



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Uso de fibras de acero en el  
concreto obtenidas del  
reciclaje de neumáticos**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Mariana José Muñoz



**DIRECTOR DE TESIS**

Ing. Juan Luis Cottier Caviedes

**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., Octubre 2018**

## Agradecimientos

### A mi familia:

Les doy las gracias a mis papás Oscar y Silvia que me cuidaron y apoyaron a lo largo de tantos años. Gracias por su cariño incondicional, que a base de esfuerzo, amor y comprensión me han guiado en la vida y en mi profesión.

### A mis amigos:

Ya que han sido muy importantes durante mi paso en la facultad y fuera de ella. Gracias por su amistad , apoyo, por las experiencias inolvidables y por el apoyo que me brindaron para desarrollar este trabajo.

### A mi asesor el Ing. Juan Luis Cottier Caviedes:

Gracias por la paciencia, dedicación , compromiso y por compartir sus conocimientos conmigo, ya que con su ayuda fue posible realizar esta investigación.

### A Concretos Moctezuma:

Por brindarme todo el apoyo con los materiales utilizados en este trabajo y por la buena disposición que siempre tuvieron conmigo y con esta investigación.

### A Neo Habitat:

Por brindarme apoyo con las fibras utilizadas en este trabajo y por la buena disposición que siempre tuvieron conmigo y con esta investigación.

### A todos los profesores que tuve durante la carrera:

Para darme las herramientas necesarias para desempeñare en el ámbito profesional, por la paciencia y dedicación.

### A la UNAM y a la Facultad de Ingeniería:

Por ser mii segundo hogar durante la carrera y por darme los conocimientos y herramientas necesarias para desempeñarme en el ámbito profesional.

## Objetivo

Evaluar el uso de fibras de acero obtenidas del reciclaje de neumáticos como refuerzo para disminuir el agrietamiento en el concreto.

Realizar ensayos a compresión simple y tensión en mezclas con diferente resistencia y diferente cantidad de fibras.

Evaluar el grado de fisuras en un concreto recién fraguado y expuesto al medio ambiente.

## Introducción

En este trabajo se evaluarán, mediante los resultados obtenidos de un estudio experimental, la influencia de dos tipos de fibras de acero obtenidas del reciclaje de neumáticos, en algunas propiedades del estado fresco y endurecido del concreto, cuando dichas fibras se emplean en porcentajes volumétricos de 0.5% y 2% en mezclas de concreto.

El estudio comprende el diseño y la elaboración de mezclas con agregado grueso proveniente del estado de Hidalgo, arena de río proveniente del estado de Morelos, cemento Portland Ordinario, fibras de acero de distintos tamaños y diámetro obtenidas del reciclaje de neumáticos y, en algunos casos aditivo Sika ViscoCrete 7500. Se diseñaron dos mezclas con distintas resistencias, una de 250 kg/cm<sup>2</sup> y una de 350 kg/cm<sup>2</sup>.

Se realizaron 5 mezclas de 250 kg/cm<sup>2</sup>, una sin contenido de fibra, dos con 0.5% y 2% de contenido de fibra pequeña y dos con 0.5% y 2% de contenido de fibra grande.

Para la de 350 kg/cm<sup>2</sup> se realizaron las mismas mezclas y se realizaron dos más: una sin contenido de fibra y la otra con un 2% de fibra grande. En el caso de esta resistencia se utilizó el aditivo Sika ViscoCrete 7500.

Para el diseño de mezclas, se obtuvieron las características de los agregados. Para el agregado grueso se obtuvo el Tamaño Máximo de Agregado (TMA), el peso específico, el peso volumétrico y el porcentaje de humedad y de absorción. Para la arena se obtuvo el Módulo de Finura (MF), el peso específico, el peso

volumétrico y el porcentaje de humedad y de absorción. Las mezclas se diseñaron bajo el criterio del ACI y con un revenimiento de 10 a 12 cm.

Se determinó el revenimiento en todas las mezclas realizadas para tener un parámetro de cómo influyen las fibras en la trabajabilidad. Además, en el concreto en estado endurecido se determinó la resistencia a compresión, a tensión y el efecto que tiene el medio ambiente.

A partir de los resultados experimentales obtenidos del análisis efectuado, se podrá evaluar la influencia y el desempeño del tipo y porcentaje de fibra.

## Tabla de contenido

<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>I</b>
<b>OBJETIVO.....</b>	<b>II</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>II</b>
<b>1. ANTECEDENTES .....</b>	<b>1</b>
<b>2. RECICLAJE EN MÉXICO .....</b>	<b>2</b>
2.1 RESIDUOS .....	2
2.2 GENERALIDADES DEL RECICLAJE EN MÉXICO .....	4
2.3 RECICLAJE DE NEUMÁTICOS EN MÉXICO .....	5
2.3.1 LAS LLANTAS .....	5
2.3.2 LAS LLANTAS COMO DESECHO .....	7
<b>3. FIBRAS PARA CONCRETO .....</b>	<b>9</b>
3.1 CLASIFICACIÓN DE LAS FIBRAS.....	10
3.2 FIBRAS OBTENIDAS DEL RECICLAJE DE NEUMÁTICOS.....	14
<b>4. EL CONCRETO .....</b>	<b>17</b>
4.1 CONCRETO EN ESTADO FRESCO .....	17
4.1.1 EVOLUCIÓN DEL FRAGUADO .....	19
4.2 CONTRACCIONES DEL CONCRETO .....	22
<b>5. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....</b>	<b>25</b>
5.1 CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS .....	25
5.2 CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO .....	26
5.3 DISEÑO DE MEZCLAS .....	29
5.3.1 PROPORCIONAMIENTO DE FIBRAS.....	42
5.4 FABRICACIÓN DE MEZCLAS.....	43
<b>6. ENSAYES Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>45</b>
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>53</b>
7.1 RESULTADOS DE LABORATORIO .....	53
7.2 DISEÑO.....	54
7.3 FLUIDEZ .....	54
7.4 RESISTENCIA A COMPRESIÓN .....	54
7.5 TENSIÓN .....	55

**7.6 CONTRACCIONES..... 56**  
**7.7 CONCLUSIONES GENERALES ..... 56**  
**8. REFERENCIAS..... 57**  
**9. ANEXO FOTOGRÁFICO ..... 58**

## 1. Antecedentes

Desde tiempos muy antiguos, los materiales cementantes como el concreto han sido el medio de unión y estabilidad para que las civilizaciones trascendieran por medio de la infraestructura de la sociedad.

Se sabe que, desde hace mucho tiempo, el hombre utilizaba materiales naturales para semejar el cemento y conformar sus viviendas. Con el paso del tiempo la evolución del ser humano fue haciendo estas técnicas obsoletas para dar lugar a los avances de lo que hoy conocemos como cemento y la conjunción de este con otros elementos para formar el concreto.

Una prueba de esto fue la civilización egipcia, que ya utilizaba el mortero, mezcla de arena con algún cementante, para unir bloques y losas de piedra para llevar a cabo sus construcciones. Los griegos y romanos descubrieron que algunos depósitos volcánicos, mezclados con otros materiales como la caliza, daban como resultado un mortero de gran resistencia, capaz de resistir al agua.

El concreto es un producto artificial compuesto de una pasta y agregados. Sus principales características están determinadas por las características físicas y químicas de sus materiales componentes. Pero a pesar de su gran resistencia a la compresión, el concreto tiene una gran limitante, su resistencia a tensión y sus contracciones.

Para contrarrestar algunas desventajas de las contracciones del concreto, se han desarrollado algunas tecnologías para así aportarle otras características. Por ejemplo, para mejorar su comportamiento frágil se le ha incorporado acero, que le ayuda a resistir los efectos de tensión o flexión. También se le han incluido fibras cortas para mejorar su comportamiento ante las contracciones propias del material.

El concreto reforzado, es un concreto que tiene en su interior una estructura de acero, esta combinación genera un material estructural con la misma resistencia a compresión que el concreto simple, pero con mayor resistencia a la tensión.

El uso de materiales fibrosos para reforzar se remonta muchos años atrás. En Egipto se usaba paja en la mezcla de los ladrillos para darle una mayor resistencia. Pero fue hasta los años 50's que se empezaron a hacer estudios a cerca de fibras de acero en el concreto.

La utilización de fibras en el interior de la matriz del concreto tiene como finalidad la formación de un conglomerado, con una matriz de cemento que está unido a un agente reforzante formado por un material fibroso de distinta naturaleza.

Las fibras con las características adecuadas y la distribución correcta dentro del concreto, constituye una micro-armadura, la cual puede proporcionar características favorables, como la disminución de fisuras por tracción, mayor ductilidad, gran tenacidad<sup>1</sup>, la resistencia a tracción ya puede ser considerada como propiedad mecánica para fines de diseño.

## 2. Reciclaje en México

### 2.1 Residuos

A medida que la población fue creciendo en el país, comenzó a aumentar la demanda de materias primas para satisfacer el consumo de bienes y servicios de la población en aumento. Así mismo, fue creciendo la generación de residuos.

Según la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) se definen como aquellos materiales o productos cuyo propietario desecha y se encuentran en estado sólido, líquido o gaseoso.

En función de sus características y orígenes, se clasifican en tres grupos: residuos sólidos urbanos (RSU), residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP).

Los primeros se refieren a los que se generan en las casas como resultado de la eliminación de los materiales utilizados en las actividades domésticas, o los que provienen de cualquier actividad que se desarrolla dentro de establecimientos o en la vía pública, con características domiciliarias. Esta clasificación se compone en su mayoría de residuos como papel y cartón, plásticos y residuos de comida y jardines.

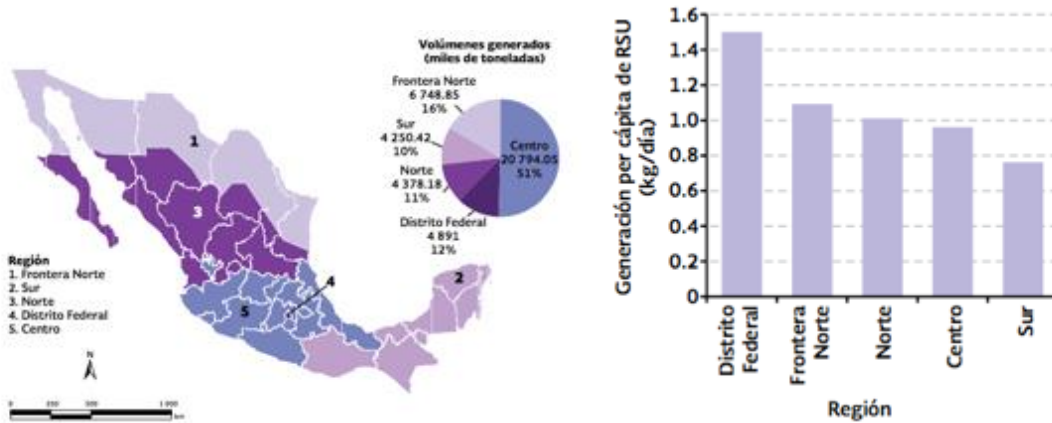
---

<sup>1</sup> La tenacidad es la capacidad que tiene un elemento para absorber energía.





COMPOSICIÓN DE LOS RSU EN MÉXICO, 2011 <sup>(1)</sup>

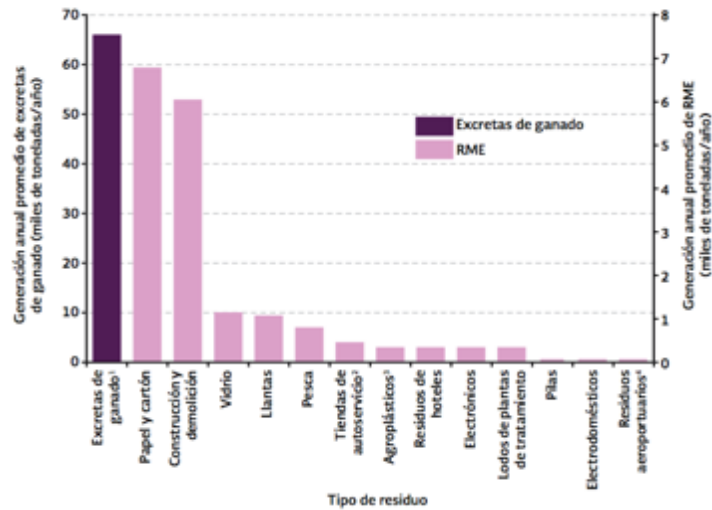


GENERACIÓN DE RSU POR REGIÓN, 2011 <sup>(2)</sup>

GENERACIÓN PER CÁPITA DE RSU POR REGIÓN 2011 <sup>(1)</sup>

Los RME son los generados en los procesos productivos y que no cumplen con las características para ser considerados como RSU, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos. En esta clasificación se encuentran residuos como aparatos electrodomésticos como refrigeradores, vehículos automotores y los neumáticos. Por su tamaño y composición, estos residuos son de difícil y especial manejo.

<sup>2</sup> Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas, Sedesol. México 2012



GENERACIÓN ANUAL PROMEDIO DE RME EN MÉXICO, 2006 – 2012 <sup>(3)</sup>

Los últimos se refieren a los que poseen alguna característica que les confiere peligrosidad como: corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y/o biológico-infeccioso, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados.

Estos residuos pueden disponerse o manejarse de distintas formas como reciclaje, por medio de tratamientos que reducen su peligrosidad, por incineración bajo condiciones controladas y confinamiento en sitios adecuados. Para esto, se deben de llevar a cabo los procesos de transporte de manera adecuada ya que estos residuos son dañinos para la salud.

## 2.2 Generalidades del reciclaje en México

Es sabido que el país se ha enfrentado a un creciente problema de contaminación, es así como se ha dado pie a actividades como el reciclaje de algunos desechos como PET, papel y cartón. Donde aparte de ser una actividad que ayuda al medio ambiente, puede ser remunerada.

A pesar de que en los desechos se encuentran muchos materiales que pueden ser susceptibles a ser reciclados, es fundamental su recolección selectiva. Esto quiere decir que nuestros desechos deben estar

<sup>3</sup> INE, Semarnat. Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos. México. 2012

separados o clasificados de la manera adecuada al momento de su recolección. Esto facilitará y propiciará el reciclaje de algunos desechos. Una vez que los desechos son combinados, o sea que no se separan desde que su propietario los desecha, estos son muy difíciles de reciclar posteriormente. Si a esto se le suma que más o menos el 75 % de los residuos termina en rellenos sanitarios o tiraderos a cielo abierto, esto hace que la actividad del reciclaje se vuelva más complicada.

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico presentó un estudio en el cuál evaluó el porcentaje de desechos urbanos que se reciclan en 34 países. México, posicionado en el lugar número 31, recicla solamente el 5% de sus desechos. Esta lista está encabezada por Alemania, que recicla un 65% de sus residuos urbanos seguido de Corea del Sur, Eslovenia con un 59% y 58% respectivamente.

Según la Semarnat, se producen alrededor de 100,800 toneladas de basura al día en el país, si se compara con el 5% de desechos que son los que reciclamos, nos quedamos mucho trabajo por hacer.

Por otro lado, México es uno de los mayores consumidores de botellas PET a nivel mundial, como consecuencia también uno de los mayores recicladores de este material.

A pesar de que las cifras de reciclaje en el país aún aumentado, aún queda mucho trabajo por hacer.

## 2.3 Reciclaje de neumáticos en México

### 2.3.1 Las llantas

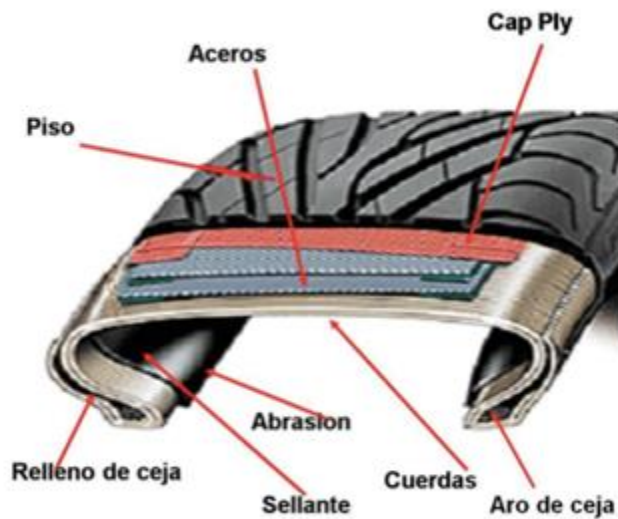
La rueda es uno de los inventos más importantes de la historia de la humanidad, desde que se inventó se ha generado un importante desarrollo, es una herramienta que ayuda a reducir el esfuerzo al transportar cargas sobre un terreno o superficie. Al principio, las ruedas se construían de piedra o madera, después, para hacerlas más resistentes se empezaron a construir de metal.

En la actualidad la rueda se convirtió en lo que hoy conocemos como llanta o neumático.

Las llantas son elementos elásticos con una envoltura que contiene aire a presión, permitiendo el movimiento de vehículos.

Los neumáticos están conformados principalmente de la siguiente forma <sup>(3)</sup>:

- Telas (Cap Ply) y acero: Soportan la carga y le dan estabilidad al neumático.
- Banda de rodamiento (piso): Permite la adherencia entre el neumático y el suelo, está compuesto de caucho que debe resistir la abrasión y el desgaste.
- Pared lateral (ceja): Esta parte de la estructura va de la banda de rodamiento hasta el aro de ceja, siendo revestida por un compuesto de caucho con alta resistencia a la fatiga por flexión.
- Sellante: Es el revestimiento protector en la parte interna del neumático. Proporciona impermeabilidad.
- Aros de ceja: Están compuestos de cables de arco revestidos de cobre para evitar la oxidación, separados individualmente por compuestos de caucho para evitar el contacto entre ellos y revestido con un tejido tratado. Su función es amarrar el neumático al rin y tener alta resistencia a la rotura.



PARTES PRINCIPALES DE UN NEUMÁTICO <sup>(4)</sup>

---

<sup>4</sup> Plan de Manejo de Neumáticos Usados de Desecho (2013) Conforme a la NOM-161-SEMARNAT-2013

Las llantas están compuestas principalmente de tres materias primas:

Compuestos de hule	Los componentes de hule deben ser diseñados según la función que va a cumplir, es decir, para la banda de rodamiento sea resistente al calor, flexión, desgaste, etc. Para las paredes resistentes a la flexión, el calor, la buena adhesividad.
Materias textiles	Son los que soportan al aire, calor, golpes, etc. Para su mejor funcionamiento se recubren de hule, formando capas de llanta, cuyo número se diseñará según la resistencia de ésta. Las fibras podrán ser de poliéster, nylon, rayón, etc.
Alambre de acero	Principalmente sirven para dar la firmeza necesaria a la llanta al montarla en el rin y sirven como soporte a las capas de las llantas

TABLA 1. MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE LLANTAS

### 2.3.2 Las llantas como desecho

A pesar de que llantas son indispensables en el día a día, cuando estas cumplen con su vida útil y son desechadas se vuelven elementos complicados para su disposición debido a su gran tamaño y composición. Por estas razones, generalmente terminan en tiraderos a cielo abierto, provocando problemas graves de contaminación al suelo, propiciando la generación de flora y fauna nociva y siendo un factor de peligrosidad grande, debido a la capacidad que tienen para incendiarse por su elevada capacidad calorífica.

Con respecto a lo último, existe la posibilidad de que se presente un incendio por la naturaleza combustible de los neumáticos usados cuando son dispuestos de manera inadecuada. Esto produce gases muy tóxicos para la salud. En cuanto a la flora y fauna nociva, debido a su mala disposición se puede propiciar un hábitat perfecto para que proliferen mosquitos y roedores que propagan diversas enfermedades. Cuando se disponen en rellenos sanitarios, estos disminuyen su capacidad debido a que

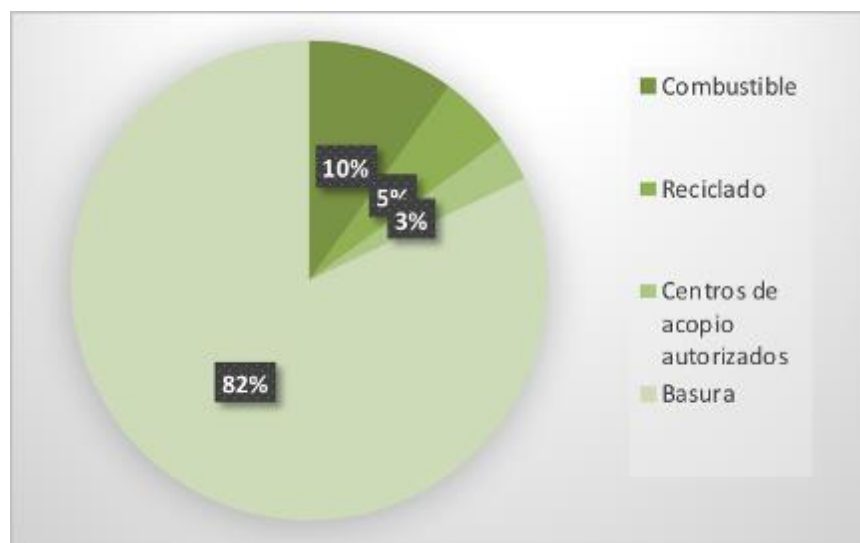
las llantas ocupan una gran parte del espacio. Además, las llantas necesitan de un tratamiento especial para acelerar su degradación, ya que de forma natural es un proceso muy largo, y cuando son enterradas despiden aceites tóxicos, que pueden ser transportados por las corrientes de agua, contaminándolas.

A pesar de que la contaminación debido a los neumáticos es un problema que nos aqueja a todos, existen pocos datos oficiales al respecto.

A pesar de que el promedio anual de desecho de llantas en México es muy alto, la cifra de neumáticos desechados y reciclados es incierta. Se estima que aproximadamente 30 millones de llantas se desechan al año, sin contar las llantas que se desechan en Estados Unidos y llegan a México. De las cuales, el 10% se utiliza como combustible alternativo, alrededor del 5% se recicla o es renovado, 3% es llevado a centros de acopio autorizados y el 82% se queda como basura.

Tipo	2010	2011	2012	2013	2014
Producción	17,053	20,069	25,568	24,984	24,871
Exportaciones	5,283	8,578	11,583	11,492	11,910
Mercado Interno	11,770	11,491	13,895	13,492	12,961
Importaciones	14,676	14,221	14,991	16,449	19,865
<b>Total, Mercado Nacional</b>	<b>26,446</b>	<b>25,712</b>	<b>28,886</b>	<b>29,941</b>	<b>32,826</b>

DISTRIBUCIÓN DEL MERCADO NACIONAL DE NEUMÁTICOS X10<sup>3</sup> (PROMEDIO ANUAL) <sup>(3)</sup>



LLANTAS DE DESECHO

Algunas empresas han encontrado una forma de ahorrar al utilizar las llantas viejas como combustible; por ejemplo, en los grandes hornos de cemento utilizan llantas como parte de su combustible. Aunque esto ha logrado que no estén en tiraderos a cielo abierto, el humo que despiden al ser quemadas representa un grave problema de salud por las emisiones de sustancias tóxicas.

El proceso de reciclaje se puede llevar a cabo mediante distintos métodos como la aplicación de calor, en donde entraría la termólisis, la pirolisis y la incineración, los métodos físicos en donde entran la trituración criogénica y la trituración mecánica, y la conversión de neumáticos en energía eléctrica. De este proceso se obtienen distintos materiales como caucho de diferente granulado, fibra de nylon y fibra de acero.

El nuevo producto reciclado tiene diversos usos en la industria manufacturera para la fabricación de:

- Carpetas asfálticas
- Superficies deportivas
- Impermeabilizante
- Losetas, azulejos y pisos
- Fibras textiles
- Aditivo para mezclas, estampados y alfombras
- Material de aislamiento acústico, anti vibratorio y antisísmico
- Suelas y tapas de zapato
- Combustible alternativo

### 3. Fibras para concreto

Cuando el concreto se encuentra en su fase de endurecimiento experimenta varios cambios y deformaciones debido a la reacción de hidratación que se lleva a cabo durante este proceso. Esto provoca problemas como fisuras, que puedan afectar su durabilidad y futuro comportamiento.

Por otra parte, es sabido que una de las propiedades características del concreto es su resistencia mecánica a compresión, pero a tensión el concreto presenta fallas frágiles a una menor resistencia.

Para contrarrestar estas desventajas se han desarrollado algunas tecnologías para así aportar al concreto otras características. Por ejemplo, para mejorar su comportamiento frágil se le ha incorporado acero, que le ayuda a resistir los efectos de tensión o flexión. También se le han incluido fibras cortas para

mejorar su comportamiento ante las contracciones propias del material y mejorar los efectos a tensión.

Otro beneficio del concreto reforzado con fibras (CRF) es el incremento de resistencia al impacto. Adicionalmente, controlan la fisuración durante la vida útil del elemento y brindan mayor resistencia a la fatiga.

### 3.1 Clasificación de las fibras

Hoy en día, existen y se utilizan fibras de distintos materiales dentro de la composición del concreto para proporcionarle ciertas características. Las fibras tienen dos usos específicos en función de su trabajo dentro de la mezcla de concreto y de sus características físicas:

- Microfibras

Son fibras de plástico, polipropileno, polietileno o nylon, que ayudan a reducir la segregación de la mezcla de concreto y previenen la formación de fisuras durante las primeras horas de la colocación del concreto o mientras la mezcla permanece en estado plástico. Los mejores resultados se obtienen con fibras cuyas longitudes van de entre los 12 y 75 mm y se dosifican en el concreto entre  $0.6 \text{ kg/m}^3$  y  $1 \text{ kg/m}^3$ .



EJEMPLO DE MACROFIBRAS. IMAGEN OBTENIDA DE GOOGLE



- Macrofibras

Son de materiales como acero, vidrio, sintéticos o naturales, los cuales se usan como refuerzo distribuido en todo el espesor del elemento y orientado en cualquier dirección. Las fibras actúan como la malla electrosoldada y las varillas de refuerzo, incrementando la tenacidad del concreto y agregando al material capacidad de carga posterior al agrietamiento. Su diámetro oscila entre 0.25 mm y 1.5 mm, con longitudes variables entre 13 mm y 70 mm. La más importante propiedad del CRF es la tenacidad, descrita como la capacidad de absorción de energía de un material, que se refleja en el concreto una vez se han presentado fisuras, momento en que las fibras trabajan como refuerzo.



EJEMPLO DE MICROFIBRAS. IMAGEN OBTENIDA DE GOOGLE

Dentro de la clasificación anterior se encuentran estas fibras:

- Fibras de polipropileno, vidrio y nylon

Estos materiales se usan como microfibras destinadas para prevenir la fisuración del concreto en estado fresco o durante edades tempranas debido a la retracción plástica. Están diseñados para ser compatibles con el ambiente altamente alcalino de la matriz del concreto; sin embargo, en su caso particular, las fibras de vidrio deben ser resistentes a los álcalis. Algunas fibras existentes en el mercado pueden contener aditivos destinados a combatir bacterias o aumentar el asentamiento. Normalmente se usan bajas dosificaciones en masa, de alrededor de 1 kg/m<sup>3</sup>.



FIBRAS DE POLIPROPILENO, VIDRIO Y NYLON. IMÁGENES OBTENIDAS DE GOOGLE

- Fibras de acero

Dependiendo del sistema de fabricación, hay fibras de diferentes tamaños, secciones, rugosidad superficial y formas. Pueden ser trefiladas en frío, cortadas o maquinadas. Su forma puede ser variable, recta, ondulada o con aplastamientos. Normalmente tienen deformaciones a lo largo de la fibra o en sus extremos. Esta última modalidad es más eficaz para aumentar la adherencia en el concreto. Para comparar una fibra con otra se utilizan tres conceptos: relación de esbeltez, anclaje y resistencia a la tracción del alambre. Una forma fácil de comparar el desempeño de dos fibras es revisando la relación de esbeltez (longitud/diámetro).

Las dosificaciones de fibras de acero oscilan normalmente entre 15 y 25 kg/m<sup>3</sup> para pisos convencionales. En pisos sin juntas, normalmente se emplean dosificaciones mayores de 30 kg /m<sup>3</sup> y para aplicaciones en concretos lanzados como los utilizados en túneles la dosificación es de 40 kg/m<sup>3</sup>.



FIBRAS DE ACERO. IMÁGENES OBTENIDAS DE GOOGLE

- Fibras sintéticas

Las fibras sintéticas se clasifican dentro del grupo de las macrofibras, cuyo efecto principal dentro del concreto es asegurar una tenacidad acorde con las necesidades del diseño estructural.

Al igual que las fibras metálicas, las macrofibras están diseñadas para mejorar las características mecánicas del concreto y se suministran en longitudes y diámetros distintos. La proporción de la mezcla depende de la longitud y el diámetro, pero las dosificaciones usualmente empleadas están comprendidas entre 1% y 2% en volumen (9 a 18 kg/m<sup>3</sup>).



FIBRAS SINTÉTICAS. IMAGEN OBTENIDA DE GOOGLE

### 3.2 Fibras obtenidas del reciclaje de neumáticos

Este tipo de fibras no entra en ninguna clasificación ya que son fibras recicladas. Estas fibras se obtienen de la acción de reciclar neumáticos mediante trituración mecánica.

La trituración mecánica, consiste en pasar los neumáticos por una serie de triturados sucesivos hasta reducir su volumen a un tamaño de salida muy pequeño, el cual dependerá del uso posterior que se le vaya a dar al producto. Se separa el acero por medio de imanes, y así el metal puede ser reciclado y reutilizado. Las fibras de acero que se obtienen de la trituración son las que se utilizan en este trabajo.

En México, existen empresas dedicadas al reciclaje de neumáticos que venden o utilizan los materiales obtenidos de esta acción para producir otros materiales como impermeabilizante o pisos . La mayoría de las empresas recicladoras solamente reutiliza el caucho de las llantas.

Atendiendo al problema de contracciones del concreto y aunado a la creciente problemática que hay en el país debido al constante desecho de neumáticos, se ha estimado que la fibra de acero obtenida en el reciclaje podría ser usada como agregado para ayudar a mitigar las contracciones propias del concreto.

Tras una larga búsqueda de empresas que si obtuvieran las fibras de las llantas se encontró a Neo Hábitat,

S.A de C.V. Dicha empresa tritura y separa los elementos que componen las llantas mediante un proceso automatizado que permite recuperar el 100% de los componentes.

Reciclan alrededor de 40,000 llantas por mes. Cifra que año con año aumenta. El acero se encuentra en proporciones de alrededor el 10% del volumen de la llanta. Este material se comercializa a empresas recicladoras de acero que servirá para volver a producir acero de otra calidad.

Las fibras obtenidas en este proceso son de dos tamaños : chicas y grandes. Las primeras son las que formaban parte de del cuerpo de la llana, soportaban cargas y le daban estabilidad a la misma. Las grandes son las que formaban parte del aro de ceja.

Ambas fibras son irregulares en su longitud y diámetro. Tiene pesos distintos y proporciones distintas. Es mayor la cantidad de fibras pequeñas que de las grandes.

Las fibras utilizadas en nuestro trabajo fueron proporcionadas por Neo Hábitat, S.A de C.V. El material se trajo desde la planta ubicada en Chihuahua a la Ciudad de México por transporte terrestre y en costales de 20 kg. Desafortunadamente, el material fue entregado poco tiempo después de que hubo un gran incendio es su planta, así que el proceso de obtención del metal no era tan preciso en esa época, por lo tanto, el material estaba sumamente contaminado con caucho y fibras de nylon, en su mayoría.



FIBRAS DE NEO HÁBITAT CON DESECHO DE CAUCHO Y NYLON Y DESPUÉS DE LA LIMPIEZA. FOTO DE AUTOR

Para poder obtener la fibra se tuvieron que separar a mano. Fue un trabajo que se llevó a cabo aproximadamente en 6 meses. De los 40 kg de material contenido en los costales que entregó Neo Hábitat, S.A de C.V, Se obtuvieron alrededor de 35 kg de fibras, de los cuales, 15 kg eran de fibra chica y 20 kg de fibra grande. El resto del material, o sea, el caucho y las fibras de nylon se desecharon. En su mayoría, se encontraron fibras de nylon y fibras chicas, ya que estas abarcan un gran volumen en comparación a su peso.



FIBRAS CHICAS. FOTO DE AUTOR



FIBRAS GRANDES. FOTO DE AUTOR

## 4. El Concreto

El concreto hidráulico recién mezclado, es un material que en pocas horas se transforma y cambia de estado, pasa de ser una masa plástica, con buena trabajabilidad, a un cuerpo rígido que toma la forma del molde en donde se le coloca, y con el tiempo continúa adquiriendo propiedades.

El concreto fresco se considera así mientras permanezca fluido. Al concreto ya colocado se le considera como un concreto en proceso de endurecimiento.

El proceso de solidificación del concreto se debe a la reacción química que se produce entre el cemento y el agua. Estas reacciones corresponden al proceso de hidratación del cemento, que se divide en dos etapas; la de fraguado y la de endurecimiento.

La etapa de fraguado corresponde al cambio de estado de un material blando a un cuerpo rígido pero frágil. Es decir, el concreto fraguado es un material que no posee resistencia mecánica. La etapa de endurecimiento inicia cuando la de fraguado termina y, es aquí, donde el concreto adquiere su resistencia. Esta etapa puede llegar a durar años.

### 4.1 Concreto en estado fresco

El concreto fresco se considera así desde que se elabora la mezcla hasta que comienza el fraguado. La principal característica del concreto en estado fresco es la trabajabilidad, que según el ACI 116 <sup>(5)</sup>, “es la propiedad del concreto recién mezclado que determina la facilidad y homogeneidad con la que puede ser mezclado, transportado, colocado, compactado y acabado”.

El concreto en esta etapa es muy delicado y se debe manejar con cuidado para que se desarrollen de manera adecuada todas sus propiedades mecánicas una vez que este se haya endurecido.

Es importante mencionar que existen muchas características que posee una mezcla de concreto en estado fresco, la trabajabilidad es una de ellas.

---

<sup>5</sup> ACI Committee 116. “Cement and Concrete Terminology”. American Concrete Institute. Detroit, Mich. (1990)

Esta característica puede ser evaluada por varios medios como la homogeneidad y uniformidad. La homogeneidad de la mezcla se refiere a que todos los componentes de ella se distribuyan de manera uniforme, ya que estos son de distinta naturaleza y se encuentran en diferentes proporciones. La consistencia que está sumamente ligada con la movilidad y con la capacidad que tiene la mezcla para ser compactada. Esto depende de la cohesión y viscosidad plástica de la mezcla. La cohesión se refiere a la resistencia que opone la mezcla para deformarse y empezar a fluir y la viscosidad plástica es la rapidez con la que la mezcla puede fluir. Lo deseable es que la mezcla fluya con facilidad, pero sin dejar de ser homogénea.

Otro medio muy importante es la estabilidad. Una mezcla de concreto se debe comportar como una suspensión estable. Esto quiere decir que permanece homogénea desde que sale de la revolvedora hasta que comienza el fraguado. Una mezcla puede perder su estabilidad gracias al asentamiento y sangrado y a la segregación.

Lo primero se refiere a que cuando la mezcla ya está colocada y compactada se encuentra en reposo, se inicia un proceso de reacomodo de sus componentes, donde los más pesados tienden a descender y los más ligeros permanecen en su lugar o son forzados a ascender. Como las gravas son los componentes más grandes y pesados, se asientan y provocan el ascenso del agua, que es el componente más ligero. Así se generan los fenómenos de asentamiento y sangrado.

El sangrado es más perceptible ya que aparece una película de agua en la superficie libre del concreto recién colocado. Este puede ser o no perjudicial, dependiendo de su cantidad, de las características geométricas de la estructura y de las condiciones ambientales. El sangrado que se produce en consecuencia de un leve asentamiento es normal, en ciertas ocasiones puede llegar a ser útil. Por ejemplo, en estructuras con una gran superficie libre expuesta, como los pavimentos, que se cuellan en condiciones ambientales donde la evaporación del agua es rápida, el sangrado puede ayudar a evitar el proceso de deshidratación superficial del concreto y su posible agrietamiento por contracción plástica.

En caso de que el sangrado se presente de manera no uniforme y sea mucha la cantidad de agua puede afectarse la impermeabilidad, resistencia mecánica y durabilidad, del concreto endurecido. En general, es conveniente que el concreto sangre lo menos posible.

La segregación del concreto se define como una concentración de sus componentes que provoca que la masa no sea uniforme, se podría considerar que es lo opuesto a la homogeneidad. Dicho esto, el sangrado



y asentamiento también se consideran como formas de segregación, aunque, comúnmente se utiliza el término de segregación cuando la grava tiende a separarse de la mezcla de concreto.

La tendencia a la segregación depende de distintos factores como las propiedades reológicas de la pasta cementante, las características físicas de los agregados y el contenido unitario de éstos, en particular el de la grava.

El último medio para evaluar la trabajabilidad es la compactación o densidad relativa, en la cual se aplican fuerzas para que adquiera la forma del espacio cimbrado, reduciendo al mínimo la porosidad. Esas fuerzas corresponden a la compactación del concreto, con la finalidad de obtener la mayor compactación posible en las condiciones solicitadas.

#### 4.1.1 Evolución del fraguado

En el Manual de Tecnología del Concreto se describe que la siguiente etapa por la que pasa el concreto consta de otros tres estados característicos: 1) el lapso anterior al fraguado, en donde se comporta como una mezcla relativamente blanda y moldeable, en función de la proporción con la que se elabora; 2) el lapso de fraguado, en donde la mezcla aumenta progresivamente de consistencia hasta convertirse en una masa rígida que ya no es moldeable, pero aún no adquiere resistencia mecánica; y 3) el lapso posterior al fraguado, que corresponde a la etapa de endurecimiento del concreto, en donde adquiere su resistencia mecánica.

Aunque en la realidad es muy difícil acotar los límites de estas etapas ya que todas son consecuencia del proceso de hidratación del cemento, hay ciertos aspectos que nos pueden ayudar a determinarlos.

La etapa antes del fraguado comienza desde que se realiza la mezcla hasta su colocación. Cuando la mezcla es una pasta blanda y moldeable. Como ya hemos mencionado en el capítulo anterior, la etapa del transporte, colocación y compactación del concreto deben tratarse con mucho cuidado para evitar fenómenos, como la segregación, que puede afectar las propiedades del concreto endurecido.

Una vez que el concreto se coloca y se compacta hasta llegar al nivel previsto, se enrasa y se le da el tratamiento superficial que corresponda con el servicio de la superficie tratada. Esto se realiza una vez terminada la etapa anterior, es decir, cuando comienza el fraguado.

## Evolución del fraguado

El fraguado es la condición adquirida paulatinamente adquirida por una mezcla de concreto, cuando ha perdido plasticidad, definido en función de su resistencia a la deformación. Además de esta manifestación hay otras dos formas de fraguado que se consideran anormales e indeseables, según el Manual de Tecnología del Concreto, Tomo 2: 1) el falso fraguado, que se manifiesta por una rápida pérdida de plasticidad, sin desarrollo de calor, que puede ser restituida con un remezclado sin añadir agua, y 2) el fraguado instantáneo que se caracteriza por su súbita pérdida de plasticidad, pero con gran desarrollo de calor, que no puede ser restituida sin no se añade agua en el remezclado.

## Fraguado del cemento

En el aspecto químico, el fraguado es el primer indicio de la hidratación del cemento. El aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) es el compuesto del clínker que se hidrata con mayor rapidez, es por eso que se le incorpora yeso durante la molienda para que este, actúe como regulador de la hidratación del  $C_3A$ .

En cuanto al falso fraguado, normalmente se origina por un exceso de temperatura del clínker que, al molerse caliente con el yeso, produce la deshidratación parcial de este; después, al mezclar el cemento con el agua, el yeso se rehidrata y provoca la repentina reagudización de la mezcla.

Debido al efecto que la temperatura ejerce sobre la velocidad de hidratación del cemento, para reglamentar los límites del tiempo del fraguado, se verifica la evolución del fraguado de la pasta del cemento mediante dos procedimientos <sup>(3)</sup>: el que utiliza el aparato de Vicat (NOM C-59/ASTM C 191) y el que emplea las agujas de Gillmore (NOM C-58/ASTM C 266). Para cementos portland simples se utilizan los dos, para cementos mezclados y los portland-puzolana y de escoria, solamente se utiliza el primero.

## Fraguado del concreto

El tiempo de fraguado del concreto convencional no suele estar reglamentado en las especificaciones, a menos que se utilicen aditivos que lo modifiquen.

En el caso de concreto convencional con cemento portland, sin aditivos y no sujeto a condiciones extremas de temperatura ni humedad, se puede esperar que el fraguado inicial ocurra entre 2 y 6 horas y el final entre 4 y 12 horas, a partir del mezclado. Aunque, como ya mencionamos, es difícil establecer estos límites ya que la temperatura es un factor de suma importancia para poder limitar las etapas del fraguado.

Para seguir la evolución del fraguado del concreto existen diversos procedimientos que miden los cambios del concreto a medida que este se rigidiza y adquiere resistencia como el paso de una corriente eléctrica, velocidad de propagación de ondas sónicas, generación de calor, deformabilidad, resistencia mecánica, etc. De todos estos, el único que se encuentra reglamentado por métodos NOM y ASTM (NOM C-166/ASTM C 403) es el que mide la resistencia a la penetración con agujas tipo Proctor <sup>(3)</sup>. Gracias a esta prueba, se puede decir que el fraguado del concreto concluye cuando alcanza una resistencia a la penetración igual a 280 kg/cm<sup>2</sup> y a partir de ahí comienza su verdadero endurecimiento.

#### Evolución del endurecimiento

Como ya lo hemos mencionado, el concreto recién fraguado es un material rígido pero frágil, con una incipiente resistencia a compresión no mayor a 7 kg/cm<sup>2</sup> <sup>(10)</sup>.

En términos simples, lo ocurre después del fraguado, es que los productos de la hidratación del concreto (que se suele llamar gel) comienzan a formar “puentes” a través de los espacios entre los granos de cemento y entre las partículas de los agregados, para dar rigidez a la masa de concreto. A medida que estos “puentes” disminuyen los espacios, o sea, la porosidad de la pasta hidratada, se generan las propiedades mecánicas del concreto. Por lo tanto, las propiedades mecánicas, y en particular la resistencia a compresión, son inversamente proporcionales a la porosidad del concreto.

El grado de porosidad está sumamente ligado a la relación agua/cemento de la mezcla, la cual se determina en el diseño de la misma.

El tipo o clase de cemento puede modificar de manera significativa la evolución del endurecimiento del concreto, en especial en sus primeras edades. A medida que los granos del cemento son menores se hidratan con mayor rapidez, conforme aumenta la finura del cemento mayor es el desarrollo de resistencia al principio de la etapa de endurecimiento. Más adelante su resistencia tiende a igualarse con la del cemento de menor finura.

Como ya vimos, la temperatura juega un factor muy importante en la etapa del fraguado del concreto. A menor temperatura el tiempo de fraguado tiende a aumentar y, a mayor temperatura el tiempo disminuye. Cuando se presentan temperaturas extremas, no solo afectan la etapa del fraguado sino también la de endurecimiento.

Cuando el concreto termina la etapa del fraguado y la mezcla se convierte en una masa rígida pero frágil, o sea, que se podría romper con facilidad, el concreto pasa a la etapa de después del fraguado, donde

comienza a adquirir su resistencia mecánica. Esta adquisición de resistencia se puede ver afectada debido a condiciones ambientales.

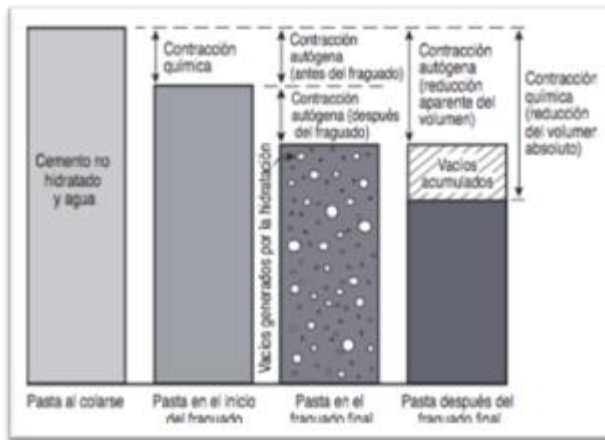
## 4.2 Contracciones del concreto

Como ya mencionamos con anterioridad, el concreto es un material muy delicado ya que cualquier cambio durante la fabricación de la mezcla, así como en su traslado o colocación, puede perjudicar sus características endurecido.

El concreto puede cambiar de volumen por varias razones. A este cambio de volumen se le conoce como contracción del concreto. Estas contracciones se pueden dar por varios motivos que me mencionan a continuación.

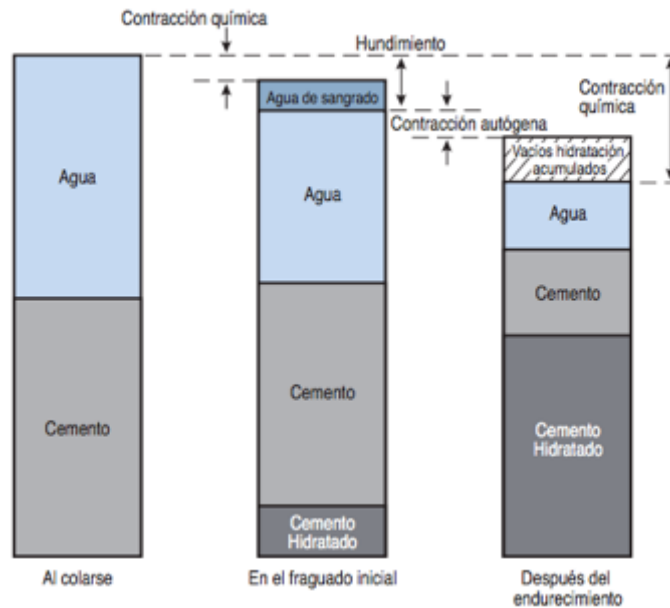
Contracción química. Este tipo de contracción es la reducción en el volumen de sólidos y líquidos de la pasta, como resultado del proceso de hidratación del cemento. Esto sucede después del fraguado inicial y se da a nivel microscópico. La mayor parte de este cambio volumétrico se da internamente y es por eso que los cambios de volumen no son considerables.

El siguiente tipo de contracción es la contracción autógena, que es la reducción macroscópica que experimenta el concreto debido a la hidratación de la pasta cementante, por lo tanto, se puede decir que la contracción química es la fuerza que conduce a la contracción autógena, aunque es mucho menor que las contracciones químicas absolutas. Cuando hay agua externa, este tipo de contracción no ocurre, pero cuando no hay la hidratación del cemento consume el agua de los poros, dando como resultado la auto desecación de la pasta y un cambio volumétrico uniforme. También, aumenta cuando la relación a/c disminuye. El concreto normal tiene una contracción autógena insignificante, pero en concretos con una relación a/c menor a 0.42, esta aumenta.



CONTRACCIÓN QUÍMICA Y AUTÓGENA DE PASTA FRESCA Y ENDURECIDA <sup>6</sup>

El hundimiento o también llamado contracción por asentamiento, como mencionamos con anterioridad, también da lugar a un tipo de contracción. Eso se da porque debido al asentamiento de los sólidos con relación a los líquidos. El hundimiento del concreto bien consolidado, con un sangrado mínimo, es insignificante. El hundimiento excesivo puede resultar en agrietamiento o fisuración de los elementos de concreto.



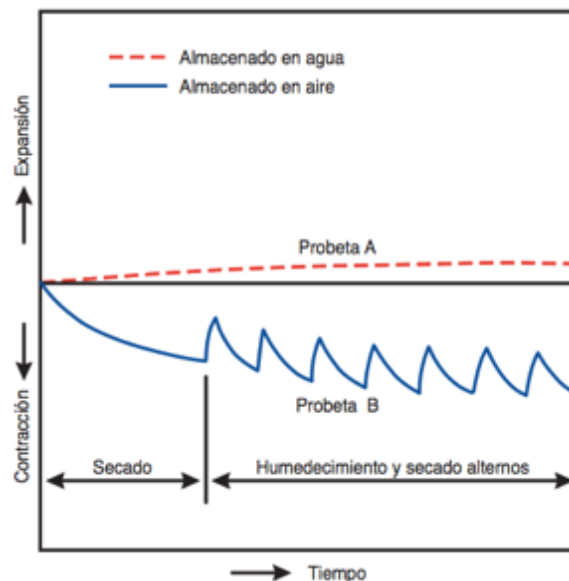
RELACIÓN ENTRE HUNDIMIENTO, CONTRACCIÓN QUÍMICA Y CONTRACCIÓN AUTÓGENA <sup>6</sup>

<sup>6</sup> EB201. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. Capítulo 15: Cambios de Volumen del Concreto

Otro tipo de contracción es la contracción plástica, esta se refiere a los cambios que ocurren en el concreto cuando aún se encuentra en estado fresco. Esta resulta de la contracción química y autógena y la rápida evaporación de la humedad de la superficie y se presenta en formas de fisuras que normalmente aparecen antes o durante el acabado. Se puede controlar con la disminución de la evaporación de la superficie a través del uso de rociado, cubiertas, retardadores de evaporación y fibras.

El concreto, el mortero y la pasta cementante se expanden con la presencia de agua externa. El volumen de la masa del concreto aumenta cuando el agua externa reemplaza el agua drenada de los capilares por la contracción química. Como ya no hay auto desecación, no hay contracción autógena. La expansión ocurre debido a la combinación del crecimiento de los cristales y absorción de agua. La magnitud de la expansión no es muy grande.

La contracción por secado se da en el concreto endurecido ya que este también se expande ligeramente con el aumento de la humedad y se contrae con la pérdida de la misma. Esta contracción puede continuar por muchos años, dependiendo del tamaño y forma del concreto. Normalmente la cantidad final de contracciones es menor en elementos grandes.



MOVIMIENTOS DE LA HUMEDAD EN EL CONCRETO <sup>6</sup>

La probeta A representa el concreto almacenado constantemente en agua desde su colocación. La probeta B representa el mismo concreto expuesto primero al secado al aire y después a ciclos alternado de humedecimiento y secado.

## 5. Planteamiento del estudio

Como es sabido, el concreto en estado endurecido tiene una gran resistencia mecánica a compresión, es por eso por lo que es un material que ha sido utilizado desde hace mucho tiempo. De igual forma, se sabe que su resistencia a tensión y su tendencia a fisurarse o agrietarse debido a las contracciones que sufre el material, son características que se pueden mejorar con el uso de fibras de algún tipo de fibras.

Por otro lado, también mencionamos el gran problema que se tiene con las llantas de desecho, es por eso que en este trabajo se decide utilizar las fibras de acero obtenidas de las llantas de desecho, para reforzar el concreto y mejorar algunas propiedades que este posee.

### 5.1 Concreto Reforzado con Fibras

Desde tiempos muy antiguos, las fibras se han utilizado para reforzar materiales frágiles. En los antecedentes se mencionan algunos ejemplos del uso de fibras en la antigüedad, pero en tiempos más recientes, el uso de fibras de asbesto en 1898 con el proceso Hastchek para producir fibrocemento. Hoy en día, productos hechos de fibrocemento se utilizan a nivel mundial.

El fibrocemento es un material a base de una fase dispersa de amianto en una matriz cementante. El asbesto es una fibra natural que por sus características se ha utilizado en la industria de la construcción, existe una amplia gama de variedades de amianto las cuales se caracterizan por su incombustibilidad, buen aislamiento térmico y acústico, su resistencia a altas temperaturas, al paso de electricidad a la abrasión y a los microorganismos.

Originalmente se utilizaba el asbesto, alrededor de 1960 y 1970 se optó por utilizar fibras de distintos tipos, debido a los problemas de salud con los que el asbesto se asociaba.

“Estas fibras se le añaden al concreto para mejorar las propiedades de este compuesto. Las propiedades que mejoran son su resistencia a tensión, resistencia a compresión, módulo de elasticidad, resistencia al agrietamiento, control del agrietamiento, durabilidad, fatiga, resistencia al impacto y a la abrasión, contracciones, expansiones, características de temperatura y resistencia al fuego” según el artículo *544.1R-3 Fiber Reinforced Concrete*.

El concreto no reforzado posee una baja resistencia a tensión y una baja capacidad de deformación a fracturación. Estas propiedades han sido corregidas con la utilización de acero de refuerzo, este acero es continuo y se ubica en un lugar específico de la estructura para optimizar el rendimiento del concreto,

mientras que las fibras son discontinuas, que generalmente se distribuyen aleatoriamente en el contrato de la matriz.

Muchos tipos de fibras se han probado, desde fibras de vidrio hasta fibras de polipropileno. Unas han tenido más éxito que otras. En la actualidad las fibras de polipropileno se utilizan comúnmente en Estados Unidos y Canadá en distintas construcciones de concreto. En EE. UU. Se utilizan de manera común en el ámbito militar. También se han utilizado en concreto lanzado para rehabilitar estructuras.

En México no se utiliza tanto el concreto reforzado con fibras de acero, sus primeros usos han sido en estabilidad de taludes como en la carretera Acapulco y revestimiento de túneles como el TEO (Túnel Emisor Oriente).

Hoy en día las técnicas constructivas empleando fibras en el concreto han ido incrementando debido a la disminución de los costos operativos y al aporte estructural que estas proporcionan.

## 5.2 Concreto Reforzado con Fibras de Acero

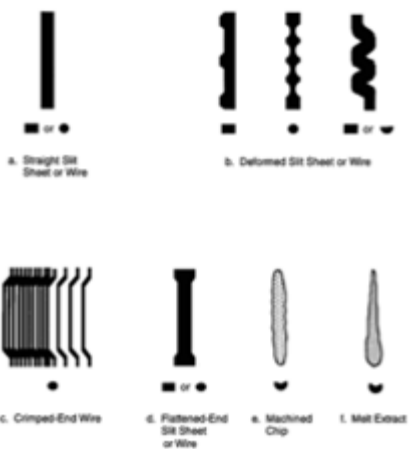
Como ya mencionamos, el uso de fibras en el concreto es una técnica que se ha empleado desde hace mucho tiempo, pero hoy en día existen fibras de distintos tipos.

El uso de fibras de acero es cada vez más utilizado ya que sus aplicaciones más comunes van desde el refuerzo de pisos industriales, comerciales y pistas de aeropuertos, hasta el revestimiento de túneles como y estabilización de taludes por medio de concreto lanzado.

El concreto reforzado con fibras de acero o CRFA, falla a tensión solamente después de que las fibras se rompen o se desprenden del cemento de la matriz.

La resistencia de las fibras, la rigidez y su capacidad para unirse con el hormigón, son propiedades importantes para el refuerzo del concreto con fibras. La unión entre la fibra y la pasta cementante depende de una característica de las fibras llamada relación de aspecto. Que es la relación que existe entre la longitud y el radio de la fibra. A mayor relación de aspecto, mejores serán las características del concreto en estado endurecido. Las fibras de acero poseen una alta resistencia y módulo de elasticidad.





DISTINTOS TIPOS DE GEOMETRÍA DE FIBRAS DE ACERO. IMAGEN OBTENIDA DEL ARTÍCULO 544.1R-11 FIBER REINFORCED CONCRETE

Las propiedades en estado fresco se ven influenciadas por la relación de aspecto de las fibras, su geometría, el volumen que es agregado a la mezcla y la unión que hay entre la pasta y las fibras. Se pueden reducir los asentamientos siempre y cuando la dosificación de las fibras sea la adecuada, esto es en un rango del 0.5 % al 2% del peso total del volumen total de mezcla. Más del 2% es importante mencionar que una mezcla de CRFA tiende a formar bolas o “erizos” provocados por las fibras y son muy difíciles de deshacer. Esto puede ser debido al agregado utilizado, a la relación de aspecto de las fibras, el volumen incluido de fibras, la forma y el método para introducir las fibras a la mezcla. Mientras más grande sea el tamaño máximo de agregado (T.M.A) y la relación de aspecto, se debe de agregar menos fracción de volumen de fibras a la mezcla. Esto puede afectar de manera muy significativa la trabajabilidad de la mezcla.



ERIZOS. FOTO DE AUTOR

Las características en estado endurecido del concreto también cambian y pueden ser mejoradas con la adición de las fibras. Las fibras imparten ductilidad posterior a la fisuración de la matriz, haciendo que esta ya no presente una falla frágil. Las mejoras en la ductilidad dependerán del tipo y porcentaje de volumen de las fibras presentes. En la compresión, solamente la resistencia última se ve afectada ligeramente. En la tensión directa, la mejora en la fuerza es significativa con incrementos del orden del 30 al 40% cuando se agrega el 1.5% en volumen de fibras. El aumento en la resistencia a flexión del CRFA son mayores que en tensión o compresión, esta puede llegar a ser más del doble con un 4% de volumen de fibra, pero sabemos que el volumen máximo de fibras en la mezcla se limita al 2%.

Con volúmenes menores al 1% no se tiene ningún efecto significativo sobre el comportamiento de contracción libre. La tenacidad es, sin duda, la propiedad que presenta la mejora más significativa del CRFA, esto se ve reflejado en las pruebas a tensión.

El concreto se contrae cuando se lo somete a un ambiente de secado. El grado de contracción depende de muchos factores, incluidas las propiedades de los materiales, la temperatura y la humedad relativa del ambiente, la edad en que el concreto está sometido al ambiente de secado y el tamaño de la masa de concreto. Si se restringe la contracción del concreto, se desarrollan tensiones de tracción y el concreto se puede agrietar. El agrietamiento por contracción es una de las causas más comunes de agrietamiento en paredes, losas y pavimentos. Uno de los métodos para reducir los efectos adversos del agrietamiento por contracción es reforzar el concreto con fibras cortas de acero distribuidas aleatoriamente.

Como el concreto casi siempre está restringido, la tendencia a la fisuración es común. Las fibras de acero tienen tres roles en tales situaciones: 1) permiten que se produzcan grietas múltiples, 2) permiten que se transfieran esfuerzos de tracción a través de grietas, es decir, el compuesto mantiene resistencia a la tracción residual incluso si se producen grietas por contracción, y 3) la transferencia de estrés puede ocurrir por un tiempo prolongado, permitiendo la cicatrización o sellado de las grietas.

Como ya hemos mencionado, el buen desempeño del CRFA dependerá mucho de las características de las fibras como el tipo de fibra, su densidad, diámetro, resistencia a la tensión, módulo de elasticidad, deformación en la rotura, la unión que existe entre la matriz cementante y la fibra, el porcentaje de fibra agregado y su distribución.

En el caso de esta investigación, muchas de estas características no fueron tomadas en cuenta ya que las fibras que se estudiaron no contaban con ellas. Por ser fibras obtenidas del reciclaje, no tienen muchas de las características que poseen las fibras que se encuentran en el mercado, es por eso que solamente se

tomó en cuenta el porcentaje de fibra agregado y se tuvo mucho cuidado para que su distribución fuera la adecuada. En el caso del concreto reforzado con cualquier fibra, las fibras tienen que estar distribuidas de manera aleatoria, sin formar los erizos que se mencionaron con anterioridad, ya que esto afectaría de manera considerable la buena trabajabilidad de la mezcla y el comportamiento de la misma en estado endurecido.

### 5.3 Diseño de mezclas

Para este trabajo se hicieron varios diseños con base en el Capítulo 9. Diseño y Proporcionamiento de Mezclas de concreto Normal del ACI-211, de todos los diseños que se hicieron, solo se incluyen dos, cada uno con resistencia distinta. El primero cuenta con una resistencia de  $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$  y la segunda con una  $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ . Ambas con un revenimiento de 10 a 12. Para poder realizar el diseño de las mezclas primero se obtuvieron las características de los agregados a ocupar. Los agregados fueron proporcionados por Concretos Moctezuma. Se ocupó arena de río proveniente del estado de Morelos y grava caliza de  $\frac{3}{4}$  proveniente del estado de Hidalgo.

Con estos materiales se obtuvieron las siguientes características:

- Tamaño Máximo de Agregado (T.M.A)
- Peso volumétrico (P.V)
- Densidad ( $\rho$ )
- Módulo de Finura (M.F)
- Porcentaje de Absorción (%Abs.)

Antes de cada mezcla también se obtuvo el porcentaje de humedad de los agregados.

Se realizaron las pruebas según los procedimientos de la Norma Mexicana (NMX) que correspondiera según la característica a obtener. Se consultaron las siguientes:

- NMX-C-111-ONNCCE-2004. Industria de la construcción-Agregados para concreto hidráulico-Especificaciones y métodos de prueba
- NMX-C-073-ONNCCE-2004. Industria de la construcción- Agregados- Masa Volumétrica- Método de Prueba
- NMX-C-164-ONNCCE-2004. Industria de la construcción. Agregados-Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado grueso

- NMX-C-165-ONNCCE-2004. Industria de la Construcción- Agregados- Determinación de la masa específica y absorción del agregado fino- Método de prueba
- NMX-C-077-ONNCCE-2004. Industria de la construcción- Agregados para concreto- Análisis granulométrico- Método de prueba

### Granulometría

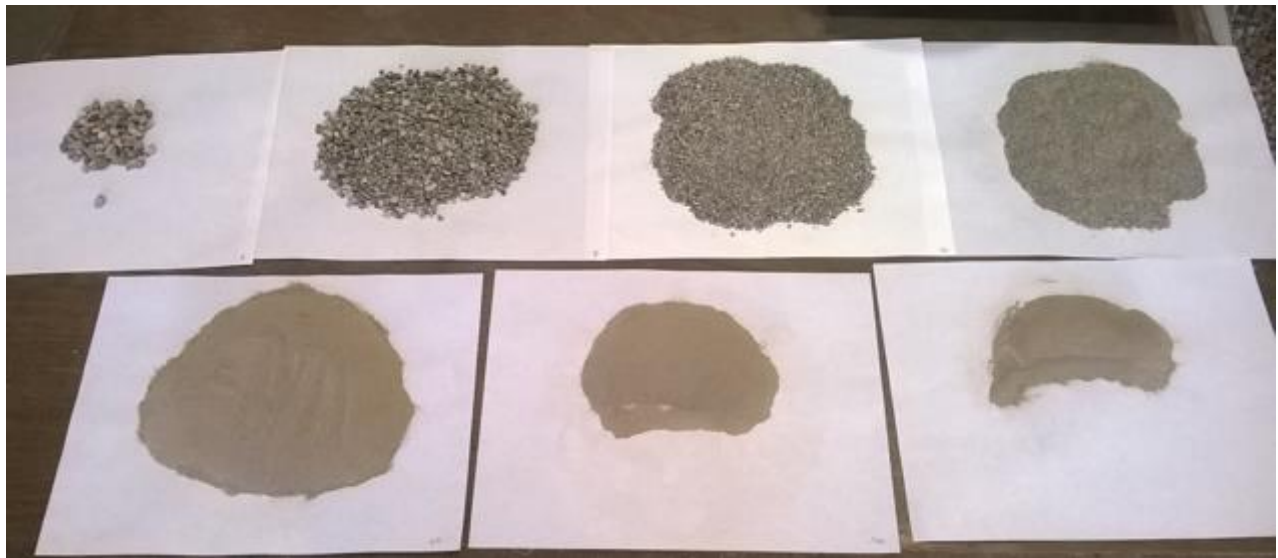
Para obtener el TMA y el MF se hace pasar una cantidad medida por una serie de cribas las cuales se vibran durante cierto tiempo, se pesa la cantidad de material retenida en cada criba y se obtiene la relación del porcentaje retenido en cada una. Las mallas o cribas por las cuales se vibran los agregados son de distintos tamaños para cada agregado, ya sea fino o grueso. Para poder hacer esto, los agregados tuvieron que estar en el horno por lo menos 24 horas para estar en estado seco y poder obtener sus características.



MALLAS O CRIBAS POR LAS CUALES SE VIBRAN LOS AGREGADOS FINOS. FOTO DE AUTOR



PORCENTAJE DE FINOS RETENIDO EN CADA CRIBA. FOTO DE AUTOR



PORCENTAJE DE FINOS RETENIDO EN CADA CRIBA. FOTO DE AUTOR

Con lo que se te obtuvo de pasar los agregados por las cribas, se tienen estas tablas. Para la arena, de hizo esta prueba dos veces, las cuales los resultados fueron iguales.

Malla	Peso retenido	Porcentaje		Σ% Retenido
		Decimal	Entero	
No. 4	0.066 kg	4.10%	4%	4%
No. 8	0.071 kg	4.60%	5%	9%
No. 16	0.140 kg	11.5%	12%	21%
No. 30	0.257 kg	23.2%	23%	44%
No. 50	0.344 kg	31.9%	32%	76%
No. 100	0.212 kg	18.7%	19%	95%
CH	0.086 kg	6.1%	6%	100%

TABLA DE GRANULOMETRÍA AGREGADO FINO

$$M.F = 2.48 \approx 2.5$$

Para la grava se hizo el mismo procedimiento, pero con mallas más grandes. Algunas de estas no se encontraban en el laboratorio de materiales así que se tuvo que trabajar con las que había. De igual manera, se realizó esta prueba dos veces y los resultados fueron los mismos

Malla	Peso retenido	Porcentaje		Σ% Retenido
		Decimal	Entero	
No. 2"	-	-	-	-
No. 1 ½ "	-	-	-	-
No. 1"	3.25 kg	21.81%	22%	22%
No. ¾ "	-	-	-	-
No. ½ "	4.75 kg	31.87 %	32%	54%
No. ⅜ "	2.45 kg	16.44%	16%	70%
No. 4 "	3.35 kg	22.48 %	22%	92%
CH	1.10 kg	7.38%	7%	99%

TABLA GRANULOMETRÍA AGREGADO GRUESO

TMA = 1 ½ "

También se obtuvo la densidad de ambos agregados. Para esto, se pesaron los agregados y se dejaron remojados en agua por lo menos 24 horas, al día siguiente se sacaron del agua y se comenzaron a secar para que se encontraran en el estado deseado, Saturado y Superficialmente Seco (SSS).

El secado del agregado grueso es relativamente fácil ya que este se hace con una jerga después de haber sacado los materiales del agua. Uno sabe que el agregado se encuentra en estado SSS cuando la grava ya no presenta agua en su superficie. Una forma fácil de verlo es cuando los agregados ya no se encuentran brillosos. Es importante trabajar rápido ya que, dadas las condiciones ambientales, el agregado se va secando.



AGREGADO GRUESO MOJADO FOTO DE AUTOR

Una vez que la grava se encuentra en el estado que nosotros deseamos, se vierte sobre un picnómetro con agua, una vez que entra la grava esta desplaza el volumen de agua que ocupa en el picnómetro. Así se obtiene la densidad del agregado, dividiendo el peso de la grava por el volumen desplazado.

$$\delta = \frac{1000 \text{ g}}{360 \text{ ml}} = 2.77 \text{ kg/m}^3$$



PRUEBA PARA OBTENER LA DENSIDAD DEL AGREGADO GRUESO. FOTO DE AUTOR

Para obtener la densidad del agregado fino se hace lo mismo, pero es un poco más complicado el secado del agregado. El agregado fino se saca del agua y se pone sobre una mesa de madera, con espátulas se va moviendo constantemente para que la mesa comienza a absorber parte del agua y el agregado llegue al estado deseado. Para saber si el estado se encuentra en el estado SSS se tiene que llenar un cono una vez que el agregado parezca seco. Una vez que se llenó el cono, se da un ligero golpe en la mesa donde este se encuentre y con eso debe bastar para que el cono se desplome. Si se necesitan más de dos golpes, el agregado aún no habrá llegado al estado deseado y se deberá seguir secando.



AGREGADO FINO RECIÉN SACADO DEL AGUA. FOTO DE AUTOR



COMPROBACIÓN DEL ESTADO DEL AGREGADO. FOTO DE AUTOR

Una vez que el agregado se encuentra en el estado deseado se vierte sobre un picnómetro o frasco de Le Chatelier. En este se encuentra cierto volumen de agua que será desplazado una vez que se vierta el agregado. Se hace una división y se obtiene la densidad del agregado.

$$\rho = \frac{\textit{peso}}{V_{\textit{desplazado}} - V_{\textit{inicial}}} = \frac{500 \textit{ g}}{399\textit{ml} - 200 \textit{ ml}} = 2.51 \textit{ kg/m}^3$$



PRUEBA PARA OBTENER LA DENSIDAD DEL AGREGADO FINO. FOTO DE AUTOR



Posteriormente, se obtuvo el peso volumétrico. El peso volumétrico es una característica que nos sirve para poder diseñar la mezcla. Este se obtiene pesando los agregados en una cubeta con cierto volumen. Simplemente se hace la división del peso entre el volumen. En el laboratorio de Materiales se cuenta con los materiales necesarios para realizar esta prueba.



CUBETA PARA OBTENER EL PESO VOLUMÉTRICO. FOTO DE AUTOR

Esta cubeta se llena por tercios y se compacta con la varilla. Cada capa se compacta con 25 golpes distribuidos por toda la superficie. Ya que la cubeta está llena y compactada, se pesa en una báscula y ese peso se divide en el volumen que contiene la cubeta. Como se muestra a continuación

$$P.V_{fino} = \frac{Peso}{Vol} = \frac{4.31 \text{ kg}}{0.002848 \text{ m}^3} = 1,513.34 \text{ kg/m}^3$$

$$P.V_{fino} = \frac{Peso}{Vol} = \frac{22.263 \text{ kg}}{0.014421 \text{ m}^3} = 1,543 \text{ kg/m}^3$$

Lo último que se obtuvo fue el porcentaje de absorción (%Abs), que es el porcentaje de la cantidad de agua que absorben los agregados. Esto se calcula de una forma sencilla.

Los agregados se sumergen en agua por lo menos 24 horas, se saca y se pesa, después se pone en la estufa y se seca por completo. Finalmente se hace una división y se obtienen estos valores.

$$\%Abs_{fino} = \frac{Phumedo - Pseco}{Pseco} * 100 = \frac{0.902 - 0.861}{0.861} * 100 = 4.76\%$$

$$\%Abs_{grueso} = \frac{Phumedo - Pseco}{Pseco} * 100 = \frac{1.555 - 1.547}{1.547} * 100 = 0.51\%$$

Los datos obtenidos anteriormente, se muestran en una tabla resumen a continuación:

Grava	Arena
<ul style="list-style-type: none"> <li>• T.M.A = 1 ½ "</li> <li>• ρ= 2.78</li> <li>• %Abs = 0.52%</li> <li>• P. V= 1,543 kg/cm<sup>3</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• M.F = 2.5</li> <li>• ρ= 2.51</li> <li>• %Abs = 4.76%</li> <li>• P. V=1,513 kg/cm<sup>3</sup></li> </ul>

TABLA RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS

Como ya se mencionó, con estos datos se diseñará las mezclas necesarias para la investigación. Los diseños se realizaron con base en el Capítulo 9. Diseño y Proporcionamiento de Mezclas de concreto Normal del ACI- 211.

Al inicio de cada mezcla se obtuvo el porcentaje de humedad de los agregados en ese momento. Esto se debe de hacer para hacer la corrección pertinente del contenido de agua en la mezcla. Esta corrección se hace con los datos de %Abs y el %H (porcentaje de humedad). Al agua total de la mezcla se le debe sumar el %Abs y restar el %H y así se obtendrá la cantidad de agua adecuada para cada mezcla.

Diseño de mezcla para una resistencia de  $f'_c=250 \text{ kg/cm}^2$

Revenimiento = 12 cm

1. De la tabla 9-11. Resistencia a Compresión Media Requerida cuando no hay datos disponibles para Establecer la desviación estándar.

**Tabla 9-11. (Métrica-kg/cm<sup>2</sup>) Resistencia a Compresión Media Requerida cuando no hay Datos Disponibles para Establecer la Desviación Estándar**

Resistencia a compresión especificada, $f'_c$ , kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia a compresión media requerida, kg/cm <sup>2</sup>
Menos de 210	$f'_c + 70$
210 a 350	$f'_c + 84$
Más de 350	$1.10 f'_c + 50$

Adaptada del ACI 318.

$$f'_c = 250 + 84 = 334 \text{ kg/cm}^2 \approx 300 \text{ kg/cm}^2$$

2. Para el contenido de agua de la tabla 9.5, para un revenimiento de 12 cm se debe interpolar y se obtiene lo siguiente:

**Tabla 9-5. (Métrica). Requisitos Aproximados de Agua de Mezcla y Contenido de Aire para Diferentes Revenimientos y Tamaños Máximos Nominales del 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**
<b>Concreto sin aire incluido</b>								
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
<b>Concreto con aire incluido</b>								
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

\* Estas cantidades de agua de mezcla son para utilizarse en el cálculo de los contenidos de cementos en las mezclas de prueba. Estas cantidades son máximas para agregados gruesos razonablemente angulares con granulometría dentro de los límites de las especificaciones.

\*\* El revenimiento (asentamiento) del concreto conteniendo agregado mayor que 37.5 mm se basa en el ensayo de revenimiento realizado después de la remoción de las partículas mayores que 37.5 mm, a través de cribado húmedo.

† Las especificaciones de obra deben especificar un contenido de aire en el concreto entregado en la obra dentro -1 +2 puntos porcentuales del valor anotado en la tabla para las exposiciones moderada y severa.

Adaptada del ACI 211.1 y del ACI 318. Hover (1995) presenta esta información en la forma de gráfico.

183.6 litros y 1 % de aire

3. Para la relación a/c, de la tabla 9-3. Dependencia entre la Relación Agua-Material Cementante y la Resistencia a Compresión del Concreto, se obtiene:

**Tabla 9-3 (Métrica) Dependencia entre la Relación Agua-Material Cementante y la Resistencia a Compresión del Concreto**

Resistencia a Compresión a los 28 Días, kg/cm <sup>2</sup> (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

La resistencia se basa en cilindros sometidos al curado húmedo durante 28 días, de acuerdo con la ASTM C 31 (AASHTO T 23). La dependencia asume el agregado con un tamaño máximo nominal de 19 a 25 mm.

Adaptada del ACI 211.1 y del ACI 211.3.

$$a/c = 0.55; \quad c = \frac{183.6}{0.55} = 333.81 \text{ kg/cm}^3$$

4. La cantidad de grava se obtiene con base en la tabla 9-4. Volumen de Agregado Grueso por Volumen Unitario de Concreto se obtiene:

**Tabla 9-4. 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 (%)	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5 (½)	0.59	0.57	0.55	0.53
19.00 (%)	0.66	0.64	0.62	0.60
25.00 (1)	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 (1½)	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

\* Los volúmenes se basan en agregados varillados (compactados) en seco como descrito en la ASTM C 29 (AASHTO T 19). Adaptada del ACI 211.1.

Cantidad de grava=0.75 (P.V) = 0.74 (1543) = 1141.82 kg/m<sup>3</sup>

5. Para la cantidad de arena, se calcula con base en 1000 litros de mezcla y a esto se le resta todo lo obtenido anteriormente:

Agua	183.6	183.6 litro
Cemento	333.81/3.14	106.30 litro
Grava	1141.82/2.78	411.05 litro
Aire	1%	0.01
Arena		1000-700.96
Arena		299.04 litros (2.51) = 751.338 kg/m <sup>3</sup>

Se debe corregir la cantidad de agua con el %Abs y con el %H (porcentaje de humedad). El %H se obtiene antes de iniciar la fabricación de la mezcla.

Diseño de mezcla para una resistencia de  $f'_c=350 \text{ kg/cm}^2$

Revenimiento =10 cm

1. De la tabla 9-11. Resistencia a Compresión Media Requerida cuando no hay Datos Disponibles para Establecer la Desviación Estándar.

**Tabla 9-11. (Métrica-kg/cm<sup>2</sup>) Resistencia a Compresión Media Requerida cuando no hay Datos Disponibles para Establecer la Desviación Estándar**

Resistencia a compresión especificada, $f'_c$ , kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia a compresión media requerida, kg/cm <sup>2</sup>
Menos de 210	$f'_c + 70$
210 a 350	$f'_c + 84$
Más de 350	$1.10f'_c + 50$

$$f'_c = 350 + 84 = 434 \text{ kg/cm}^2 \approx 400 \text{ kg/cm}^2$$

Adaptada del ACI 318.

2. Para el contenido de agua de la tabla 9.5, para un revenimiento de 12 cm se debe interpolar y se obtiene lo siguiente:

**Tabla 9-5. (Métrica). Requisitos Aproximados de Agua de Mezcla y Contenido de Aire para Diferentes Revenimientos y Tamaños Máximos Nominales del 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**
<b>Concreto sin aire incluido</b>								
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
<b>Concreto con aire incluido</b>								
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

\* Estas cantidades de agua de mezcla son para utilizarse en el cálculo de los contenidos de cementos en las mezclas de prueba. Estas cantidades son máximas para agregados gruesos razonablemente angulares con granulometría dentro de los límites de las especificaciones.  
 \*\* El revenimiento (asentamiento) del concreto conteniendo agregado mayor que 37.5 mm se basa en el ensayo de revenimiento realizado después de la remoción de las partículas mayores que 37.5 mm, a través de cribado húmedo.  
 † Las especificaciones de obra deben especificar un contenido de aire en el concreto entregado en la obra dentro -1 +2 puntos porcentuales del valor anotado en la tabla para las exposiciones moderada y severa.  
 Adaptada del ACI 211.1 y del ACI 318. Hover (1995) presenta esta información en la forma de gráfico.

183.6 litros y 1 % de aire

3. Para la relación a/c, de la tabla 9-3. Dependencia entre la Relación Agua-Material Cementante y la Resistencia a Compresión del Concreto, se obtiene:

**Tabla 9-3 (Métrica) Dependencia entre la Relación Agua-Material Cementante y la Resistencia a Compresión del Concreto**

Resistencia a Compresión a los 28 Días, kg/cm <sup>2</sup> (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

La resistencia se basa en cilindros sometidos al curado húmedo durante 28 días, de acuerdo con la ASTM C 31 (AASHTO T 23). La dependencia asume el agregado con un tamaño máximo nominal de 19 a 25 mm.

Adaptada del ACI 211.1 y del ACI 211.3.



A esta mezcla se le añadió un aditivo superfluidizante ViscoCrete 7500 ya que con la resistencia deseada no se alcanzaría el revenimiento. Se hizo el proporcionamiento conforme a la ficha técnica del aditivo.

## Dosificación



De 0.4% y el 1.5% del peso del cemento (4.0 a 14.0 ml/kg de cemento), dependiendo de que se emplee como súper-plastificante o reductor de agua de alto poder. En caso necesario puede aumentarse dicha dosificación.

### DOSIFICACIÓN DE VISCOCRETE 7500<sup>7</sup>

Se realizaron 5 mezclas con esta resistencia, cada una fue de 50 litros, por lo tanto, se tenían 21 kg de cemento para cada mezcla. Según la imagen anterior se agregan de 4 a 14 mililitros por kg de cemento, se decidió agregar 6 ml/kg de cemento en la mezcla. De esto se obtuvo que cada mezcla debía de contener 126 ml de aditivo.

El aditivo se fue agregando poco a poco a la mezcla hasta llegar a la consistencia deseada para el revenimiento especificado en el diseño de mezcla. Esto se logró a los 27 ml de aditivo. Por lo tanto, a cada mezcla se le agregaron 27 ml de aditivo.

### 5.3.1 Proporcionamiento de fibras

Según el artículo 544.1R-11 Fiber Reinforced Concrete, el proporcionamiento ideal de fibras de acero para el concreto va del 0.5% al 2% del volumen total del peso de la mezcla, ya que más del 2% puede afectar la buena trabajabilidad de esta, y menos del 0.5% los cambios en las propiedades son insignificantes. Como se menciona en el capítulo 5.2, una característica importante para el diseño de una mezcla con fibras de acero es la relación de aspecto. En este caso, como las fibras son recicladas y no tienen un diámetro ni longitud definidas, no se puede hacer el diseño como se menciona en el artículo referido con anterioridad. Es por eso que el diseño se realizó de manera convencional con base en el Capítulo 9 del Diseño y Proporcionamiento de Mezclas de concreto Normal del ACI-2011, sin tomar en cuenta las características de las fibras y tomando las fibras como un agregado más.

Para fines de este trabajo de investigación se optó tomar ambos límites, por lo tanto, a las mezclas se les agregó el 0.5% y 2% de cada una de las fibras. Chica y grande.

Este porcentaje se toma con base en el peso volumétrico del concreto, el cual se tomó de 2400 kg/m<sup>3</sup>. Cada mezcla realizada fue de 50 litros, siendo así, el 0.5% corresponde a 0.60 kg de fibra y el 2%

---

<sup>7</sup> Ficha técnica. Sika ViscoCrete 7500



corresponde al 2.4 kg de fibra. Esta cantidad de fibra fue la que se agregó en cada mezcla, según fuera el caso.

También se fabricaron dos losas, una de ellas no contenía fibra, pero la otra contenía el 0.5% de fibra grande. Este porcentaje se escogió de manera completamente aleatoria y se hizo el mismo procedimiento para calcular cuántos kg de fibra llevaría con respecto al volumen de la losa.

## 5.4 Fabricación de mezclas

Para poder saber si el diseño de nuestra mezcla estaba correcto, se fabricaron dos mezclas, cada una con las resistencias deseadas,  $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$  y  $f'c= 350 \text{ kg/cm}^2$ .

De estas mezclas se obtuvieron 5 cilindros para cada resistencia, los cuales se colaron y al día siguiente del colado se descimbraron y se metieron al cuarto de colado. Cada 7 días se ensayó una probeta para así poder determinar si la evolución de la resistencia era la adecuada y saber si el diseño de la mezcla era el adecuado. Una vez alcanzada las resistencias deseadas se fabricaron las mezclas que sirvieron para este estudio.

Para las mezclas con una resistencia de  $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ , solamente se realizó una mezcla prueba, ya que el diseño estaba correcto y la mezcla alcanzó la resistencia requerida. Para la resistencia de  $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ , se tuvo que realizar tres mezclas prueba ya que en las primeras dos no se alcanzó la resistencia, esto sucedió porque no se podría obtener la resistencia requerida con el revenimiento deseado sin la adición de un aditivo, es por eso que a la tercera mezcla prueba con esta resistencia de  $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ , se le añadió el aditivo Sika ViscoCrete. Después de la fabricación de la mezcla con el aditivo, y una vez alcanzada la resistencia deseada, se procedió a la fabricación de las mezclas que se presentan y estudian en este trabajo.

En total se realizaron 10 mezclas, cinco con cada una de las resistencias. Las cuáles se muestran en la siguiente tabla:

$f'c=250 \text{ kg/cm}^2$	<ul style="list-style-type: none"><li>• Testigo</li><li>• 0.5% Fibra chica</li><li>• 2% Fibra chica</li><li>• 0.5% Fibra grande</li></ul>
---------------------------	---

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2% Fibra grande</li> </ul>
$f'c=350 \text{ kg/cm}^2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Testigo</li> <li>• 0.5% Fibra chica</li> <li>• 2% Fibra chica</li> <li>• 0.5% Fibra grande</li> <li>• 2% Fibra grande</li> </ul>

MEZCLAS REALIZADAS

En cada una de estas mezclas se fabricaron 3 cilindros de 10 x 20 cm y tres vigas de 15 x 15 x 60 cm, las cuáles se colaron en un día y al día siguiente se descimbraron y se metieron al cuarto de curado hasta la etapa de ensayes.

Además, se realizaron dos losas de 1 x 1 x 5 cm las cuales se colaron y se dejaron dentro del laboratorio, pero fuera del cuarto de curado por una semana y posteriormente se sacaron del laboratorio para que estuvieran expuestas al medio ambiente. Una de las losas no contenía fibras y la segunda contenía un 0.5% de fibra grande. Este porcentaje y tipo de fibra fue escogido aleatoriamente.

Todas las probetas fueron marcadas con la fecha en la que se colaron, la resistencia y el porcentaje de fibra que poseía cada una de estas.

La fabricación de las mezclas se vio afectada por falta de agregados que se tuvo durante un tiempo y, por la falta de moldes de cilindros y vigas del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería.

Al principio se pensó fabricar varias mezclas el mismo día, pero para cada mezcla se necesitarían tres moldes de cilindros de 10x20 cm y tres moldes de vigas de 15x15x60 cm. De estos solamente se contaba con cinco moldes de cilindros y con tres moldes de vigas por lo que se optó por fabricar solamente una mezcla por día. Se fabricaba y se colaba una mezcla un día y al día siguiente se descimbraba, se limpiaban los moldes, se fabricaba la mezcla y se volvía a colar.

## 6. Ensayes y presentación de resultados

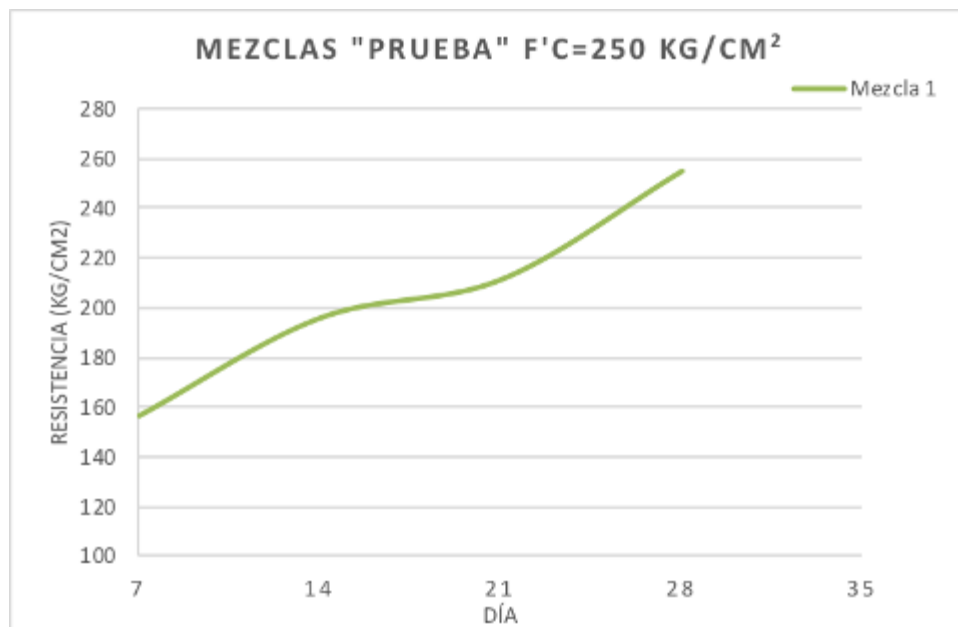
Como ya se ha mencionado, uno de los objetivos de este trabajo es evaluar el comportamiento de las fibras chicas y grandes obtenidas del proceso de reciclaje de neumáticos.

Antes de presentar los resultados obtenidos en los ensayos que se realizaron, es importante mencionar que no se evaluaron las propiedades de las fibras. Sino como mejoran algunas propiedades del concreto en estado endurecido.

En el capítulo anterior se muestra el diseño y las mezclas realizadas y, se mencionó que, para poder realizar las probetas a ensayar, primero se realizó una mezcla "prueba" que nos ayudaría a evaluar la evolución de la resistencia cada 7 días. Si la mezcla a los 28 días alcanzaba la resistencia para cual fue diseñada, se procedía a fabricar el resto de las mezclas para realizar las probetas.

En el caso de la mezcla con una resistencia de  $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ , solamente se tuvo que fabricar una mezcla prueba ya que ésta presentó una correcta evolución de resistencia y, a los 28 días había alcanzado o superado la resistencia deseada.

Los resultados de esta mezcla prueba de muestran en la siguiente gráfica:



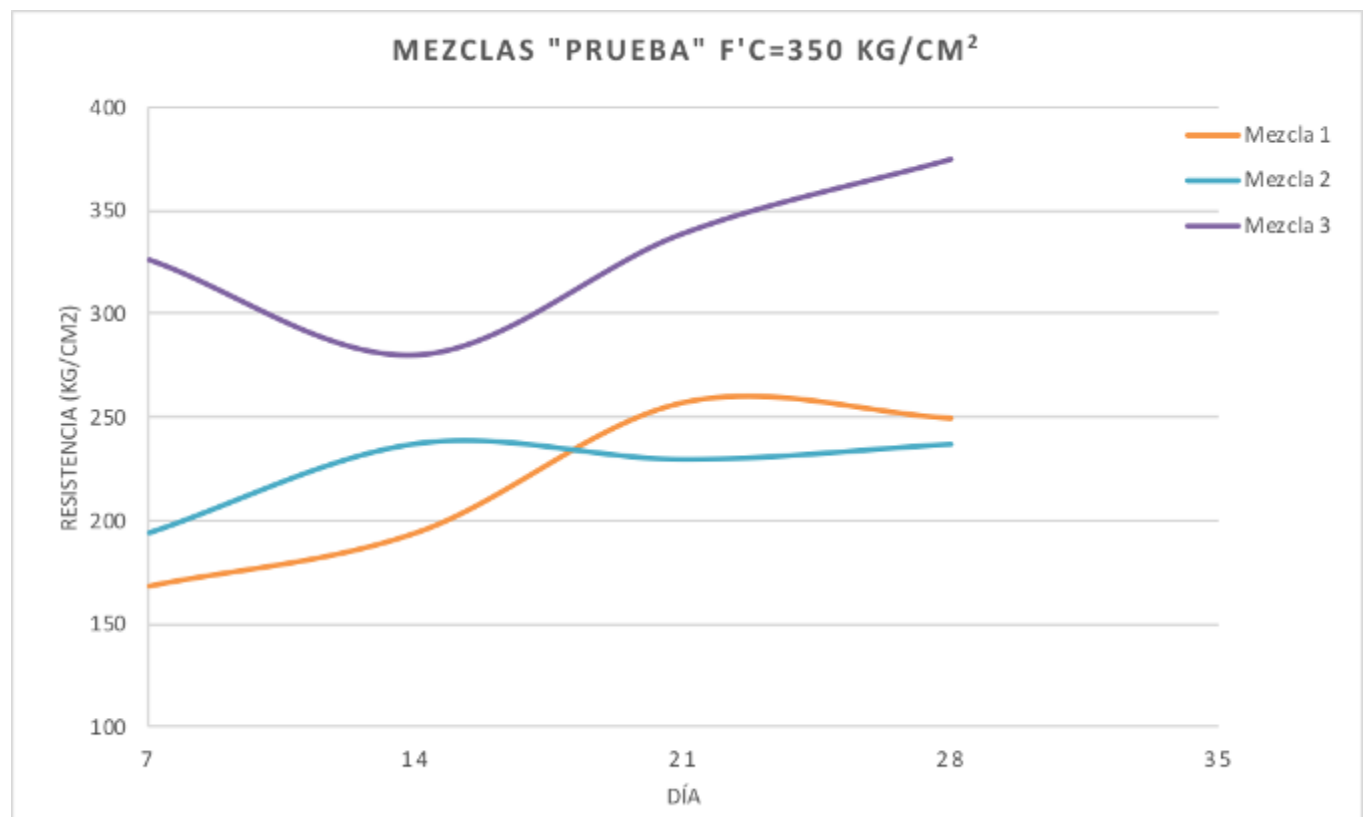
EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA DE MEZCLA "PRUEBA" CON  $F'C=250 \text{ KG/CM}^2$

Como la resistencia a los 28 días fue la deseada, se procedió a la fabricación del resto de las mezclas con esta resistencia. Para cada mezcla se fabricaron 3 cilindros y 3 vigas.

Para las mezclas con una resistencia de  $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$  fue necesario fabricar tres mezclas "prueba" para lograr llegar a esta resistencia.

El tiempo de fraguado, ayuda a que una mezcla de concreto desarrolle su resistencia a compresión en un tiempo determinado. De los cilindros fabricados, se probaron cada 7 días y ninguno de ellos alcanzó la resistencia deseada. Se revisó y corrigió la mezcla dos veces hasta lograr una mezcla que alcanzó la resistencia de  $374 \text{ kg/cm}^2$ .

Las tres mezclas "prueba" realizadas mostraron la siguiente evolución:



EVOLUCIÓN DE RESISTENCIA DE MEZCLAS "PRUEBA" CON  $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$

Recordando el capítulo anterior, todas las mezclas se diseñaron para un revenimiento de 10 a 12 cm.

El revenimiento es una propiedad que posee el concreto en estado fresco la cual nos ayuda a saber la trabajabilidad de una mezcla. Esta depende en su mayoría del agua que contiene una mezcla. En algunos

casos es necesario agregar algún tipo de aditivo para lograr el revenimiento deseado. También, sabemos que el revenimiento en mezclas con fibras se ve afectado por las fibras que se le adicionan.

El revenimiento de las mezclas con una resistencia de  $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$  se vieron afectados y modificadas por la adición de un aditivo el Sika ViscoCrete. Este aditivo es un superfluidizante que nos ayudó a que la mezcla tuviera la fluidez necesaria para la resistencia deseada. En todos los casos de agregaron 27 ml de aditivo a todas las mezclas, en ningún caso se tuvo que agregar más agua ya que las mezclas parecían tener la consistencia adecuada.

En esta resistencia, solamente una mezcla tuvo 5 cm de revenimiento y fue el caso de la mezcla con un contenido del 2% de fibra chica.

Todas las mezclas tuvieron un revenimiento distinto que se muestra a continuación:

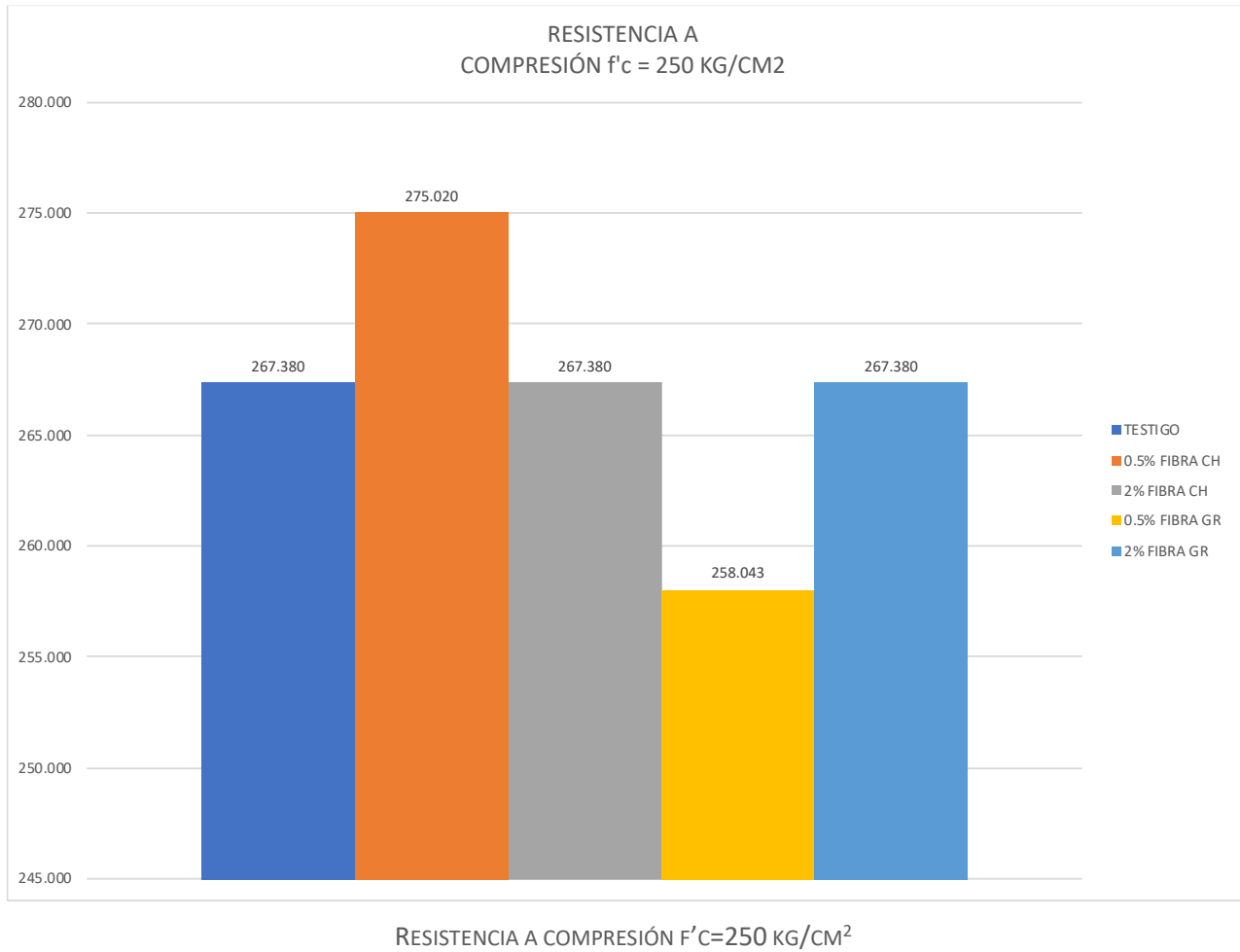
Mezcla	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Fecha de colado	Revenimiento (cm)	Agua adicional
Testigo	250	21/06/17	8.5	+ 2 lt
0.5% Fibra Chica		27/06/17	7.5	+ 0.850 lt
2% Fibra Chica		09/08/17	5	+ 1.20 lt
0.5% Fibra Grande		10/08/17	9	+ 2 lt
2% Fibra Grande		14/08/17	6	+ 2 lt
Testigo	350	07/12/17	9	- 1.7 lt
0.5% Fibra Chica		14/12/17	16	- 0.100 lt
2% Fibra Chica		15/12/17	5	/
0.5% Fibra Grande		08/12/17	10	/
2% Fibra Grande		13/08/17	7	- 0.200 lt

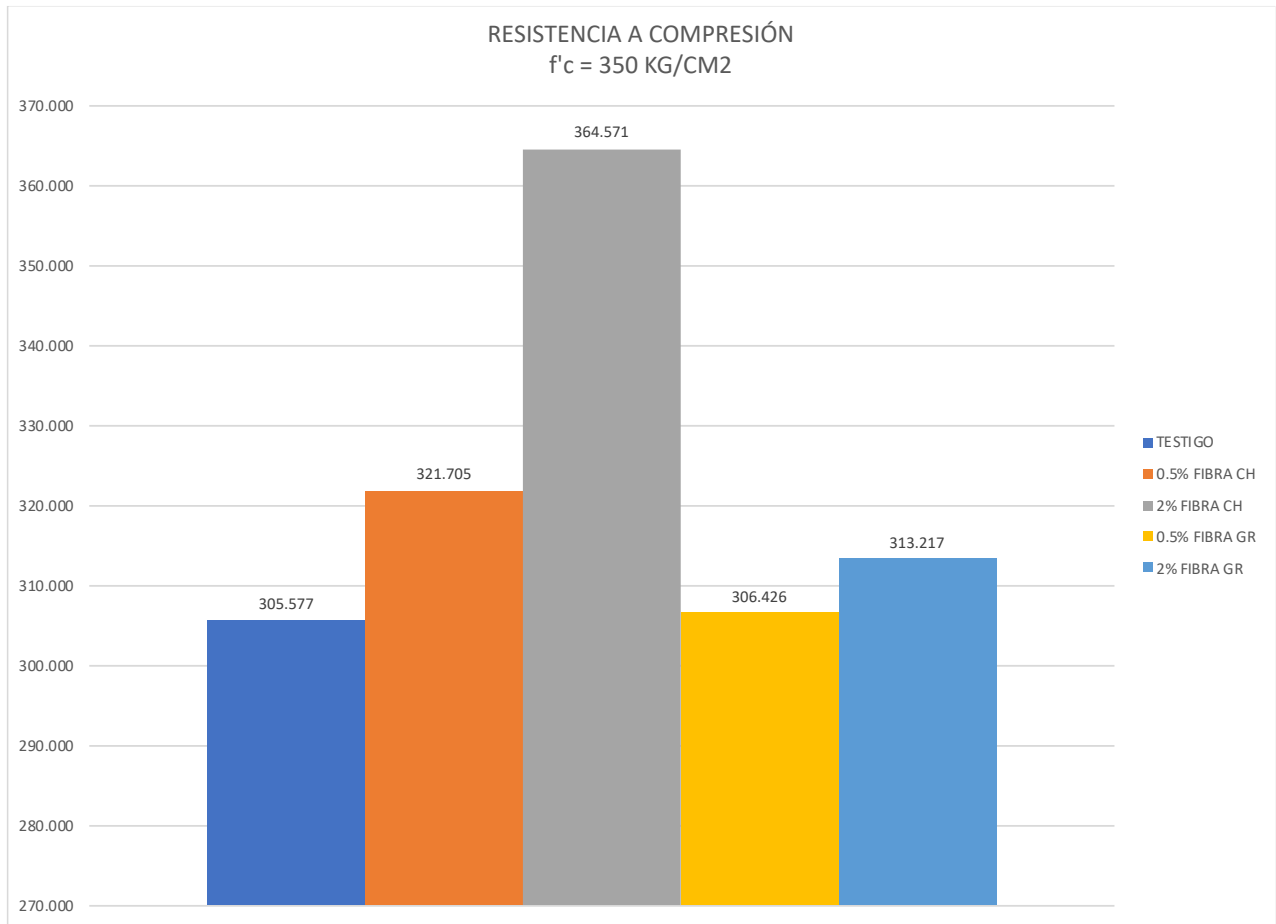
#### REVENIMIENTO

Los cilindros solamente se ensayaron a compresión simple en la prensa hidráulica pequeña que se encuentra ubicada en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Esta prensa funciona de forma manual. Una vez transcurridos los 28 días en los cuales el concreto adquiere su resistencia a compresión para la cual fue diseñada la mezcla, se sacan las probetas del cuarto de curado. Para poder ensayar los cilindros se tuvo que poner una base debajo de cada cilindro para que el espacio entre el cilindro y el cabezal por el cual se transmite la carga sea el menor posible. Para que no generar excentricidad en la carga aplicada a las cilindros en la prueba de compresión simple se uniformizó la superficie de contacto con un pedazo de carón o periódico. Una vez que se ha hecho esto, se procede a aplicar la carga, por medio de una palanca que funciona como un gato hidráulico. La palanca se sube y se

baja a un ritmo constante hasta que el cilindro falla. Esta prensa solamente nos da el resultado de la carga última.

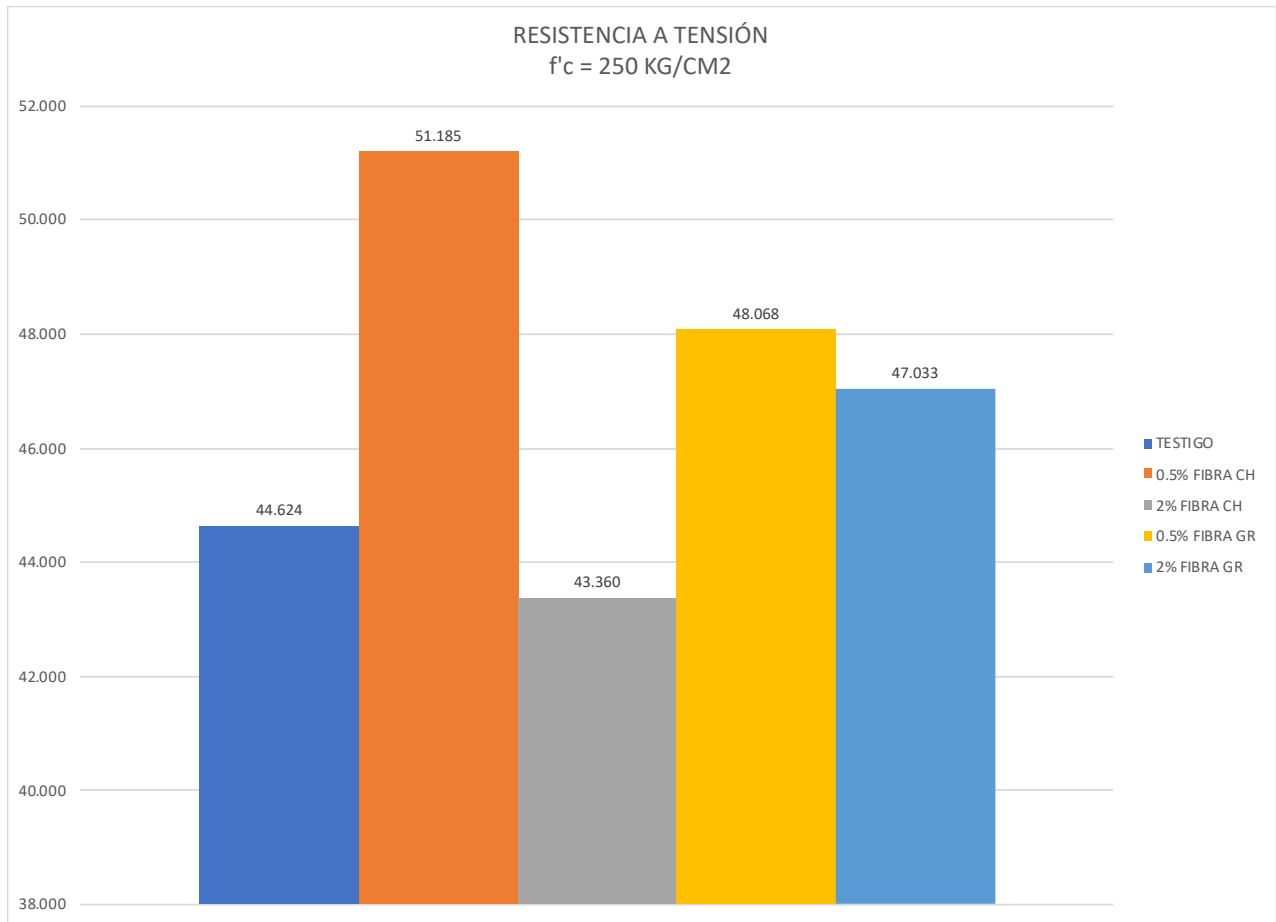
Este procedimiento se realizó para los 30 cilindros presentados en este trabajo y también para los cilindros obtenidos de las mezclas prueba. Una vez ensayados todos los cilindros, se obtienen las siguientes gráficas con los resultados promedio:





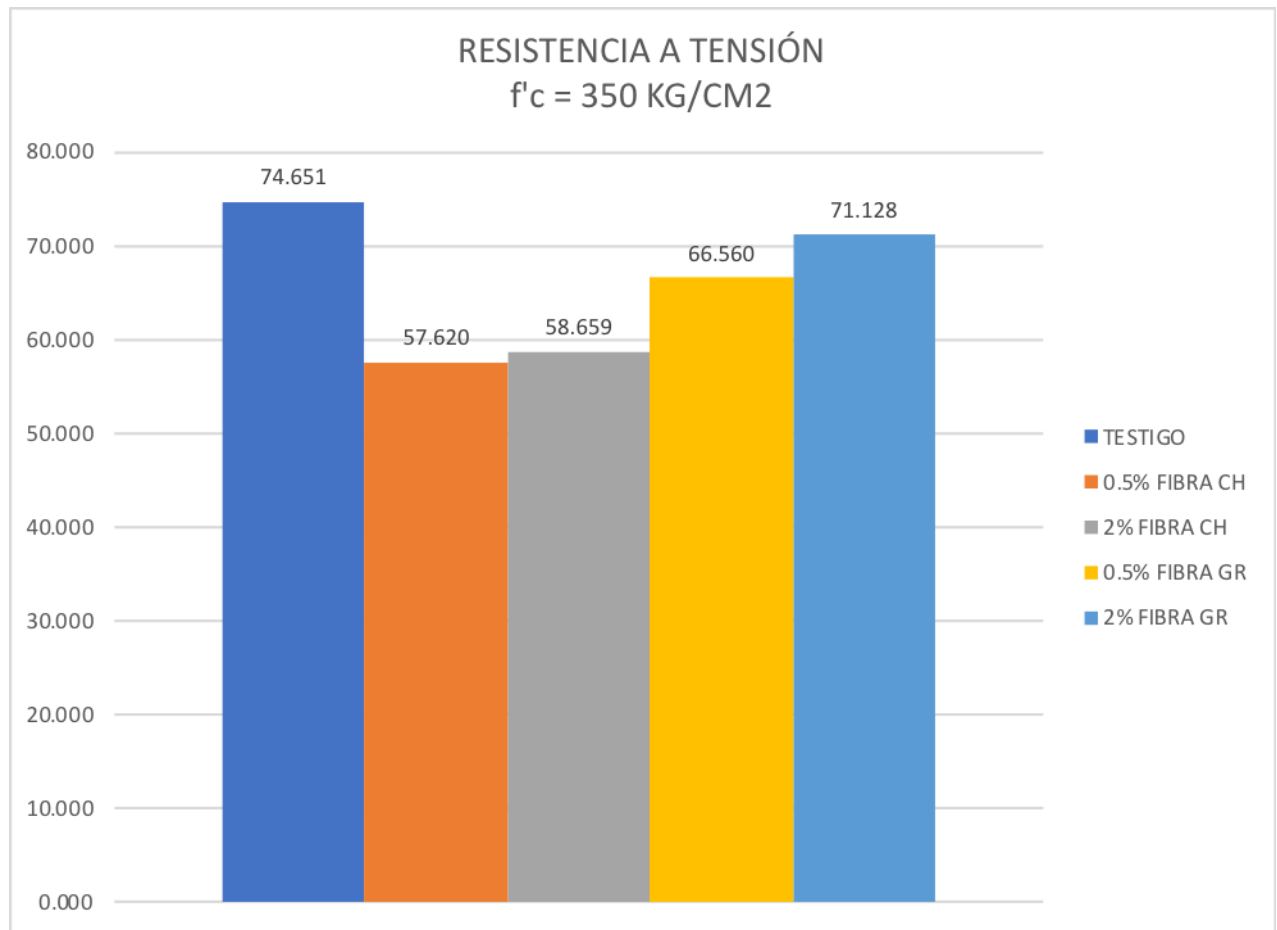
RESISTENCIA A COMPRESIÓN F'c=350 KG/CM<sup>2</sup>

Para ensayar las vigas se utilizó la prensa hidráulica universal que se encuentra en el salón de clases del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Para estos ensayos se contó con el apoyo de los encargados del laboratorio ya que solamente ellos tienen acceso y saben manejar esa prensa. Se siguió el siguiente procedimiento para las 30 vigas obtenidas de la fabricación de las mezclas. Una vez retirados los elementos del cuarto de curado, se marcan las vigas para que las cargas y los apoyos estén ubicados adecuadamente. Las cargas se aplican a uno y dos tercios de la viga y los apoyos se encuentran en los extremos. Una vez marcadas las vigas, se acomodan de la menor manera para que las cargas y los apoyos coincidan con las marcas de la viga, después se procede a aplicar la carga. Esto se hace a una velocidad de 2 kg/s. La carga se detuvo una vez que las vigas fallaron. De igual manera, se obtuvo la carga última de cada viga.



RESISTENCIA A TENSIÓN  $f'_c=250 \text{ KG/CM}^2$





RESISTENCIA A TENSIÓN F'c=350 KG/CM²

También se realizaron dos losas pequeñas, una sin contenido de fibras y la otra con el 0.5% de fibra grande. Este valor se escogió de manera completamente aleatoria.

El fin de fabricar estas losas de 0.5m x 0.5m x 0.05 m, era saber el desempeño de las fibras ante las contracciones del concreto. Las losas se fabricaron con el mismo diseño que se utilizó para todas las mezclas con resistencia de  $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ . La adición del aditivo se hizo junto con el agua de diseño y se colaron cimbras fabricadas del tamaño deseado. Las losas se quedaron expuestas al medio ambiente en todo momento desde que se colaron. Estas mezclas fueron fabricadas en enero del 2018. La primera semana, se quedaron dentro del laboratorio de materiales. Como se observó que los no se presentaron grietas en ninguna de las dos losas debido a la que dentro del laboratorio se conservó la humedad gracias al clima, se optó por sacar ambas losas fuera del laboratorio. Estas losas permanecieron ahí hasta el término de la elaboración de este trabajo.

<b>LOSA TESTIGO</b> 50 x 50 x 5 cm  <b>Fecha de colado: 10/01/18</b>  <b>f'c = 350 kg/cm<sup>2</sup></b> <b>Aditivo : 27 ml Sika ViscoCrete</b> <b>Rev = 14 cm – 300 ml de agua</b>	<b>LOSA 0.5% FIBRA GRANDE</b> 50 x 50 x 5 cm  <b>Fecha de colado: 10/01/18</b>  <b>f'c = 350 kg/cm<sup>2</sup></b> <b>Aditivo : 27 ml Sika ViscoCrete</b> <b>Rev = 9 cm – 500 ml de agua</b>
--	---

MEZCLAS DE LOSAS FABRICADAS

La diferencia entre la losa sin contenido de fibra y la que contenía el 0.5% de fibra es mínima y casi imperceptible. Estas losas se fueron revisando periódicamente. Las primeras dos semanas se revisaron cada dos días, posterior a esto se revisaron cada semana hasta que la presencia de nuevas fisuras no era perceptible.

## 7. Conclusiones

### 7.1 Resultados de Laboratorio

Como parte de capacitación en este trabajo, asistí al laboratorio de Concretos Moctezuma dónde se realizaron mezclas con una resistencia de 350 kg/cm<sup>2</sup> para obtener resultados comparables. En todos los casos se utilizó adición 1.8 kg/m<sup>3</sup> de cinco tipos de fibra, cuatro de polipropileno y las de acero reciclada utilizadas en este trabajo.

Se obtuvo revenimiento de entre 12 y 13 cm y en todos los casos se reflejó un aumento en la resistencia a compresión. Se compararon cinco mezclas con distintos tipos de fibras, cuatro de polipropileno y las de acero recicladas y en todos los casos se obtuvo una mejora del 24%. Las fibras que obtuvieron los mejores resultados mostrando un incremento del 34.42% fueron las fibras de acero obtenidas del reciclaje de neumáticos.

FECHA DE ELABORACION	ADITIVO UTILIZADOS cc/m <sup>3</sup>	PROVEEDOR FIBRA UTILIZADA 1.8 kg/m <sup>3</sup>	REVENIMIENTO (cm)	RESISTENCIAS (kg/cm <sup>2</sup> )		
				3 d	7 d	28 d
20-ene-16	DARACEM 19 6	GRACE STRUX 90-40	12	247	329	436
20-ene-16	DARACEM 19 6	GRACE STRUX BT-50	12	254	351	451
20-ene-16	DARACEM 19 6	SIKA FORCE PP-65	12	252	336	438
20-ene-16	DARACEM 19 6	EUCOMEX EUCO TUF STRAND F	13	244	336	441
20-ene-16	DARACEM 19 6	UNAM METALICA RECILAJE DE LLANTAS	13	272	358	467

## 7.2 Diseño

El diseño de las mezclas con una resistencia con  $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$  no fue el adecuado ya que a pesar de que se utilizó un aditivo superfluidizante, las mezclas nunca alcanzaron la resistencia deseada.

## 7.3 Fluidez

Se comprobó que el uso de fibras cortas en las mezclas de concreto afecta su fluidez, disminuyendo el revenimiento de las mismas.

Como se comentó en el capítulo correspondiente al CRFA, para poder hacer un diseño correcto con las fibras, se debe de tomar en consideración algunas características de estas como su relación de aspecto, longitud, diámetro, módulo de elasticidad, rugosidad y geometría. Como las fibras son obtenidas del reciclaje de neumáticos y no son uniformes, no fue posible obtener las características de las para integrarlas en el diseño de mezcla con fibras de acero. En este caso, las fibras simplemente se incluyeron en las mezclas como un agregado más de la mezcla.

Las mezclas se diseñaron con un revenimiento de 10 a 12 cm, pero se obtuvo un revenimiento promedio de 7.2 cm y de 9.4 cm en las mezclas con  $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$  y con  $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ , respectivamente. El menor revenimiento presentado en ambos casos fue de 5 cm en las mezclas con un contenido de 2% de fibra chica. Esto se debió al gran volumen de fibra que se le agregó a las mezclas debido al bajo peso de las mismas. Esto generó problemas en su fabricación y el manejo de la mezcla.

## 7.4 Resistencia a compresión

El mayor incremento en la resistencia a la compresión para los elementos con un  $f'c= 250 \text{ kg/cm}^2$  se presentó en la que contiene el 0.5% de fibra chica, incrementando su resistencia en un 2.86%. Con respecto a los elementos testigo.

Para el caso de los elementos con un  $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$  el mayor incremento se presentó en la que contiene el 2% de fibra chica, aumentando la resistencia a la compresión en un 19.31%. Con respecto a los elementos testigo.

En la mayoría de los casos, las fallas presentadas no fueron fallas típicas a compresión, es decir fallas a  $45^\circ$ , sino fallas casi verticales.

Dentro de este trabajo se realizó el primer acercamiento con los aditivos para el concreto, en específico con el superfluidizante que es un reductor de agua, es por eso que se cree que la del mismo no fue la

adecuada. Esto pudo haber generado algunas fallas en la fabricación de las mezclas, ya que nunca se alcanzó la resistencia en uno de los casos.

Con el uso de algunos aditivos se recomienda utilizar cierto tipo de TMA de agregado grueso. El TMA del agregado pudo haber sido erróneo debido a la falta de las charolas necesarias para su determinación. en el laboratorio de materiales de la Facultad.

Como ya se comentó con anterioridad, cuando el concreto tiene presencia de fibras contenidas en su matriz, solamente la carga ultima presenta una ligera mejora.

Después de los resultados presentados en el capítulo anterior, podemos decir que los resultados obtenidos de las pruebas a compresión son los esperados ya que, como se menciona en el capítulo referente al concreto reforzado con fibras de acero, se menciona que no hay mejora de la compresión con la utilización de fibras en los porcentajes presentados en este trabajo. No hay una diferencia significativa entre los cilindros que contienen fibras y los que no contienen.

## 7.5 Tensión

Es sabido que el concreto sin ningún tipo de refuerzo no cuenta con una buena resistencia a tensión, por lo general se considera el 10% de la resistencia a compresión. En teoría, las fibras contenidas dentro de la matriz del concreto mejoran su comportamiento a tensión.

El mayor incremento que se presentó en las mezclas con  $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$  fue de 14.86% (con respecto a la mezcla testigo) para la mezcla con el 0.5% de contenido de fibra grande, las vigas con el 0.5% de fibra grande y con 2% de fibra grande presentaron porcentajes de mejoría de 7.72% y 5.40%, respectivamente. Además, las fallas presentadas no fueron fallas frágiles o súbitas el elemento “avisó” antes de romperse completamente. Se creó una especie de “entretejido” entre fibra y fibra, y esto hizo que el elemento no se rompiera en dos partes.

La mayoría de las fallas, se presentaron a la mitad del elemento, aunque algunas otras presentaron fallas orientadas hacia algún extremo de la viga, se supone que esto sucedió debido a la distribución de las fibras y a la supuesta formación erizos durante la fabricación de la mezcla y si estos estaban contenidos dentro del elemento.

Como vimos en el capítulo 4, la flexión puede incrementar más del doble cuando se utilizan fibras de acero, pero esto solamente sucede cuando se utiliza alrededor de un 4% de fibras pero sabemos que no

se puede utilizar este porcentaje debido a la afectación que se presenta en la trabajabilidad. Si el incremento de la flexión fuera proporcional al porcentaje de fibra agregado suponemos que con un 2% de contenido de fibra de acero, la resistencia a tensión aumentaría en un 50%. Comparando con los resultados obtenidos en los ensayos de nuestras vigas, se obtiene una mejora de alrededor el 8% y 15% con el 2% de fibra grande y fibra chica, respectivamente. Muy alejado a lo que se esperaba.

La resistencia a tensión normalmente resulta alrededor del 10% de la resistencia a compresión. Si partimos de esto, la tensión de una mezcla con una resistencia a compresión de 250 kg/cm<sup>2</sup> debería de ser de 25 kg/cm<sup>2</sup>. En el capítulo 4, se comenta que, con presencia de fibras de acero, la resistencia a tensión tiene un incremento de entre 30% y 40%.

Se concluye que quizás el proporcionamiento de fibras y/o que el diseño de las mezclas no fue el adecuado.

## 7.6 Contracciones

El contenido ideal de fibras ideal para ayudar contra al fisuramiento por contracción debe de ser mayor al 0.5% (según artículo del ACI), con esto se comprueba esto ya que la diferencia entre las fisuras de las dos losas no fue considerable. No se presentó una mejoría significativa entre la losa testigo y la losa con un 2% de contenido de fibra. Se cree que la fibra utilizada en la prueba no fue la adecuada, aunque se utilizó más del 0.5% de fibra en la mezcla, el resultado no fue el esperado.

## 7.7 Conclusiones generales

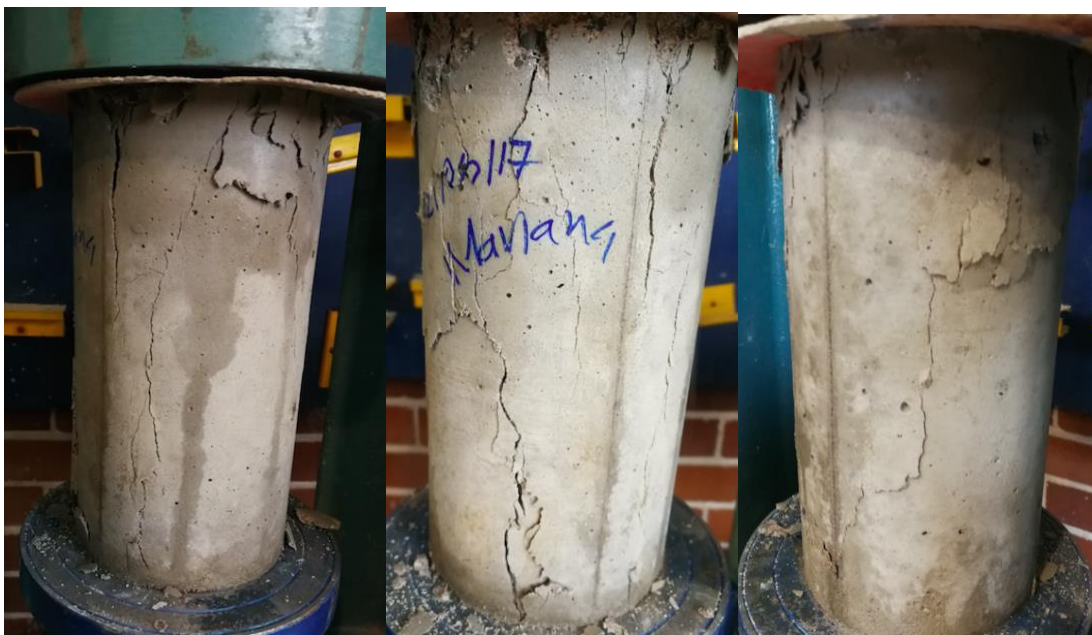
En general, se considera que el desempeño de las fibras no cumplió las expectativas que se tenían en la tesis ya que se mejores resultados en cuanto a resistencia. Se recomienda hacer un estudio más a fondo para determinar cuál es el porcentaje de contenido óptimo para este tipo de fibras. En este trabajo se optó solamente por estudiar dos tipos de fibras y dos porcentajes distintos ya que no se contaba con el material necesario para fabricar las probetas necesarias para estudiar otro porcentaje de contenido de fibra. Se concluye que es necesario hacer un estudio más específico para el diseño de mezclas con fibras de acero recicladas, así como obtener definir la forma de como obtener las características y propiedades de las fibras recicladas.

Con base en los resultados obtenidos, que existe una posibilidad de que estas fibras se puedan utilizar en el concreto.

## 8. Referencias

- Manual Técnico: Fibras como Elemento Estructural para el Refuerzo del Hormigón. Maccaferri.
- ACI 544.4R-88. Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete
- ACI 544.5R-10. Report on the Physical Properties and durability of Fiber-Reinforced Concrete
- Concrete Technology. A.M. Neville, J.J. Brooks. Pearson, Second Edition, 2010. Essex, London
- ACI- Capítulo 15. Cambios en el Volumen del Concreto
- Manual de Tecnología del Concreto, Sección 1: Definición y requisitos de los componentes del concreto. Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Ingeniería UNAM. Limusa, México 1994.
- Manual de Tecnología del Concreto, Sección 2: Concreto fresco y en curso de endurecimiento. Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Ingeniería UNAM. Limusa, México 1994.
- Manual de Tecnología del Concreto, Sección 3: Concreto en estado endurecido. Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Ingeniería UNAM. Limusa, México 1994.
- Capítulo 9. Diseño y Proporcionamiento de Mezclas de Concreto Normal del ACI- 211.
- NMX – C- 088 – 1997 – ONNCE. Industria de la construcción – Agregados – Determinación de impurezas orgánicas en el agregado fino
- NMX – C- 077 – 1997 – ONNCE. Industria de la construcción – Agregados para concreto – análisis granulométrico – Método de prueba.
- NMX – C- 165 - ONNCE – 2004. Industria de la construcción – Agregados – Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado fino – Método de prueba.
- NMX – C- 073 - ONNCE – 2004. Industria de la construcción – Agregados – Masa volumétrica – Método de prueba
- NMX – C- 164 - ONNCE – 2004. Industria de la construcción – Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado grueso

## 9. Anexo fotográfico



Fallas en cilindros con 0.5% de fibra chica



Fallas en cilindros con 2% de fibra chic





Fallas en cilindros con 0.5% de fibra grande



Falla en cilindros con 2% de fibra grande



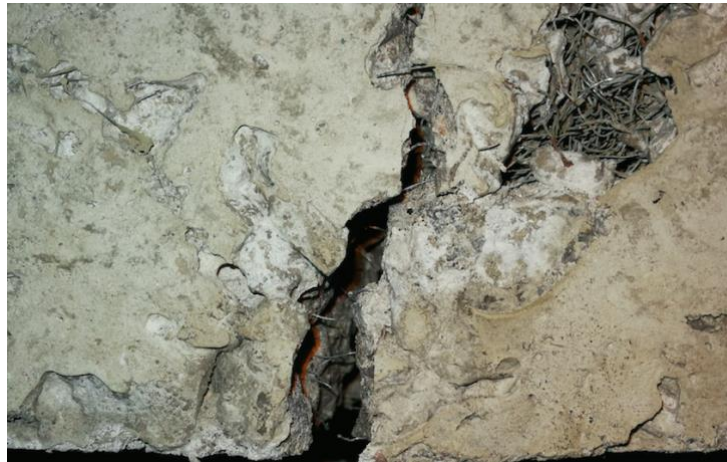
Falla en cilindro testigo



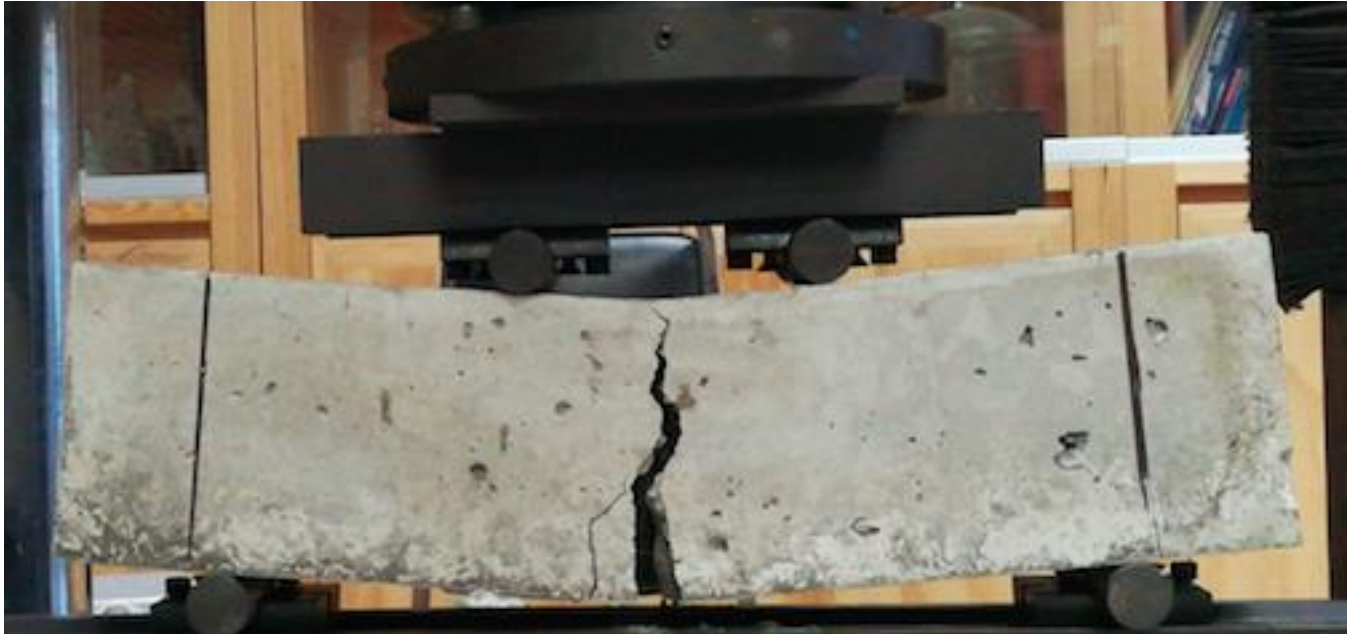
Falla en vigas testigo



Falla en vigas con 0.5% de fibra chica



Falla en vigas con 2% de fibra chica



Falla en viga con 0.5% de fibra grande





Falla en viga con 0.5% de fibra grande



Falla en viga con 2% de fibra grande



Erizos contenidos en vigas