG-C5	21/05/2009	28/05/2009	7	0,1510	0,3007	0,00538	12,070	2241,70	43500	242,910	241	2243,900
	M2-C/F/1KG-C13	21/05/2009	28/05/2009	7	0,1500	0,3017	0,00533	12,080	2266,04	44100	249,555		
M2	M2-C/F/1KG-C1	21/05/2009	18/06/2009	28	0,1518	0,3047	0,00552	12,515	2268,72	61700	340,770		
	M2-C/F/1KG-C6	21/05/2009	18/06/2009	28	0,1515	0,3060	0,00552	12,585	2281,48	64100	355,585	346	2274,162
	M2-C/F/1KG-C7	21/05/2009	18/06/2009	28	0,1487	0,2997	0,00520	11,820	2272,28	59300	341,616		
M3	M3-C/F/3KG-C1	26/05/2009	02/06/2009	7	0,1500	0,3007	0,00531	11,945	2248,17	40200	227,485		
	M3-C/F/3KG-C2	26/05/2009	02/06/2009	7	0,1515	0,3050	0,00550	12,395	2254,40	41700	231,324	230	2260,347
	M3-C/F/3KG-C3	26/05/2009	02/06/2009	7	0,1512	0,3043	0,00546	12,445	2278,47	41500	231,231		
M3	M3-C/F/3KG-C4	26/05/2009	23/06/2009	28	0,1507	0,3007	0,00536	12,145	2265,62	62100	348,311		
	M3-C/F/3KG-C5	26/05/2009	23/06/2009	28	0,1505	0,3000	0,00534	11,985	2245,71	58800	330,533	334	2258,873
	M3-C/F/3KG-C6	26/05/2009	23/06/2009	28	0,1518	0,3037	0,00550	12,455	2265,28	58500	323,096		

ID	CLAVE	COLADO	ENSAYE	EDAD	D (m)	L (m)	VOLUMEN (m ³)	PESO (kg)	PESO VOLUMÉTRICO (kg/m ³)	CARGA APLICADA A LA RUPTURA (Kg)	f'c kg/cm ²	PROMEDIO f'c	PESO VOLUMÉTRICO PROMEDIO
M4	M4-C/F/5KG-C1	28/05/2009	04/06/2009	7	0,1512	0,3047	0,00547	12,500	2286,04	44600	248,504		
	M4-C/F/5KG-C3	28/05/2009	04/06/2009	7	0,1513	0,3070	0,00552	12,405	2246,46	45500	252,960	252	2270,722
	M4-C/F/5KG-C5	28/05/2009	04/06/2009	7	0,1513	0,3053	0,00549	12,520	2279,67	46000	255,740		
M4	M5-C/F/5KG-C2	28/05/2009	25/06/2009	28	0,1487	0,2987	0,00518	11,830	2281,82	63000	362,930		
	M5-C/F/5KG-C4	28/05/2009	25/06/2009	28	0,1510	0,3053	0,00547	12,410	2269,62	65200	364,086	365	2276,721
	M5-C/F/5KG-C6	28/05/2009	25/06/2009	28	0,1512	0,3047	0,00547	12,460	2278,72	66300	369,412		
M5	M5-S/F-C1	02/06/2009	09/06/2009	7	0,1487	0,2983	0,00518	11,655	2250,57	43800	252,323		
	M5-S/F-C2	02/06/2009	09/06/2009	7	0,1507	0,3043	0,00543	12,300	2266,89	44300	248,473	251	2259,161
	M5-S/F-C3	02/06/2009	09/06/2009	7	0,1510	0,3037	0,00544	12,290	2260,01	45300	252,961		
M5	M5-S/F-C4	02/06/2009	30/06/2009	28	0,1507	0,2997	0,00534	11,815	2211,42	61200	343,263		
	M5-S/F-C5	02/06/2009	30/06/2009	28	0,1523	0,3047	0,00555	12,375	2228,64	63300	347,315	350	2229,865
	M5-S/F-C6	02/06/2009	30/06/2009	28	0,1520	0,3050	0,00553	12,450	2249,53	65200	359,311		
M6	M6-C/F/1KG-C2	28/07/2009	04/08/2009	7	0,1513	0,3053	0,00549	12,385	2255,08	48300	268,527		
	M6-C/F/1KG-C3	28/07/2009	04/08/2009	7	0,1497	0,2983	0,00525	11,755	2239,65	44400	252,373	264	2247,659
	M6-C/F/1KG-C13	28/07/2009	04/08/2009	7	0,1507	0,2990	0,00533	11,985	2248,24	48400	271,470		
M6	M6-C/F/1KG-C1	28/07/2009	25/08/2009	28	0,1493	0,2983	0,00523	11,715	2242,01	63000	359,697		
	M6-C/F/1KG-C4	28/07/2009	25/08/2009	28	0,1537	0,3047	0,00565	12,590	2228,19	64900	349,942	352	2226,240
	M3-C/F/3KG-C6	26/05/2009	23/06/2009	28	0,1518	0,3037	0,00550	12,455	2265,28	58500	323,096		

ID	CLAVE	COLADO	ENSAYE	EDAD	D (m)	L (m)	VOLUMEN (m ³)	PESO (kg)	PESO VOLUMÉTRICO (kg/m ³)	CARGA APLICADA A LA RUPTURA (Kg)	f'c kg/cm ²	PROMEDIO f'c	PESO VOLUMÉTRICO PROMEDIO
M7	M7-C/F/3KG-C1	30/07/2009	06/08/2009	7	0,1497	0,2993	0,00527	11,790	2238,82	41600	236,458		
	M7-C/F/3KG-C3	30/07/2009	06/08/2009	7	0,1513	0,3023	0,00544	12,250	2252,64	40500	225,162	243	2249,797
	M7-C/F/3KG-C17	30/07/2009	06/08/2009	7	0,1490	0,2993	0,00522	11,785	2257,94	46500	266,680		
M7	M7-C/F/3KG-C2	30/07/2009	27/08/2009	28	0,1508	0,2997	0,00535	11,910	2224,28	64700	362,093		
	M7-C/F/3KG-C4	30/07/2009	27/08/2009	28	0,1507	0,2990	0,00533	11,800	2213,54	62600	351,116	336	2225,102
	M7-C/F/3KG-C5	30/07/2009	27/08/2009	28	0,1503	0,2990	0,00531	11,875	2237,49	52100	293,520		
M8	M8-C/F/5KG-C1	06/08/2009	13/08/2009	7	0,1503	0,2993	0,00531	11,895	2238,77	46200	260,280		
	M8-C/F/5KG-C5	06/08/2009	13/08/2009	7	0,1503	0,2997	0,00532	11,795	2217,48	41900	236,055	245	2226,186
	M8-C/F/5KG-C11	06/08/2009	13/08/2009	7	0,1513	0,3063	0,00551	12,245	2222,31	43000	239,061		
M8	M8-C/F/5KG-C2	06/08/2009	03/09/2009	28	0,1503	0,2997	0,00532	11,900	2237,22	61200	344,787		
	M8-C/F/5KG-C4	06/08/2009	03/09/2009	28	0,1517	0,3050	0,00551	12,255	2224,04	57800	319,932	334	2230,425
	M8-C/F/5KG-C7	06/08/2009	03/09/2009	28	0,1520	0,3043	0,00552	12,315	2230,02	61100	336,716		

ANEXO 9: MÓDULO DE ELÁSTICO Y RELACIÓN DE POISSON DE LAS MEZCLAS

ID	CLAVE	EDAD	D (m)	L (m)	VOLUMEN (m ³)	PESO (kg)	PESO VOLUMÉTRICO (kg/m ³)	CARGA APLICADA A LA RUPTURA (kg)	f _c kg/cm ²	PROMEDIO f _c	PESO VOLUMÉTRICO PROMEDIO	MODULO	MODULO PROMEDIO	FC	Poisson
M1	M1-S/F-C7	28	0,1515	0,3027	0,00546	12,500	2291,03	66700	370,008			247786		367	0,28
	M1-S/F-C8	28	0,1517	0,2997	0,00541	12,155	2245,16	65100	360,339	348,571	2262,091	245528	241986	359	0,27
	M1-S/F-C9	28	0,1512	0,3000	0,00538	12,115	2250,09	56600	315,366			232645		310	0,24
M2	M2-C/F/1KG-C3	28	0,1518	0,3063	0,00555	12,525	2258,18	59500	328,619			242081		327	0,28
	M2-C/F/1KG-C4	28	0,1512	0,3053	0,00548	12,365	2256,41	61200	340,996	342,134	2261,867	217317	233255	335	0,15
	M2-C/F/1KG-C8	28	0,1518	0,3053	0,00553	12,555	2271,01	64600	356,786			240368		340	0,22
M3	M3-C/F/3KG-C7	28	0,1503	0,3057	0,00543	12,435	2291,91	52300	294,646			250856		330	0,21
	M3-C/F/3KG-C8	28	0,1508	0,3047	0,00544	12,505	2297,07	59200	331,312	317,991	2290,362	250037	248975	319	0,19
	M3-C/F/3KG-C9	28	0,1513	0,3037	0,00546	12,465	2282,11	59000	328,014			246033		324	0,22
M4	M5-C/F/5KG-C7	28	0,1490	0,3003	0,00524	11,925	2277,15	56800	325,751			238617		322	0,24
	M5-C/F/5KG-C8	28	0,1513	0,3033	0,00546	12,375	2268,12	62100	345,249	339,210	2273,113	252485	247109	342	0,27
	M5-C/F/5KG-C9	28	0,1507	0,3063	0,00546	12,420	2274,07	61800	346,628			250225		342	0,20
M5	M5-S/F-C7	28	0,1517	0,3020	0,00546	12,335	2260,80	65500	362,553			-		-	
	M5-S/F-C8	28	0,1517	0,3033	0,00548	12,315	2247,21	65700	363,660	358,208	2237,294	234628	235347	361	0,21
	M5-S/F-C9	28	0,1523	0,3000	0,00547	12,050	2203,87	63500	348,413			236066		347	0,20
	M8-C/F/5KG-C12	28	0,1517	0,3053	0,00552	12,210	2213,46	62400	345,394			223635		341	0,28

ID	CLAVE	EDAD	D (m)	L (m)	VOLUMEN (m ³)	PESO (kg)	PESO VOLUMÉTRICO (kg/m ³)	CARGA APLICADA A LA RUPTURA (kg)	f _c kg/cm ²	PROMEDIO f _c	PESO VOLUMÉTRICO PROMEDIO	MODULO	MODULO PROMEDIO	FC	Poisson
M6	M6-C/F/1KG-C6	28	0,1510	0,3047	0,00546	12,470	2285,59	65000	362,969			229048		359	0,27
	M6-C/F/1KG-C7	28	0,1517	0,3040	0,00549	12,354	2249,39	67400	373,069	364,565	2255,901	227210	227437	369	0,29
	M6-C/F/1KG-C8	28	0,1520	0,3043	0,00552	12,330	2232,73	64900	357,658			226053		354	0,22
M7	M7-C/F/3KG-C6	28	0,1512	0,3053	0,00548	12,300	2244,55	61100	340,439			232735		338	0,26
	M7-C/F/3KG-C7	28	0,1517	0,3040	0,00549	12,360	2250,48	62900	348,161	350,604	2254,527	235454	236212	344	0,19
	M7-C/F/3KG-C8	28	0,1497	0,2987	0,00525	11,920	2268,56	63900	363,213			240449		360	0,20
M8	M8-C/F/5KG-C8	28	0,1493	0,2997	0,00525	11,745	2237,75	60300	344,282			-		-	
	M8-C/F/5KG-C9	28	0,1523	0,3030	0,00552	12,200	2209,21	60800	333,598	341,091	2220,139	213221	218428	329	0,21
	M8-C/F/5KG-C12	28	0,1517	0,3053	0,00552	12,210	2213,46	62400	345,394			223635		341	0,28

ANEXO 10: RESISTENCIA A TENSION POR FLEXIÓN

ID	CLAVE	COLADO	ENSAYE	EDAD	A (m)	BASE	LARGO	V (m ³)	PESO (kg)	PESO VOLUMÉTRICO (kg/m ³)	CARGA APLICADA A LA RUPTURA (kg)	f _c kg/cm ²	PROMEDIO f _c	PESO VOLUMÉTRICO PROMEDIO
M1	M1-S/F-V1	19/05/2009	16/06/2009	28	0,1533	0,1500	0,6000	0,01380	31,390	2274,64	2871	37,289		
	M1-S/F-V2	19/05/2009	16/06/2009	28	0,1533	0,1500	0,6000	0,01380	31,330	2270,29	2381	30,925	35,327	2272,705
	M1-S/F-V3	19/05/2009	16/06/2009	28	0,1533	0,1500	0,6000	0,01380	31,370	2273,19	2908	37,767		
M2	M2-C/F/1KG-V1	21/05/2009	18/06/2009	28	0,1537	0,1500	0,6000	0,01383	32,015	2314,90	3164	40,913		
	M2-C/F/1KG-V2	21/05/2009	18/06/2009	28	0,1547	0,1500	0,6000	0,01392	32,050	2302,44	3256	41,554	39,073	2308,709
	M2-C/F/1KG-V3	21/05/2009	18/06/2009	28	0,1527	0,1500	0,6000	0,01374	31,955	2325,69	2723	35,673		
	M2-C/F/1KG-V4	01/07/2009	29/07/2009	28	0,1527	0,1500	0,6000	0,01374	31,650	2303,49	3088	40,459		
	M2-C/F/1KG-V5	01/07/2009	29/07/2009	28	0,1530	0,1500	0,6000	0,01377	31,630	2297,02	2819	36,766		
M3	M3-C/F/3KG-V1	26/05/2009	23/06/2009	28	0,1533	0,1500	0,6000	0,01380	31,360	2272,46	2954	38,368		
	M3-C/F/3KG-V2	26/05/2009	23/06/2009	28	0,1540	0,1500	0,6000	0,01386	31,480	2271,28	3260	41,966	39,351	2329,973
	M3-C/F/3KG-V3	26/05/2009	23/06/2009	28	0,1533	0,1500	0,6000	0,01380	31,640	2292,75	3604	46,803		
	M3-C/F/3KG-V4	01/07/2009	29/07/2009	28	0,1530	0,1500	0,6000	0,01377	32,640	2370,37	2695	35,152		
	M3-C/F/3KG-V5	01/07/2009	29/07/2009	28	0,1530	0,1500	0,6000	0,01377	33,640	2442,99	2642	34,466		
M4	M4-C/F/5KG-V1	28/05/2009	25/06/2009	28	0,1540	0,1500	0,6000	0,01386	31,145	2247,11	3141	40,437		
	M4-C/F/5KG-V2	28/05/2009	25/06/2009	28	0,1547	0,1500	0,6000	0,01392	31,445	2258,98	3182	40,621	40,246	2279,694
	M4-C/F/5KG-V3	28/05/2009	25/06/2009	28	0,1533	0,1500	0,6000	0,01380	31,515	2283,70	3492	45,353		
	M4-C/F/5KG-V4	01/07/2009	29/07/2009	28	0,1523	0,1500	0,6000	0,01371	31,485	2296,50	2719	35,777		
	M4-C/F/5KG-V5	01/07/2009	29/07/2009	28	0,1523	0,1500	0,6000	0,01371	31,700	2312,18	2967	39,043		

ID	CLAVE	COLADO	ENSAYE	EDAD	A (m)	BASE	LARGO	V (m ³)	PESO (kg)	PESO VOLUMÉTRICO (kg/m ³)	CARGA APLICADA A LA RUPTURA (kg)	f'c kg/cm ²	PROMEDIO f'c	PESO VOLUMÉTRICO PROMEDIO
M5	M5-S/F-V1	02/06/2009	30/06/2009	28	0,1530	0,1500	0,6000	0,01377	31,365	2277,78	3891	50,748		
	M5-S/F-V2	02/06/2009	30/06/2009	28	0,1527	0,1500	0,6000	0,01374	31,125	2265,28	3608	47,265	47,811	2269,742
	M5-S/F-V3	02/06/2009	30/06/2009	28	0,1547	0,1500	0,6000	0,01392	31,545	2266,16	3559	45,421		
M6	M6-C/F/1KG-V1	28/07/2009	25/08/2009	28	0,1540	0,1500	0,6000	0,01386	31,265	2255,77	2741	35,295		
	M6-C/F/1KG-V2	28/07/2009	25/08/2009	28	0,1543	0,1500	0,6000	0,01389	30,915	2225,70	2782	35,668	35,393	2242,796
	M6-C/F/1KG-V3	28/07/2009	25/08/2009	28	0,1530	0,1500	0,6000	0,01377	30,940	2246,91	2700	35,216		
M7	M7-C/F/3KG-V1	30/07/2009	27/08/2009	28	0,1537	0,1500	0,6000	0,01383	30,870	2232,10	2950	38,147		
	M7-C/F/3KG-V2	30/07/2009	27/08/2009	28	0,1547	0,1500	0,6000	0,01392	30,895	2219,47	3277	41,829	40,609	2234,949
	M7-C/F/3KG-V3	30/07/2009	27/08/2009	28	0,1527	0,1500	0,6000	0,01374	30,960	2253,28	3195	41,851		
M8	M8-C/F/5KG-V1	06/08/2009	03/09/2009	28	0,1530	0,1500	0,6000	0,01377	30,760	2233,84	3246	42,344		
	M8-C/F/5KG-V2	06/08/2009	03/09/2009	28	0,1543	0,1500	0,6000	0,01389	30,690	2209,50	3475	44,548	42,700	2214,811
	M8-C/F/5KG-V3	06/08/2009	03/09/2009	28	0,1533	0,1500	0,6000	0,01380	30,375	2201,09	3173	41,209		

Anexo 11: Resistencia a compresión diametral de todas las mezclas

ID	CLAVE	COLADO	ENSAYE	EDAD	D (m)	L (m)	VOLUMEN (m3)	PESO (kg)	PESO VOLUMÉTRICO (kg/m ³)	CARGA APLICADA A LA RUPTURA (kg)	T kg/cm ²	PROMEDIO T	PESO VOLUMÉTRICO PROMEDIO
M1	M1-S/F-C11	19/05/2009	16/06/2009	28	0,1513	0,3053	0,00549	12,520	2279,67	19720	27,169	28,503	2295,239
	M1-S/F-C12	19/05/2009	16/06/2009	28	0,1493	0,2993	0,00524	12,115	2310,81	20950	29,837		
M2	M2-C/F/1KG-C9	21/05/2009	18/06/2009	28	0,1513	0,3053	0,00549	12,415	2260,55	22150	30,517		
	M2-C/F/1KG-C10	21/05/2009	18/06/2009	28	0,1518	0,3053	0,00553	12,450	2252,01	21980	30,183	29,924	2254,207
	M2-C/F/1KG-C11	21/05/2009	18/06/2009	28	0,1503	0,2993	0,00531	11,955	2250,06	20550	29,072		
M3	M3-C/F/3KG-C13	26/05/2009	23/06/2009	28	0,1515	0,3060	0,00552	12,470	2260,63	18990	26,078		
	M3-C/F/3KG-C14	26/05/2009	23/06/2009	28	0,1512	0,3043	0,00546	12,480	2284,88	25100	34,733	29,187	2269,683
	M3-C/F/3KG-C15	26/05/2009	23/06/2009	28	0,1507	0,2993	0,00534	12,080	2263,54	18950	26,750		
M4	M5-C/F/5KG-C10	28/05/2009	25/06/2009	28	0,1497	0,3057	0,00538	12,395	2304,93	20160	28,054		
	M5-C/F/5KG-C11	28/05/2009	25/06/2009	28	0,1497	0,2983	0,00525	11,935	2273,95	22320	31,823	31,870	2285,783
	M5-C/F/5KG-C12	28/05/2009	25/06/2009	28	0,1517	0,3037	0,00549	12,500	2278,47	25850	35,732		
M5	M5-S/F-C10	02/06/2009	30/06/2009	28	0,1517	0,3047	0,00550	12,335	2241,01	24490	33,741		
	M5-S/F-C11	02/06/2009	30/06/2009	28	0,1513	0,3057	0,00550	12,335	2243,53	24640	33,911	33,600	2240,182
	M5-S/F-C12	02/06/2009	30/06/2009	28	0,1513	0,3043	0,00547	12,240	2236,01	23980	33,147		
M6	M6-C/F/1KG-C9	28/07/2009	25/08/2009	28	0,1513	0,3033	0,00546	12,330	2259,87	23450	32,521		
	M6-C/F/1KG-C10	28/07/2009	25/08/2009	28	0,1513	0,3040	0,00547	12,340	2256,75	15960	22,085	30,612	2264,787
	M6-C/F/1KG-C11	28/07/2009	25/08/2009	28	0,1497	0,2993	0,00527	11,995	2277,75	26200	37,231		

ID	CLAVE	COLADO	ENSAYE	EDAD	D (m)	L (m)	VOLUMEN (m3)	PESO (kg)	PESO VOLUMÉTRICO (kg/m ³)	CARGA APLICADA A LA RUPTURA (kg)	T kg/cm ²	PROMEDIO T	PESO VOLUMÉTRICO PROMEDIO
M7	M7-C/F/3KG-C9	30/07/2009	27/08/2009	28	0,1497	0,2997	0,00527	11,800	2238,22	21420	30,404		
	M7-C/F/3KG-C11	30/07/2009	27/08/2009	28	0,1530	0,3040	0,00559	12,560	2247,21	18960	25,951	30,414	2245,911
	M7-C/F/3KG-C12	30/07/2009	27/08/2009	28	0,1487	0,2990	0,00519	11,690	2252,30	24360	34,888		
M8	M8-C/F/5KG-C13	06/08/2009	03/09/2009	28	0,1520	0,3060	0,00555	12,345	2223,27	23710	32,452		
	M8-C/F/5KG-C14	06/08/2009	03/09/2009	28	0,1497	0,3000	0,00528	11,735	2223,42	22440	31,817	32,916	2221,872
	M8-C/F/5KG-C15	06/08/2009	03/09/2009	28	0,1527	0,3047	0,00558	12,375	2218,92	25190	34,478		

ANEXO 12: RESISTENCIA AL IMPACTO DE LAS MEZCLAS

Mezcla 1 - sin fibra						
f'c 28 días: 300 Kg/cm2						
Cilindro	Muestra	Distancia de la parte superior (mm)	Espesor (mm)	Resistencia al impacto Número de Golpes		Valores Estadísticos
				Primera Grieta PG	Última Grieta UG	
1	1	25-88.5	63	305	306	Resistencia al impacto Primera Grita (PG) Media: 347 Covarianza:
	2	88.5-152	64	372	376	
	3	152-215.5	67	837	838	
	4	215.5-279	63	249	252	
2	5	25-88.5	65	566	569	Resistencia al impacto Última Grita (UG) Media: 350 Covarianza:
	6	88.5-152	65	234	235	
	7	152-215.5	64	270	271	
	8	215.5-279	65	235	241	
3	9	25-88.5	64	311	317	Resistencia al impacto Última Grita (UG) Media: 350 Covarianza:
	10	88.5-152	63	271	272	
	11	152-215.5	64	277	279	
	12	215.5-279	65	239	240	

Mezcla 2 - 1 kg/m3 de fibra						
f'c 28 días: 300 Kg/cm2						
Cilindro	Muestra	Distancia de la parte superior (mm)	Espesor (mm)	Resistencia al impacto Número de Golpes		Valores Estadísticos
				Primera Grieta PG	Última Grieta UG	
1	1	25-88.5	65	308	328	Resistencia al impacto Primera Grita (PG) Media: 225 Covarianza:
	2	88.5-152	65	271	304	
	3	152-215.5	64	41	82	
	4	215.5-279	64	228	273	
2	5	25-88.5	63	249	282	Resistencia al impacto Última Grita (UG) Media: 255 Covarianza:
	6	88.5-152	65	280	296	
	7	152-215.5	65	80	104	
	8	215.5-279	66	126	158	
3	9	25-88.5	65	251	269	Resistencia al impacto Última Grita (UG) Media: 255 Covarianza:
	10	88.5-152	65	483	512	
	11	152-215.5	64	213	260	
	12	215.5-279	64	164	191	

Mezcla 3 - 3 kg/m3 de fibra						
f'c 28 días: 300 Kg/cm2						
Cilindro	Muestra	Distancia de la parte superior (mm)	Espesor (mm)	Resistencia al impacto Número de Golpes		Valores Estadísticos
				Primera Grieta PG	Última Grieta UG	
1	1	25-88.5	62	870	901	Resistencia al impacto Primera Grieta (PG) Media: 446 Covarianza:
	2	88.5-152	60	355	424	
	3	152-215.5	63	800	867	
	4	215.5-279	61	550	610	
2	5	25-88.5	63	118	135	Resistencia al impacto Última Grieta (UG) Media: 487 Covarianza:
	6	88.5-152	65	545	586	
	7	152-215.5	63	351	389	
	8	215.5-279	63	890	921	
3	9	25-88.5	64	114	153	
	10	88.5-152	65	198	235	
	11	152-215.5	65	447	475	
	12	215.5-279	62	113	153	

Mezcla 4 - 5 kg/m3 de fibra						
f'c 28 días: 300 Kg/cm2						
Cilindro	Muestra	Distancia de la parte superior (mm)	Espesor (mm)	Resistencia al impacto Número de Golpes		Valores Estadísticos
				Primera Grieta PG	Última Grieta UG	
1	1	25-88.5	65	257	333	Resistencia al impacto Primera Grieta (PG) Media: 693 Covarianza:
	2	88.5-152	62	494	572	
	3	152-215.5	65	650	744	
	4	215.5-279	63	69	109	
2	5	25-88.5	64	248	301	Resistencia al impacto Última Grieta (UG) Media: 764 Covarianza:
	6	88.5-152	65	1100	1165	
	7	152-215.5	65	1280	1370	
	8	215.5-279	63	371	443	
3	9	25-88.5	66	224	341	
	10	88.5-152	68	1541	1592	
	11	152-215.5	64	1496	1541	
	12	215.5-279	63	589	654	

Mezcla5 - sin fibra						
f'c 28 días: 300 Kg/cm2						
Cilindro	Muestra	Distancia de la parte superior (mm)	Espesor (mm)	Resistencia al impacto Número de Golpes		Valores Estadísticos
				Primera Grieta PG	Última Grieta UG	
1	1	25-88.5	65	1255	1256	Resistencia al impacto Primera Grieta (PG) Media: 553 Covarianza:
	2	88.5-152	65	759	762	
	3	152-215.5	64	368	369	
	4	215.5-279	65	558	559	
2	5	25-88.5	64	480	482	Resistencia al impacto Última Grieta (UG) Media: 555 Covarianza:
	6	88.5-152	64	704	705	
	7	152-215.5	64	495	496	
	8	215.5-279	66	344	345	
3	9	25-88.5	65	410	411	
	10	88.5-152	64	436	438	
	11	152-215.5	64	365	366	
	12	215.5-279	64	456	467	

Mezcla 6 - 1 kg/m3 de fibra						
f'c 28 días: 300 Kg/cm2						
Cilindro	Muestra	Distancia de la parte superior (mm)	Espesor (mm)	Resistencia al impacto Número de Golpes		Valores Estadísticos
				Primera Grieta PG	Última Grieta UG	
1	1	25-88.5	64	334	366	Resistencia al impacto Primera Grieta (PG) Media: 639 Covarianza:
	2	88.5-152	65	323	349	
	3	152-215.5	64	372	404	
	4	215.5-279	64	396	425	
2	5	25-88.5	64	652	683	Resistencia al impacto Última Grieta (UG) Media: 667 Covarianza:
	6	88.5-152	65	610	639	
	7	152-215.5	63	730	754	
	8	215.5-279	66	882	917	
3	9	25-88.5	64	930	962	Resistencia al impacto Última Grieta (UG) Media: 667 Covarianza:
	10	88.5-152	65	947	979	
	11	152-215.5	64	959	978	
	12	215.5-279	65	534	553	

Mezcla 7 - 3 kg/m3 de fibra						
f'c 28 días: 300 Kg/cm2						
Cilindro	Muestra	Distancia de la parte superior (mm)	Espesor (mm)	Resistencia al impacto Número de Golpes		Valores Estadísticos
				Primera Grieta PG	Última Grieta UG	
1	1	25-88.5	64	111	171	Resistencia al impacto Primera Grieta (PG) Media: 706 Covarianza:
	2	88.5-152	62	954	1004	
	3	152-215.5	63	830	916	
	4	215.5-279	64	640	763	
2	5	25-88.5	62	701	757	Resistencia al impacto Última Grieta (UG) Media: 776 Covarianza:
	6	88.5-152	65	1059	1113	
	7	152-215.5	64	841	920	
	8	215.5-279	63	1184	1244	
3	9	25-88.5	64	126	184	Resistencia al impacto Última Grieta (UG) Media: 776 Covarianza:
	10	88.5-152	65	179	237	
	11	152-215.5	65	573	668	
	12	215.5-279	63	1269	1338	

Mezcla 8 - 5 kg/m3 de fibra						
f'c 28 días: 300 Kg/cm2						
Cilindro	Muestra	Distancia de la parte superior (mm)	Espesor (mm)	Resistencia al impacto Número de Golpes		Valores Estadísticos
				Primera Grieta PG	Última Grieta UG	
1	1	25-88.5	64	395	483	Resistencia al impacto Primera Grieta (PG) Media: 815 Covarianza:
	2	88.5-152	64	1474	1566	
	3	152-215.5	65	546	808	
	4	215.5-279	63	403	715	
2	5	25-88.5	62	1302	1568	Resistencia al impacto Última Grieta (UG) Media: 969 Covarianza:
	6	88.5-152	64	1640	1782	
	7	152-215.5	65	280	400	
	8	215.5-279	63	584	690	
3	9	25-88.5	63	803	1031	Resistencia al impacto Última Grieta (UG) Media: 969 Covarianza:
	10	88.5-152	65	818	877	
	11	152-215.5	64	975	1054	
	12	215.5-279	63	563	652	

XVII JORNADAS CHILENAS
DEL HORMIGÓN
Santiago, Chile - Octubre 2009

PUBLICACIÓN EN CONGRESO INTERNACIONAL

XVII JORNADAS CHILENAS DEL HORMIGÓN, 2009
21 al 23 Octubre 2009.
SANTIAGO DE CHILE, CHILE

XVII JORNADAS CHILENAS DEL HORMIGÓN

EFFECTO DE LA ADICIÓN DE FIBRAS SINTÉTICAS SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN

Carlos Aire¹, Carlos Javier Mendoza² y María Paula Dávila³

*Universidad Nacional Autónoma de México -
Instituto de Ingeniería - Estructuras y Materiales
Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, 04510, México D.F.*

¹ Edificio 3, 2º Nivel – 217 – aire@pumas.iingen.unam.mx

² Edificio 2- 3º Nivel – 414 – cjm@pumas.iingen.unam.mx

³ Edificio 3- 2º Nivel – 215 – mdavilam@iingen.unam.mx

EFFECTO DE LA ADICIÓN DE FIBRAS SINTÉTICAS SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN

Carlos Aire¹, Carlos Javier Mendoza² y María Paula Dávila³

Universidad Nacional Autónoma de México – Instituto de Ingeniería

Estructuras y Materiales, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, 04510, México D.F.

¹ aire@pumas.iingen.unam.mx, ² cjm@pumas.iingen.unam.mx,

³ mdavilam@iingen.unam.mx

RESUMEN

Desde hace varios años, un gran número de contratistas han colocado hormigón conteniendo fibras sintéticas. Los fabricantes de fibras sintéticas han promovido el material como una alternativa práctica para controlar la contracción y el agrietamiento por temperatura, y mencionan además la facilidad con la cual pueden añadirse las fibras al hormigón y la mejora en la reducción de la contracción plástica, inhibición de la contracción por secado, reducción de la permeabilidad y mejora de la resistencia al impacto y abrasión.

En general, las fibras sintéticas que se adicionan en el hormigón se fabrican a partir de materiales sintéticos que pueden resistir el medio alcalino del hormigón a largo plazo. Se incorporan en el hormigón antes o durante la operación de mezclado y su dosificación no requiere de ningún cambio en el diseño de la mezcla.

La principal ventaja de la adición de fibras sintéticas en el hormigón es el incremento de la tenacidad y de la resistencia al impacto, en el estado endurecido y el control de la contracción plástica, en estado fresco. Adicionalmente, controla la aparición de fisuras durante la vida útil del elemento y brinda mayor resistencia a la fatiga. Con un adecuado diseño puede reemplazar el uso de las tradicionales mallas electrosoldadas o fibras de acero, lo que puede implicar un ahorro en el costo de la mano de obra de una construcción.

Esta investigación presenta los resultados de un estudio experimental para evaluar el comportamiento de la adición de un tipo de fibra sintética en la fabricación de hormigón. Se empleó cemento ordinario CPO 30R, arena andesítica, grava caliza de 19 mm de tamaño máximo, una fibra de copolímero tipo monofilamento y un aditivo reductor de agua de alto rango de nueva generación. Se estudian las propiedades en estado fresco de asentamiento, peso unitario, contenido de aire, contracción plástica, y en estado endurecido de resistencia a compresión, módulo elástico, resistencia a tensión por flexión y por compresión diametral, contracción por secado, tenacidad y resistencia al impacto.

INTRODUCCIÓN

En años recientes, las fibras sintéticas, y en particular las fibras de polipropileno han ganado popularidad para su uso en el hormigón, principalmente para mejorar la resistencia al agrietamiento por contracción plástica y la tenacidad del hormigón simple. Las fibras sintéticas se fabrican de materiales tales como acrílico, aramida, carbón, nylon, polyester,

polietileno o polipropileno. En general, las fibras sintéticas se caracterizan por tener elevada resistencia a la tensión, pero pueden diferenciarse dos categorías, las de alto y bajo módulo elástico. La mayoría de las fibras sintéticas pertenecen a los de bajo módulo elástico, tales como las de polipropileno, polyester, polietileno y nylon. La geometría mayormente usada en hormigón es la de monofilamento por su mejor agarre mecánico. La

principal ventaja de estas fibras es que son resistentes a medios alcalinos, tienen alto punto de fusión (hasta 165°) y bajo costo de la materia prima. La principal desventaja es que tiene pobre resistencia al fuego, baja adherencia con la matriz de cemento, pobre comportamiento ante exposición al sol y rayos ultravioletas. El bajo módulo elástico permite el incremento en la tenacidad y el control del agrietamiento por contracción. Sin embargo, parece que no incrementan la resistencia a flexión (Bentur y Mindness., 1990).

Las fibras sintéticas que son específicamente diseñadas para hormigón se fabrican a partir de materiales sintéticos que pueden resistir el medio alcalino del hormigón a largo plazo. Generalmente, se añaden al hormigón antes o durante la operación de mezclado y su uso en proporciones adecuadas no requiere de ningún cambio en el diseño de la mezcla. Sin embargo, su incorporación en la mezcla puede afectar el asentamiento, la trabajabilidad y acabado de la mezcla, para lo cual generalmente se emplean aditivos superplastificantes para evitar el problema de la reducción de la trabajabilidad.

La presencia de fibras sintéticas funciona como un soporte para la mezcla de hormigón al distribuirse uniformemente en su masa, distribuyendo los esfuerzos internos de contracción que tratan de separar la matriz de hormigón, por lo tanto controlando el agrietamiento. Asimismo, la nueva matriz integrada por la pasta de cemento y las fibras, da como resultado un incremento en la capacidad de carga, y mejora su comportamiento post-agrietamiento permitiendo sostener carga hasta altos valores de deformación, dando como resultado mayor tenacidad en el elemento.

Cuando la fibra sintética se usa en cantidades apropiadas puede controlar el agrietamiento debido a la contracción plástica del hormigón, lo cual ocurre generalmente durante las primeras seis horas después de la colocación del hormigón. En general, no se espera que la resistencia a compresión del hormigón se incremente debido a la adición de las fibras de polipropileno, sin embargo, se espera una mejora en su tenacidad, ductilidad, y resistencia al impacto.

Durante los últimos años se han realizado diversos estudios para evaluar las propiedades mecánicas del hormigón reforzado con fibras de

polipropileno; en los que el porcentaje de fibras ha variado entre 0.1 % y 10% del volumen. Algunos de estos resultados son contradictorios respecto a los efectos de las fibras de polipropileno sobre la resistencia a compresión y resistencia a flexión del hormigón (Alhozaimy et al., 1996). Algunos estudios indican que la presencia de las fibras tiene efectos negativos sobre la resistencia a compresión, aunque se alcanza ligeros incrementos en la resistencia a flexión, cuando se incrementa el contenido de fibra (Zollo et al., 1984; Hughes y Fattuchi, 1976). Sin embargo, otros estudios reportan efectos favorables de la adición de la fibra sobre la tenacidad ((Malish, 1985; Kraii, 1985), e incrementos en la resistencia a compresión del orden de 25% empleando 0.5% de fibras de polipropileno (Mindness y Vondran, 1988).

Este trabajo presenta los resultados de un estudio experimental para evaluar el comportamiento de la adición de una de fibra sintética en la fabricación de hormigón. Se empleó cemento Portland ordinario, arena andesítica, grava caliza, una fibra sintética y un superplastificante de nueva generación. Se determinaron sus propiedades en estado fresco, de asentamiento, peso unitario, contenido de aire, contracción plástica, y en estado endurecido de resistencia a compresión, módulo elástico, resistencia a flexión, a tensión por compresión diametral, contracción por secado, tenacidad y resistencia al impacto.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Se fabricaron 4 mezclas de hormigón, una de referencia, sin fibra y 3 con fibra. Los parámetros para el diseño de mezclas fueron el asentamiento (100 mm) y la resistencia a compresión (300 kg/cm²) para el hormigón sin fibra. A partir de la mezcla de referencia se incorporó la fibra. Las cantidades de fibra usada fue de 1, 3, y 5 kg/m³ de hormigón, que equivale aproximadamente a 0.1, 0.3 y 0.5% del volumen. Se determinaron las propiedades en estado fresco de asentamiento, peso unitario y contenido de aire, y propiedades mecánicas de resistencia a compresión, a tensión, a flexión, al impacto, el módulo elástico, la contracción por secado y la tenacidad.

Materiales

Los ingredientes de las mezclas de hormigón fueron: cemento Portland ordinario (ASTM C150); grava triturada de origen calizo de 19 mm de

tamaño máximo (densidad 2.51, absorción 1.73%), arena de origen andesítico (densidad 2.31, absorción 9.05%), agua, y una fibra sintética de polipropileno. Los agregados cumplieron con los requisitos de la norma ASTM C33. Se usó un superplastificante de nueva generación (ASTM C494, tipo F), en las mezclas de baja trabajabilidad con el fin de mantener el asentamiento en el límite establecido, definido en 100 ± 25 mm. La fibra sintética usada en este trabajo fue de tipo monofilamento no fibrilada. Alguna de las características de la fibra se presenta en la tabla 1. Todas las pruebas se realizaron de acuerdo con las normas ASTM correspondientes.

Tabla 1 Propiedades de la fibra sintética (datos del fabricante)

Tipo de fibra	Monofilamento de copolímero virgen	Apariencia
Color	Gris	
Longitud, mm	38	
Resistencia a tensión, kg/cm ²	6328 – 7031	
Modulo elástico, GPa	4.3	
Gravedad específica	0.93	
Punto de ignición, °C	177	

Proporcionamiento de mezcla

El diseño de mezclas se hizo de acuerdo con las recomendaciones del ACI 211.1 (*Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete*), y por el método de Mínimos Vacíos (*Volúmenes Absolutos*). El procedimiento de diseño y la determinación de las proporciones de los materiales en el hormigón se basaron en mezclas de prueba preliminares. La variable principal para este procedimiento fue alcanzar mezclas de consistencia adecuada, de 100 mm de asentamiento, para facilitar la manipulación, colocación y compactación, determinada por la prueba de asentamiento (ASTM C143). La resistencia de diseño se fijó en 300 kg/cm^2 . De las tablas del ACI 211.1, para el hormigón de referencia, primero se determinó la cantidad aproximada del agua de mezclado y el contenido de aire atrapado en la mezcla, para el tamaño máximo del agregado y el asentamiento deseado. De la misma tabla, se eligió la relación agua/cemento para la resistencia de diseño especificada. Con estos datos se calcula las

cantidades de agua y cemento en la mezcla, y por volúmenes absolutos se determinan las cantidades de arena y grava. Con este proporcionamiento se fabricaron mezclas de prueba hasta conseguir una mezcla con un asentamiento de 100 ± 25 mm. En el caso de las mezclas de hormigón con fibra de polipropileno, se usó el mismo diseño de la mezcla del hormigón de referencia, no se hizo ningún cambio, solo se añadió la fibra, sin embargo, se trató de mantener el asentamiento de 100 ± 25 mm. En caso necesario se añadió un superplastificante, en la dosis necesaria, para conseguir el asentamiento deseado.

Se fabricaron 4 mezclas: una mezcla de referencia, sin fibra sintética, y tres mezclas con cantidades de fibra sintética de 1, 3 y 5 kg/m^3 . La tabla 2 muestra las proporciones de mezcla definitivas. La mezcla M1 es la mezcla de referencia, sin fibra de polipropileno, mientras que las mezclas M2 a M4, son las mezclas con fibras.

Fabricación de los especímenes

Todas las mezclas fueron fabricadas en una mezcladora con capacidad de 90 litros. El procedimiento de mezclado fue el siguiente: Para las mezclas de hormigón de referencia (sin fibras) se colocó en la mezcladora, la arena, la grava y una cantidad de agua equivalente al agua de absorción, dejándose mezclar durante 1 minuto. Enseguida se añadió el cemento, y el agua restante, dejando mezclar durante 3 minutos. Después se dejó en reposo durante 3 minutos para evitar el falso fraguado del cemento, cubriendo la mezcladora con una tela húmeda. Posterior al reposo, se reinició el mezclado y se dejó mezclar durante 2 minutos finales. En total fueron 9 minutos de mezclado. Para las mezclas con fibra el procedimiento de mezclado fue el siguiente: Para las mezclas sin superplastificante el tiempo de mezclado fue de 11 minutos, 9 minutos de mezclado inicial similar al hormigón de referencia, después del cual se añadió la fibra dejándose mezclar durante 2 minutos finales. Para las mezclas que requirieron superplastificante el tiempo de mezclado fue de 13 minutos, 11 minutos de mezclado inicial similar al anterior de las mezclas con fibra, después del cual se añadió el superplastificante para alcanzar el asentamiento deseado, dejándose mezclar durante 2 minutos finales. En todos los casos las pruebas en estado fresco se realizaron al final del

XVII JORNADAS CHILENAS
DEL HORMIGON
Santiago, Chile - Octubre 2009

tiempo de mezclado, es decir, después de 9, 11 ó
13 minutos.

Tabla 2 Proporciones de mezcla (kg/m³)

ID	M1	M2	M3	M4
Cemento (c)	362	362	362	362
Arena (f)	742	742	742	742
Grava (g)	936	936	936	936
Agua (a)	177	177	177	177
Fibra (kg/m ³)	-	1	3	5
Aditivo, ml/m ³	-	-	-	1508
Relación a/c	0.49	0.49	0.49	0.49



PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS

Contracción plástica

Para las pruebas de contracción plástica se siguieron las recomendaciones y referencias del ACI 544.2R (ACI 544.2R "Measurements of Properties of Fiber Reinforced Concrete"). El procedimiento se basa en muestras de anillos de 80 mm de altura y diámetros interior y exterior de 280 y 580 mm, respectivamente, moldeados sobre una superficie metálica no absorbente. El molde metálico sobre el cual se fabrica el espécimen tiene 12 restricciones metálicas colocadas simétricamente sobre el anillo metálico exterior. Las dimensiones de las restricciones son de 5 mm de espesor, 30 mm de longitud y 80 mm de altura. La prueba consiste en fabricar anillos, y someterlas a un flujo de viento de 4 m/s en un ambiente controlado a una temperatura de 20°C y una humedad relativa de 40%.

El moldeado de los anillos fue en una sola capa, compactado en una mesa de vibrado durante 25 segundos. La figura 1 muestra el molde y la mesa de vibrado empleado. El desarrollo de la prueba consiste en el continuo monitoreo de la aparición de grietas sobre la superficie del hormigón. La prueba tiene una duración aproximada de 6 horas desde la aparición de las primeras grietas hasta que ya no se presentan mayor cantidad de ellas o hasta que se detiene el desarrollo de las mismas.



Figura 1 Molde para la prueba de contracción plástica

Resistencia a compresión, módulo elástico y resistencia a tensión

Para estas pruebas se fabricaron cilindros 150 x 300 mm. El procedimiento de moldeado se realizó de acuerdo con la norma ASTM C192. Todos los cilindros fueron moldeados en dos capas y compactados usando una mesa de vibrado durante 25 segundos; y fueron desmoldados 24 horas después de fabricados y almacenados en un cuarto de curado húmedo a temperatura y humedad controlados ($23 \pm 2^\circ\text{C}$, $95 \pm 5\%$) como lo establece la norma ASTM C192 hasta su fecha de prueba. Las edades de prueba fueron: 7 y 28 para las pruebas de resistencia a compresión y 28 días para el módulo elástico. Previo a las pruebas de resistencia a compresión y de módulo elástico, los cilindros fueron retirados del cuarto de curado húmedo y después de pesarlos y medirlos fueron cabeceados con una capa de azufre, con el fin de garantizar la uniformidad y paralelismo de las caras de apoyo durante las pruebas. El cabeceado con azufre se realizó de acuerdo con la norma ASTM C617. Los cilindros para las pruebas de resistencia a tensión por compresión diametral no requieren de preparación previa a la prueba, únicamente pesarlos y tomar sus dimensiones.

Las pruebas de resistencia a compresión y módulo elástico se realizaron de acuerdo con las normas ASTM C39, y C469, respectivamente. Para la aplicación de la carga se utilizó una prensa universal modelo SATEC con capacidad de 250 t. La aplicación de la carga fue de 25 t/min. En el caso de las pruebas para determinar el módulo elástico, se aplicaron 5 precargas hasta un nivel del 40% de la carga de rotura de los cilindros ensayados a compresión, y finalmente se realizó la prueba hasta la falla. El módulo elástico se obtuvo a partir de las gráficas esfuerzo-deformación de los cilindros ensayados a compresión. Se usó el criterio del módulo secante, haciendo pasar una recta por el 40% del esfuerzo máximo y la deformación unitaria correspondiente a 50 millonésimas. Para el registro de las deformaciones axiales y transversales se utilizó un compresómetro que consta de transductores de desplazamiento tipo LVDT (Linear Variable Differential Transformers) de ± 25 mm de rango. La distancia de referencia para el cálculo de las deformaciones unitarias fue de 150 mm. Para la adquisición de los datos (cargas y desplazamientos) se utilizó un sistema de captura multicanal TDS-302, integrado a una computadora a través de un puerto de entrada/salida (puerto de serie). En esta computadora se registran los datos, que posteriormente son procesados en gabinete. La frecuencia del registro fue cada 2 segs.

Las pruebas de resistencia a tensión por compresión diametral se realizaron de acuerdo con la norma ASTM C496. Se utilizó el mismo equipo empleado en las pruebas de resistencia a compresión y módulo elástico, y la velocidad de aplicación de carga fue de 7 t/min..

Resistencia a flexión y tenacidad

Para estas pruebas se fabricaron vigas de $150 \times 150 \times 600$ mm. El procedimiento de moldeado y curado fue similar a los especímenes usados en las pruebas de resistencia a compresión y módulo elástico.

Las pruebas se realizaron de acuerdo con la norma ASTM C1018, aplicando carga a los tercios del claro de la viga a una velocidad de desplazamiento de 0.10 mm/min, como lo establece la norma. La información de la respuesta completa carga-desplazamiento de la prueba a flexión, requiere de un equipo de prueba muy rígido y un sistema de control que permita

obtener información del postpico (postagrietamiento), por lo que para las pruebas se empleó un equipo servohidráulico con capacidad de 25 t conformado por un marco rígido controlado por un sistema analógico de lazo cerrado MTS que permite el control por desplazamiento. La información del postpico permitirá calcular la tenacidad y los índices de tenacidad a los niveles de desplazamiento que establece la norma. La instrumentación se hizo mediante transductores de desplazamiento tipo LVDTs de 100mm de rango y con una cámara Krypton 600 para mediciones ópticas en 3 dimensiones que permiten obtener información del desplazamiento de la viga en varios puntos definidos (iluminación con LEDs).

Resistencia al impacto

De acuerdo con la recomendación del ACI 544.2R (ACI 544.2R "*Measurements of Properties of Fiber Reinforced Concrete*"), la prueba se realiza sobre una muestra circular de hormigón de 150 mm de diámetro y 63.5 mm de espesor, por lo que se fabricaron cilindros de 150×300 mm. La prueba consiste en dejar caer repetidamente un peso de acero de 4.54 kg desde una altura de 457 mm sobre la muestra de hormigón. El peso de acero se deja caer repetidamente, y se registra el número de veces necesario, para generar la primera fisura sobre la parte superior de la muestra y hasta causar la falla última, debiendo reportarse ambos datos. La figura 2 muestra el dispositivo de prueba de impacto.





Figura 2 Dispositivo de prueba de impacto

Contracción por secado

Para las pruebas de contracción por secado se fabricaron prismas de 75 x 75 x 280 mm. El procedimiento de moldeado de los prismas se realizó de acuerdo con la norma ASTM C157. El moldeado de los prismas fue en dos capas y compactados usando una mesa de vibrado durante 25 segundos. A las 24 horas de moldeado se desmoldaron los prismas y fueron almacenados en recipientes con agua con cal en la cámara de curado hasta la realización de las primeras lecturas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO

Los resultados de las pruebas en estado fresco se presentan en la tabla 3.

El asentamiento muestra una ligera disminución a medida que se incrementa la cantidad de fibra en la mezcla, no obstante, la trabajabilidad permitió el moldeado de los especímenes. Sin embargo, la trabajabilidad se puede afectar con altos consumos de fibra y bajas relaciones agua/cemento. Esto, se puede corregir añadiendo una dosis adecuada de un superplastificante para renovar la trabajabilidad perdida, como es el caso de este trabajo, que para la mezcla M4 con 5 kg/m³ de fibra se añadió un superplastificante para alcanzar el asentamiento deseado. Por otro lado, el asentamiento depende principalmente de la absorción de agua y porosidad de los agregados, contenido de agua en la mezcla, cantidad de agregados fino y grueso en la mezcla, forma y superficie de los agregados, por

lo que podría no ser suficiente la adición de un superplastificante, sino además podría ser necesario modificar el proporcionamiento de mezcla para conseguir una adecuada trabajabilidad.

El peso unitario no presenta variación significativa cuando se incorpora las fibras a la mezcla. Así por ejemplo, el peso unitario para la mezcla M1, de referencia sin fibra, es 2280 kg/m³, y para las mezclas con fibra (M2 a M4) es de 2272 kg/m³, en promedio.

El contenido de aire para la mezcla M1 sin fibra fue de 2.0% y para las mezclas con fibra (M2 a M4) fue de 2.3%, en promedio. Los valores se consideran como normales para ambas mezclas, lo que puede indicar que no hay efecto significativo por la adición de la fibra.

Tabla 3 Propiedades en estado fresco

Mezcla	Asentamiento, cm	Peso Unitario, kg/m ³	% de Aire
M1 (0 kg/m ³ de fibra)	12.0	2281	2.0
M2 (1 kg/m ³ de fibra)	9.9	2271	2.4
M3 (3 kg/m ³ de fibra)	8.7	2280	2.2
M4 (5 kg/m ³ de fibra)	9.8	2266	2.2

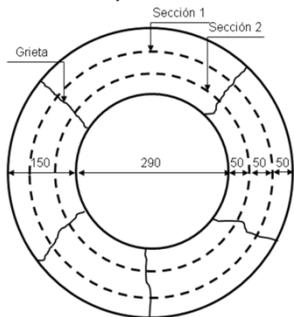
Contracción plástica

La figura 3 muestra la configuración de la prueba. Las condiciones del ambiente se mantuvieron en 20° de temperatura, 40% de humedad relativa y una velocidad de 4 m/s. El objetivo es calcular un índice de grieta.

La figura 4 muestra un croquis sobre un esquema de desarrollo de grietas. El índice de grieta se calcula como el promedio de los anchos de grieta sobre la sección 1 y sección 2.



Figura 3 Configuración de la prueba de contracción plástica



a. Esquema del desarrollo de grietas
b. Anillo de la mezcla M1

Figura 4 Esquema del desarrollo de grietas

A la fecha solo se tienen los resultados para la mezcla 1. Su índice de grieta es de 0.31.

PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO

Resistencia a compresión

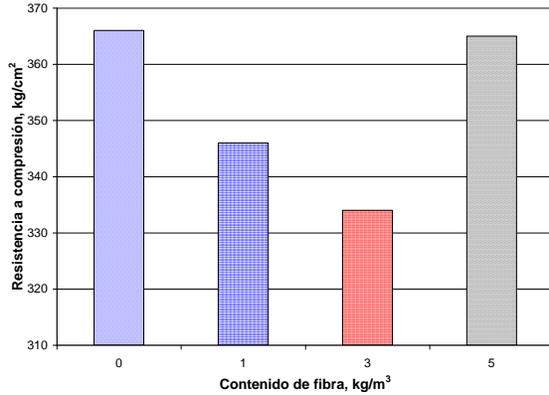
Bajo compresión uniaxial, el modo de falla de los cilindros presenta una fisuración típica, caracterizada por la formación de grietas paralelas a la dirección de la carga, como se muestra en la tabla 4. Como se observa, a medida que se incrementó el contenido de la fibra, entre 3 y 5 kg/m³, la presencia de las fibras permite que, en la falla, el cilindro no se destruya completamente, como es el caso de la mezcla sin fibra. Los resultados se presentan en la tabla 5 (promedio de 3 pruebas) y figura 5.

Existe una disminución de la resistencia a compresión a medida que se incrementa la dosis de la fibra en la mezcla. Esto puede estar asociado a que las fibras sintéticas es un material hidrofóbico debido a su estructura química lo que genera una baja adherencia fisicoquímica de las fibras con la pasta de cemento, afectando negativamente su dispersión en la matriz. La disminución de la resistencia es del 5% para una dosis de 1 kg/m³, sin embargo, a medida que se incrementa la dosis a 3 kg/m³, el porcentaje de disminución aumenta a cerca de 9%. También puede ser que gran parte de la matriz está ocupada por un material más dúctil o a causa de insuficiente compactación debido a la presencia de la fibra, lo que genera el descenso de la resistencia. Al parecer la incorporación del superplastificante favorece y mejora la dispersión de la fibra en la matriz dando como resultado un leve incremento de la

resistencia como se observa en la mezcla M5 en la que se añadió el superplastificante.

La relación entre la resistencia a compresión de 7 a 28 días de prueba fue de 0.65 para la mezcla M1 sin fibras, mientras que para las mezclas con fibra (M2 a M4) fue de 0.60, en promedio. Es decir, no existe variación importante en el desarrollo de resistencias a esas edades, debido a la incorporación de las fibras.

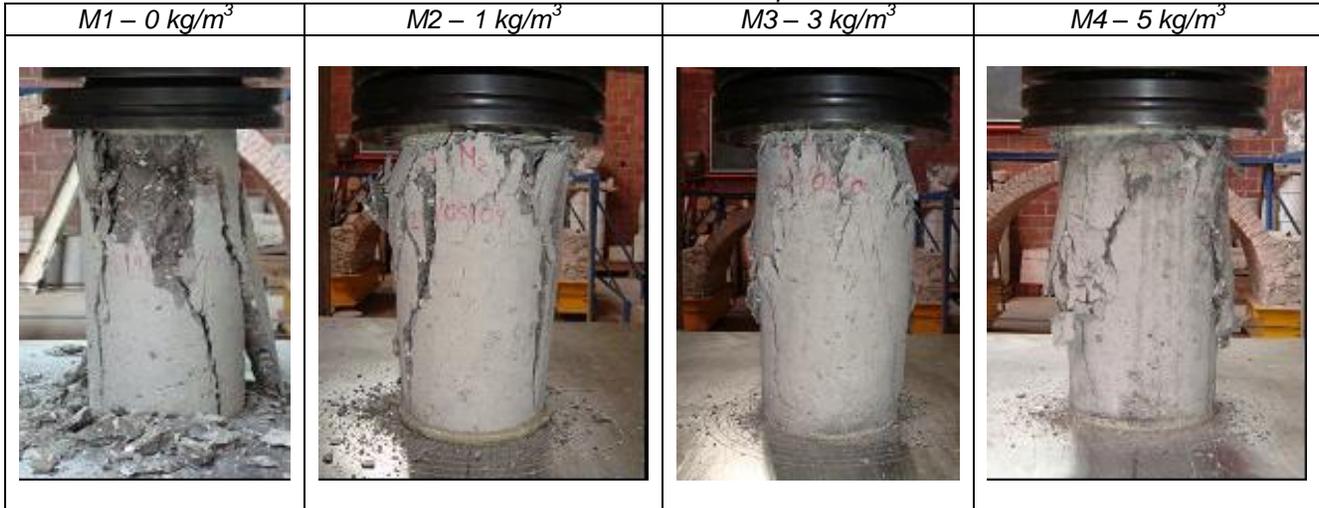
Tabla 5 Resistencia compresión, módulo elástico y relación de Poisson



ID	Resistencia a compresión kg/cm²		$f_{c7 \text{ días}}/f_{c28 \text{ días}}$	Módulo elástico kg/cm²	Relación de Poisson
	7 días	28 días			
M1	238	366	0.65	241,986	0.26
M2	241	346	0.70	233,255	0.22
M3	230	334	0.69	248,975	0.21
M4	252	365	0.69	247,108	0.24

Figura 5 Resistencia a compresión a diferentes dosis de fibra

Tabla 4 Modo de falla de las muestras de resistencia a compresión



Módulo elástico y Relación de Poisson

La figura 6 muestra el comportamiento esfuerzo-deformación de las mezclas estudiadas, a partir del cual se determinaron los módulos elásticos. En esta figura se observa que los módulos elásticos son bastante similares para las mezclas de referencia y las mezclas con fibra. Además, en la tabla 5 se muestran los resultados de módulo elástico (promedio de 3 pruebas), y los valores se encuentran dentro del rango de valores comúnmente encontrados en hormigones convencionales. El valor promedio es de 243,000 kg/cm².

La relación de Poisson que relaciona la deformación transversal con respecto a su deformación axial, fue en promedio, de 0.22 para las mezclas con fibra, mientras que para

el hormigón de referencia sin fibra fue de 0.26. Los valores obtenidos están dentro del rango esperado (entre 0.11 y 0.27), aunque generalmente varían entre 0.15 y 0.20 para hormigones convencionales, de peso normal (Freedman, 1974).

La deformación unitaria correspondiente al esfuerzo máximo es, en promedio, 2.6×10^{-3} para la mezcla de referencia y con fibra, como se observa en la tabla 6. Este es un valor que normalmente se obtiene en hormigones convencionales (2×10^{-3}) para el esfuerzo máximo.

Además, en la tabla 6 se muestra la relación entre el módulo de elasticidad y la raíz cuadrada de su resistencia a compresión correspondiente (a 28 días). El coeficiente que

relaciona la resistencia a compresión y el módulo elástico es bastante cercano a los que se obtienen en hormigones convencionales (14,000).

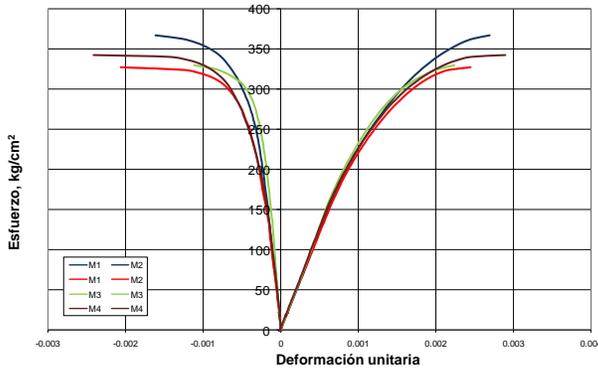


Figura 6 Curvas esfuerzo-deformación de las mezclas

Tabla 6 Resistencia compresión, módulo elástico y deformación unitaria máxima

Resistencia a tensión por flexión

Los resultados a 28 días, promedio de 3 pruebas, se muestran en la tabla 7.

El efecto de la fibra contribuyó al incremento de la resistencia a flexión. El mayor incremento se alcanzó cuando se añadió 5 kg/m³ de fibra. La tabla también muestra la relación entre la resistencia a flexión y su correspondiente resistencia a compresión. En promedio, a 28 días de edad, la resistencia a flexión es 11% de su resistencia a compresión para las mezclas con fibra, y casi 10% para la mezcla sin fibra. Además, la tabla presenta la expresión que relaciona la resistencia a flexión con la raíz cuadrada de su resistencia a compresión. Evidentemente, el coeficiente que relaciona estos valores es ligeramente mayor en el caso de las mezclas con fibra, de 2.1, en comparación con 1.8 para la mezcla sin fibras. Que se haya alcanzado resistencias a flexión de tan sólo 10-11 % de la resistencia a compresión se debe en parte a que la prueba se hizo por control de desplazamiento y no de carga.

Tabla 7 Resultado de las pruebas de resistencia a tensión por flexión en vigas

ID	Resistencia a Compresión kg/cm ²	Resistencia a flexión kg/cm ²	f _t /f _c %	f _t /√f _c
M1	366	35	9.6	1.83
M2	346	39	11.3	2.10
M3	334	39	11.7	2.13
M4	365	40	11.0	2.10

Resistencia a tensión por compresión diametral

La tabla 8 muestra el modo de falla de los cilindros y la tabla 9 los resultados a 28 días, promedio de 3 pruebas, de la resistencia a tensión por compresión diametral.

Los cilindros de hormigón de referencia presentan una falla típica que se caracteriza por la rotura repentina del cilindro, que se considera como falla frágil; mientras que los cilindros de hormigón con fibra presentan una

ID	Resistencia a Compresión kg/cm ²	Módulo elástico kg/cm ²	Deformación unitaria máxima ε _o	E _c /√f _c
M1	366	241,986	0.0026	12,649
M2	346	233,255	0.0027	12,540
M3	334	248,975	0.0023	13,623
M4	365	247,108	0.0027	12,934

típica falla dúctil.

Como se observa en la tabla, la resistencia a tensión determinada mediante la prueba de compresión diametral en cilindros, presenta valores menores que aquellos determinados bajo la prueba de resistencia a tensión por flexión en vigas. Sin embargo, no se observa diferencia entre los valores encontrados para las mezclas sin fibra y con fibra.

En promedio, la resistencia a tensión por compresión diametral es casi 30 kg/cm². En promedio, la resistencia a tensión por compresión diametral de las mezclas con fibra es de 8.7% de su resistencia a compresión correspondiente, a 28 días. La tabla también muestra la expresión que relaciona la resistencia a tensión por compresión diametral con su correspondiente resistencia a compresión. Los valores encontrados son bastantes similares para ambos tipos de mezclas, con valores de 1.52 para las mezclas sin fibra y de 1.62 para las mezclas con fibra.

Tabla 8 Modo de falla de las muestras de resistencia a compresión diametral

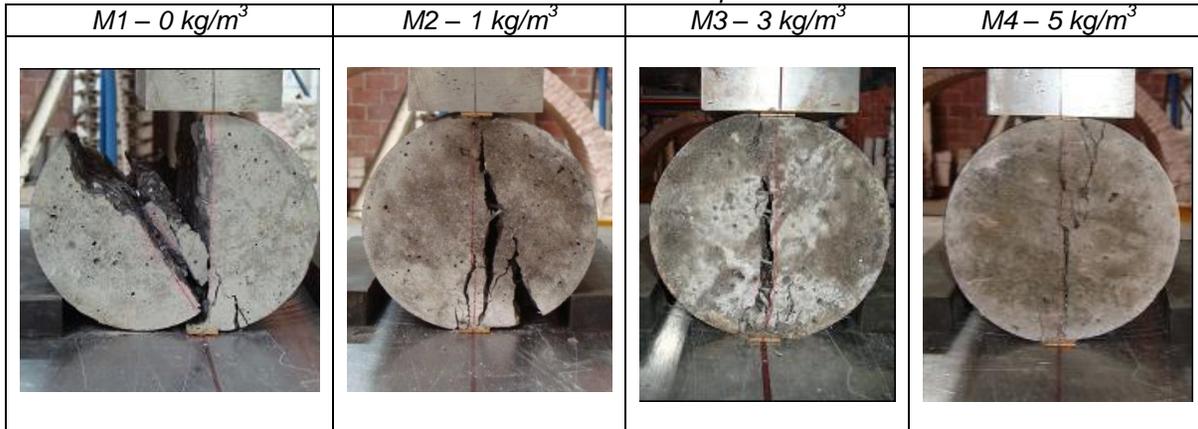


Tabla 9 Resultado de las pruebas de resistencia a tensión por compresión diametral

ID	Resistencia a compresión kg/cm ²	Resistencia a tensión kg/cm ²	f/f _c %	f _t /√f _c
M1	366	29	7.9	1.52
M2	346	30	8.7	1.61
M3	334	29	8.7	1.59
M4	365	32	8.8	1.67

Resistencia al impacto

La figura 7 muestra un croquis de cortes para obtener las muestras para las pruebas (150 × 63.5 mm) según lo especificado en la ACI 544.2R. En cada caso se probaron 12 muestras que se obtuvieron de 3 cilindros.

La tabla 10 muestra la falla típica, a la falla total, de las muestras ensayadas. En general, se presentan 3 grietas radiales. Las muestras que fallaron diametralmente resistieron menor número de impacto, probablemente por que presentaron menor capacidad de absorción de la energía de impacto.

Los resultados se presentan en la tabla 11. A excepción de la mezcla M2, la incorporación de la fibra tuvo un efecto positivo en la resistencia al impacto. Es evidente que, a mayor contenido de fibras, mayor es la resistencia al impacto, para el mismo nivel de resistencia a compresión, que es del orden de 350 kg/cm².

La resistencia al impacto para la aparición de la primera grieta (RIPG), dada como el número de golpes necesario para generar la

primera fisura es casi el doble cuando se incorpora 5 kg/m³ de fibra. Del mismo modo, la resistencia al impacto para la falla total, definida como la resistencia al impacto último (RIU), dada como el número de golpes necesario para generar la falla total es más del doble cuando se incorpora 5 kg/m³ de fibra.

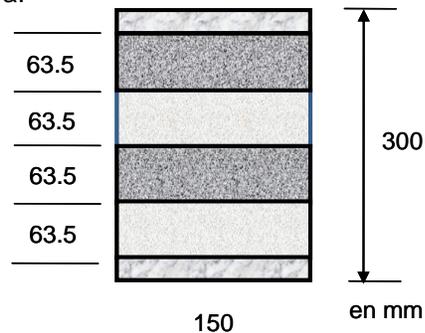


Figura 7 Esquema de cortes para la prueba de Resistencia al Impacto

Tabla 11 Resultado de las pruebas de resistencia al impacto

ID	Resistencia al Impacto (RI)	
	Número de golpes	
	Primera Grieta (RIPG)	Última Grieta (RIU)
M1	347	350
M2	225	255
M3	446	490
M4	693	764

Tabla 10 Modo de falla de las muestras de resistencia al impacto

M1 – 0 kg/m ³	M2 – 1 kg/m ³
	
M3 – 3 kg/m ³	M4 – 5 kg/m ³
	

Tenacidad

De acuerdo con la norma ASTM C1018 la tenacidad o absorción de energía es definida como el área bajo la curva carga-desplazamiento. Se calcula en 4 puntos específicos de desplazamiento: una previa al pico (δ), y 3 después del pico (3δ , 5.5δ y

10.5δ) como se muestra en la figura 8. La tenacidad en el valor δ , se considera como la tenacidad a la primera grieta, conocida también como la tenacidad elástica o tenacidad en el prepico; mientras que las otras 3 (3δ , 5.5δ y 10.5δ) son las del postpico. La figura 9 muestra la instrumentación de una prueba a flexión en vigas para la determinación de la tenacidad.

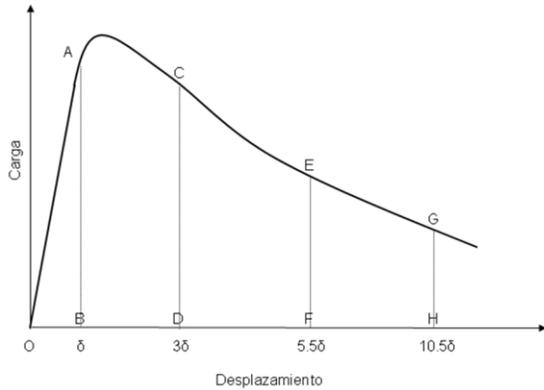


Figura 8 Tenacidad de acuerdo con la norma ASTM C1018

De la figura 8, se tiene que:

Área OAB = Tenacidad correspondiente al desplazamiento δ .

Área OCD = Tenacidad correspondiente al desplazamiento 3δ .

Área OAEF = Tenacidad correspondiente al desplazamiento 5.5δ .

Área OAGH = Tenacidad correspondiente al desplazamiento 10.5δ .

Asimismo, es posible determinar los Índices de Tenacidad que es la relación entre la tenacidad en el postpico y la tenacidad del prepico (elástica), de acuerdo con lo siguiente:

$$I_5 = \text{Área OACD} / \text{Área OAB}$$

$$I_{10} = \text{Área OAEF} / \text{Área OAB}$$

$$I_{20} = \text{Área OAGH} / \text{Área OAB}$$



Figura 9 Configuración de la prueba de resistencia a flexión

La figura 10 muestra el comportamiento carga-desplazamiento de las mezclas. Se observa que, a medida que se incrementa el contenido de fibra en la mezcla, la capacidad de absorción de energía, medida como área bajo la curva carga-desplazamiento, es mayor.

La tabla 12 muestra el modo de falla de las vigas ensayadas. Las vigas de referencia presentaron una falla típica caracterizada por la rotura repentina al llegar a la carga de rotura. En el caso de las vigas de hormigón con fibra, la falla se caracteriza por presentar una rotura dúctil, lo que le permite alcanzar grandes deformaciones manteniendo un nivel de carga según el contenido de fibra de las mezclas.

La tabla 13 muestra los resultados de tenacidad. La tenacidad se incrementa a medida que se incrementa la cantidad de fibra en la mezcla. Esto es más evidente con los mayores valores de índice de tenacidad para los mayores consumos de fibra. Esto quiere decir que a mayor cantidad de fibra el hormigón presenta mayor capacidad de absorción de energía.

Tabla 13 Resultado de las pruebas de tenacidad

I D	Tenacidad (joules)				Índices de tenacidad		
	T_δ	$T_{3\delta}$	$T_{5.5\delta}$	$T_{10.5}$	I_5	I_{10}	I_{20}

XVII JORNADAS CHILENAS
DEL HORMIGÓN
Santiago, Chile - Octubre 2009

				δ			
M	35.	62.	69.8	82.6	1.	1.	2.
2	65	46	2	4	75	96	32
M	27.	50.	70.9	99.6	1.	2.	3.
3	95	08	3	4	79	54	57
M	32.	71.	119.	197.	2.	3.	6.
4	08	94	16	11	24	72	16

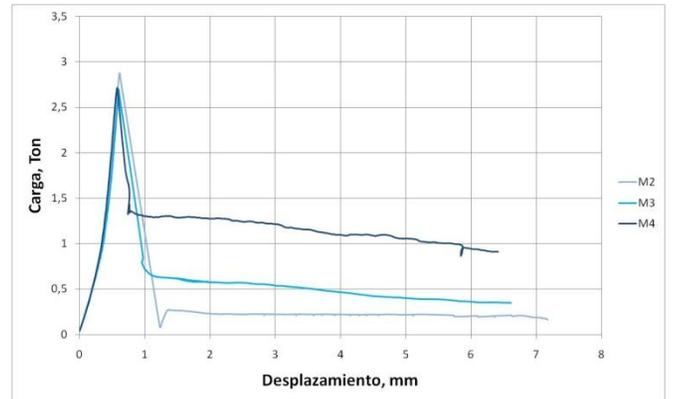
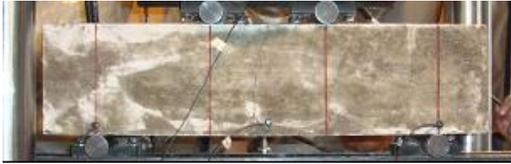
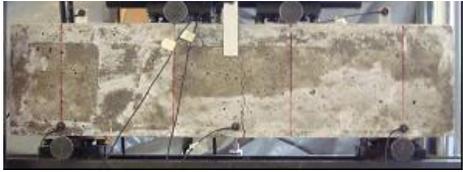


Figura 10 Comportamiento carga-desplazamiento

Tabla 12 Modo de falla de las muestras de resistencia a flexión

<i>M1 – 0 kg/m³</i>	<i>M2 – 1 kg/m³</i>
	
<i>M3 – 3 kg/m³</i>	<i>M4 – 5 kg/m³</i>
	

Contracción por secado

La tabla 14 presenta los resultados de contracción de los hormigones estudiados y la ecuación para su cálculo en el tiempo. Los resultados se encuentran en el rango especificado por el ACI 209, es decir, entre 415 y 1070×10^{-6} . Los valores son ligeramente mayores para las mezclas M3 y M4. Para reducir la contracción por secado, se puede disminuir el contenido de agua, por lo tanto reducir la relación agua/cemento. Los

resultados de la tabla son preliminares a 55 días y se continua con el monitoreo del cambio de longitud de las barras de contracción.

Tabla 14 Contracción por secado última

**XVII JORNADAS CHILENAS
DEL HORMIGÓN
Santiago, Chile - Octubre 2009**

ID	$\varepsilon_t = \frac{t^a}{b + t^a} (\varepsilon_c)_u$		
	a	b	$(\varepsilon_c)_u \times 10^{-6}$
M1	1	10.8	447
M2	1	9.2	428
M3	1	11.1	761
M4	1	16.3	751

contenido de fibras, mayor es la resistencia al impacto, a excepción de la mezcla M2.

El efecto más importante de la incorporación de la fibra en el hormigón es el incremento en la tenacidad. La tenacidad se incrementa a medida que se incrementa la cantidad de fibra.

La contracción por secado última de las mezclas se encuentra en el rango esperado para hormigón convencional. Los resultados son preliminares a 55 días de prueba.

CONCLUSIONES

Se presentan los resultados de evaluar el comportamiento de una fibra sintética en la fabricación de hormigones. A continuación se presentan las principales conclusiones:

Las propiedades en estado fresco, así como las propiedades mecánicas y de tenacidad son influenciadas por la incorporación de la fibra.

El asentamiento disminuye ligeramente cuando se usa la fibra, aunque puede recuperarse usando superplastificante. El peso unitario y contenido de aire no presentaron cambios. La contracción plástica aún se encuentra en su etapa preliminar.

La resistencia a compresión de los hormigones con fibra es menor, lo que puede asociarse a su baja adherencia fisicoquímica de las fibras con la pasta de cemento.

Los valores encontrados de módulo elástico de 243,000 kg/cm², relación de Poisson entre 0.22 y 0.26 y deformación unitaria correspondiente al esfuerzo máximo de 26×10^{-3} , en promedio, corresponden a valores comúnmente encontrados en hormigones convencionales.

La incorporación de la fibra contribuyó al incremento de la resistencia a flexión. En promedio, la resistencia a flexión a 28 días es 11% de su resistencia a compresión para las mezclas con fibra, y casi 10% para la mezcla sin fibra.

La incorporación de la fibra tuvo un efecto positivo en la resistencia al impacto. A mayor

REFERENCIAS

- ACI 209 (1992). Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures. ACI 209R-92. Reported by ACI Committee 209.
- ACI 211 (1991). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete. ACI 211.1. Reported by ACI Committee 211.
- ACI 544 (1989). Measurements of Properties. ACI 5442R. Reported by ACI Committee 544.
- Alhozaimy A., Soroushian P. y Mirza F. (1996). Mechanical Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete and the Effects of Pozzolanic Materials. Cement & Concrete Composites 18, pp 85-92.
- ASTM C 33, C39, C143, C150, C157, C192, C469, C490, C494, C617, C496, C618, C1018. ASTM Book of Standards, Vol. 04.02. American Society for Testing and Materials.
- Bentur y Mindness (1990). Fibre reinforced cementitious Composites, Elsevier Science Publishing, USA
- Freedman S. (1974). Properties of Materials for Reinforced Concrete. Handbook of Concrete Engineering. M. Fintel (ed.). Von Nostrand Reinhold Company, New York
- Hughes B. y Fattuhi N. (1976). Improving the toughness of high strength cement paste with fiber reinforcement. Composite, 7(4), 185-8
- Kraai P. (1985). Proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete. Concrete Construction, 30, pp 775-778.

XVII JORNADAS CHILENAS
DEL HORMIGON
Santiago, Chile - Octubre 2009

- Malisch W. (1986). Polypropylene Fibers in Concrete, What do the test tell us?. Concrete Construction, 31, 363-8.
- Mindness S. y Vondran G (1988). Properties of concrete reinforced with fibrillated polypropylene fibers under impact loading". Cement and Concrete Research, 109-15.
- Zollo R. (1984). "Collated fibrillated polypropylene fibers in FRC. Fiber reinforced. Concrete International Symposium, ACI SP 81-19, pp 397-409.