



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO REFORZADO
CON FIBRAS OBTENIDAS DEL RECICLADO DE LLANTAS**

T E S I N A

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN **CONSTRUCCION URBANA**

PRESENTA:

ING. ANDRÉS RAMÍREZ ALQUICIRA

DIRECTOR DE TESINA: **ING. JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES**

CIUDAD DE MÉXICO

AGOSTO 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIAS

Este trabajo está dedicado a mis padres y hermano; Ramón Ramírez, Ruth M. Alquicira y José Ramón Ramírez que siempre me han brindado todo su apoyo para seguir adelante y por haber estado a mi lado en los momentos importantes.

A mi demás familia que me dio su aliento y siempre estuvo presente.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por haberme permitido estudiar en esta gran escuela, lograr terminar mi carrera y continuar con los estudios de especialidad.

A mi asesor, el Ing. Juan Luis Cottier Caviedes por su disposición, conocimiento y darme la oportunidad de presentar este trabajo.

Índice

| | |
|---|-----------|
| Resumen | 1 |
| Introducción | 2 |
| Objetivo..... | 3 |
| Hipótesis | 3 |
| Metodología..... | 3 |
| Capítulo 1. Estado del arte del concreto reforzado con fibra de acero..... | 4 |
| 1.1 Definición de fibras | 4 |
| 1.2 Clasificación de fibras..... | 5 |
| 1.3 Fibras de acero..... | 5 |
| 1.4 Concreto reforzado con fibra de acero (CRFA) | 7 |
| 1.5 Propiedades físicas y mecánicas del CRFA..... | 8 |
| 1.5.1 Propiedades físicas | 8 |
| 1.5.2 Propiedades mecánicas..... | 9 |
| 1.5.2.1 Resistencia a compresión | 9 |
| 1.5.2.2 Resistencia a tensión directa | 10 |
| 1.5.2.3 Resistencia a flexión | 10 |
| 1.6 Aplicaciones del concreto reforzado con fibra de acero | 11 |
| 1.6.1 Revestimiento de túneles..... | 12 |
| 1.6.2 Pavimentos y pisos | 12 |
| 1.6.3 Elementos prefabricados | 13 |
| Capítulo 2. La Llanta (neumático)..... | 14 |
| 2.1 Estructura de la llanta | 14 |
| 2.2 Características de la llanta de desecho..... | 16 |
| 2.3 La llanta como fuente de contaminación | 16 |
| 2.4 Reciclaje de llantas..... | 18 |
| Capítulo 3. Etapa experimental..... | 19 |
| 3.1 Materiales utilizados..... | 19 |
| 3.1.1 Fibras de acero | 19 |

| | | |
|--------------------|---|-----------|
| 3.1.2 | Cemento | 21 |
| 3.1.3 | Agua..... | 21 |
| 3.1.4 | Agregados..... | 21 |
| 3.1.5 | Moldes..... | 21 |
| 3.2 | Diseño de mezcla | 22 |
| 3.3 | Fabricación de las mezclas | 23 |
| 3.4 | Elaboración de los especímenes | 26 |
| 3.5 | Desmolde y curado de los especímenes..... | 27 |
| 3.6 | Ensayos..... | 28 |
| 3.6.1 | Ensayo a compresión..... | 28 |
| 3.6.2 | Ensayo a flexión..... | 29 |
| Capítulo 4. | Resultados | 31 |
| 4.1 | Resistencia a compresión..... | 31 |
| 4.2 | Resistencia a flexión..... | 33 |
| Capítulo 5. | Conclusiones | 37 |
| Referencias | | 39 |

Resumen

En este trabajo de investigación se fabricó concreto reforzado con fibra de acero, la fibra de acero utilizada proviene de llantas de desecho recicladas.

Para conocer el comportamiento de las fibras de acero sobre el concreto, se construyeron especímenes de concreto para realizar pruebas experimentales y obtener los parámetros requeridos.

Los especímenes fabricados tienen forma cilíndrica y prisma rectangular, los especímenes cilíndricos tienen un diámetro de 15 cm y una altura de 30 cm, mientras que los especímenes rectangulares tienen una dimensión de 15 x 15 x 60 cm.

Para la fabricación de los especímenes se elaboraron tres mezclas de concreto; la primera mezcla sirvió como mezcla testigo por lo que no se le agregaron fibras, mientras que la segunda y tercera mezcla sí se les adicionaron fibras.

Las mezclas fueron dosificadas con las mismas características y materiales, a fin de eliminar variables durante el estudio.

Para los concretos reforzados con fibra de acero la cantidad de fibra incluida fue de 5 y 9 kg/m³.

El concreto fue diseñado tomando como base el método expuesto en el reporte ACI 211.1 (American Concrete Institute), se diseñó para una resistencia de 250 kg/cm², revenimiento de 7.5 cm, agregado grueso de 19 mm. (3/4") y una relación agua-cemento de 0.6.

Los especímenes fueron ensayados por compresión y flexión a los 28 días después de colar el concreto en los moldes, ensayando un total de 18 especímenes (13 cilindros y 5 prismas), obteniendo los resultados y generando las conclusiones descritas en la parte final de esta tesis.

Palabras clave: Concreto, fibra de acero, compresión, flexión, llanta, neumático, reciclado.

Introducción

El concreto como material para construcción ha generado un gran desarrollo en la infraestructura actual, los materiales para fabricar el concreto son de fácil obtención, por lo cual es un material de construcción económico y fácil de fabricar.

La importancia como material principal de construcción ha originado la necesidad de investigar sus propiedades mecánicas para poder mejorarlas y de esta manera generar concretos con características diferentes para cada campo de utilización.

Durante los últimos años la innovación en la tecnología del concreto ha incrementado, se han creado concretos novedosos como lo son: el concreto arquitectónico, permeable y antibacteriano, entre otros.

Al mismo tiempo la necesidad de reutilizar los materiales creados por el hombre es inevitable debido a la sobreexplotación de los recursos naturales, por este y otros motivos se han generado alternativas para reutilizar los materiales de desecho en el área de la construcción.

Algunos ejemplos de materiales de rehúso son el concreto y el plástico triturado que son utilizados como agregado para fabricar concreto nuevo, así como también es el plástico de polipropileno empleado como fibra para elaborar concreto reforzado con fibra.

El uso de las fibras en el concreto puede ser con finalidad estructural y no estructural, cuando se utilizan con fin estructural las fibras contribuyen en los cálculos de alguno de los estados limite último o de servicio. Las fibras para uso no estructural se emplean principalmente para: mejora de la resistencia al fuego, controlar la fisuración por retracción plástica, restringir el ancho de fisuras, etc.

En este trabajo de investigación se busca estudiar el comportamiento de la compresión y flexión del concreto reforzado con fibra de acero obtenida del reciclado de llantas, así mismo se pretende aprovechar los materiales potencialmente reciclables de las llantas, obteniendo beneficios tanto para el sector de la construcción como también para el medio ambiente.

Objetivo

El objetivo de esta tesina es estudiar el comportamiento del esfuerzo a compresión y flexión que presenta el concreto reforzado con fibras de acero obtenidas del reciclado de llantas.

Hipótesis

La incorporación de fibras en el concreto simple aumentara la resistencia de compresión y flexión del concreto.

Al fabricar especímenes de concreto con diferentes cantidades de fibra de acero y ensayarlos se podrá determinar un patrón el cual ayudara a conocer la proporción ideal de fibras añadidas al concreto.

Metodología

Se realizaran estudios experimentales en laboratorio, construyendo especímenes cilíndricos y rectangulares de concreto simple y concreto reforzado con fibra de acero obtenida del reciclado de llanta.

Se fabricaran tres tipos de mezclas, una mezcla no tendrá fibra (testigo), las dos restantes contendrán 5 y 9 Kg/m³ de fibra.

El ACI (American Concrete Institute) en su reporte 544.3R menciona que la dosificación común de la fibra de acero varía entre 15 a 78 kg/m³.

Aun conociendo la recomendación anterior, la dosificación de la fibra se consideró a partir de la cantidad de fibra disponible y del número de especímenes a fabricar.

Los especímenes se ensayaran a los 28 días después del colado logrando obtener los datos necesarios para exponer las conclusiones de la tesina presente.

Capítulo 1. Estado del arte del concreto reforzado con fibra de acero.

La principal característica del concreto es la resistencia a compresión, algunos concretos pueden llegar a tener una resistencia de 200 hasta 900 kg/cm², pero el mayor inconveniente que tiene el concreto es su baja resistencia a la tensión. Algunos autores opinan que la resistencia a tensión del concreto es aproximadamente del 10% al 15% de su resistencia a compresión.

Otro problema al utilizar concreto es la contracción o retracción plástica que se presenta en el concreto fresco inmediatamente después de su colado, este proceso genera grietas o fisuras las cuales aparecen fundamentalmente en las superficies horizontales. La contracción plástica perjudica principalmente a las losas.

Al concreto se le han añadido fibras para poder controlar el agrietamiento y soportar mayores esfuerzos de tensión y flexión, creando el concreto reforzado con fibra.

La fibra como material de construcción no es reciente, en la antigüedad se utilizaba para reforzar materiales frágiles. La paja era utilizada para reforzar ladrillos secados al sol, mientras que el pelo de caballo se utilizó para reforzar el mortero y yeso de albañilería.

Las fibras siempre han sido una alternativa para satisfacer las necesidades en la construcción, en el pasado solo podían encontrarse en la naturaleza, pero gracias a los beneficios obtenidos al añadirlas en el concreto, se han creado fibras de diferentes tipos de materiales.

La tesina se enfocara solo en las fibras de acero obtenidas del reciclado de llantas.

1.1 Definición de fibras

La norma ASTM-C-1116 define a las fibras como: “Filamentos finos y elongados en forma de manojos, mallas o trenzas de algún material natural o manufacturado que pueda ser distribuido a través de una mezcla de concreto fresco.”

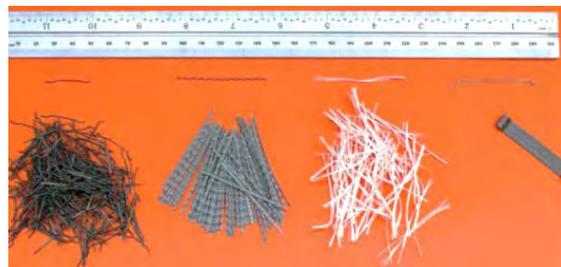


Fig. 1.1 – Diferentes tipos de Fibras. (SIKA – Fibras)

1.2 Clasificación de fibras

El reporte 544.1R del ACI considera cuatro tipos de fibras en función de la materia prima, estas son:

- Fibras naturales: también son llamadas fibras no procesadas. Como su nombre lo indica, estas fibras son creadas por la naturaleza, la principal ventaja de utilizar esta fibra es la fabricación de estructuras económicas. Algunas de estas fibras provienen del gabazo de caña de azúcar, coco, sisal, palma o plátano.
- Fibras sintéticas: son el resultado del desarrollo de la petroquímica y de la industria textil, estas fibras se generan a partir de derivados poliméricos orgánicos. Existe una división de las fibras sintéticas dependiendo de su diámetro, las fibras microsintéticas tienen diámetros menores a 0.3 mm. y las fibras macrosintéticas tienen un diámetro mayor a 0.3 mm.
Las principales fibras sintéticas son: acrílico, aramida, carbón, nylon, poliéster, polietileno y polipropileno.
- Fibras de vidrio: están fabricadas principalmente de sílice y pequeñas cantidades de otros componentes. El inconveniente de utilizar fibra de vidrio en el concreto es el fenómeno del álcali-sílice (álcali-agregado). Las fibras de vidrio deben contener un porcentaje mínimo de circonio, aproximadamente del 16% para considerarse alcalino-resistentes.
- Fibras metálicas: son secciones discretas de acero bajo en carbono o acero inoxidable, su forma puede ser variada para mejorar el contacto entre fibra y cementante.

1.3 Fibras de acero

Las fibras de acero son definidas como: “fibras cortas de acero, de longitud discreta con una relación de aspecto (longitud/diámetro) entre 20 y 100, con secciones transversales variadas y lo suficientemente pequeñas para ser esparcidas aleatoriamente en una mezcla de concreto sin endurecer utilizando procedimientos de mezclado comunes.” (ACI-544.1R, 1996).

La norma ASTM-A-820 clasifica a las fibras de acero en cuatro tipos generales dependiendo del proceso de fabricación, estos son:

- Tipo I – Fibras de alambre estirados en frio.
- Tipo II – Fibras cortadas de chapas.
- Tipo III – Fibras extraídas de fundición.
- Tipo IV – Otras fibras.

Las fibras de acero deben ser suficientemente pequeñas para poder distribuirse sin problemas en la mezcla de concreto, sin importar el método de inclusión (manual o mecánico).

La forma longitudinal de la fibra es importante para la conexión fibra-mezcla, su forma puede ser recta, ondulada (irregular) o con dobleces en los extremos, mientras que la sección transversal puede ser circular, rectangular o variada.

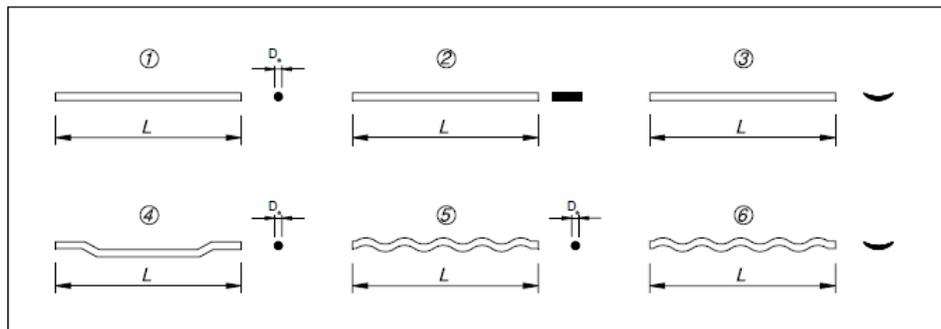


Fig. 1.2 - Ejemplos de diferentes secciones de fibras metálicas. (Maccaferri)

Las fibras de acero deformadas y onduladas se fabrican de esta forma para mejorar la adherencia mecánica con el concreto.

Las fibras se pueden conseguir en dos tipos de presentación, individuales o unidas entre sí (en forma de peine). La ventaja de utilizar fibras unidas es facilitar su manipulación y al momento del mezclado éstas se logran separar en fibras individuales generando una mejor dispersión.

Las fibras de acero están caracterizadas geométricamente por su forma, longitud y diámetro. Una propiedad importante de las fibras es la relación de aspecto la cual se obtiene al dividir la longitud entre su diámetro (L/D).

La relación de aspecto de las fibras de acero por lo general está en un rango entre 20 y 100, con longitudes de 6.4 a 76 mm, mientras que el diámetro común está en el rango de 0.5 a 1.0 mm. (ACI-544.1R, 1996).



Fig. 1.3 - Fibras de acero Dramix con dobleces en los extremos.

La cantidad de fibra añadida al concreto puede calcularse en fracción volumen (V_f) o en dosificación (kg/m^3).

La fracción volumen (V_f), se calcula como el cociente de la dosificación de fibra (D_f) en kg/m^3 entre la densidad del acero (γ_s), la cual es igual a $7850 \text{ kg}/\text{m}^3$ ($V_f = D_f/\gamma_s$), la fracción volumen se puede expresar en fracción o en porcentaje (Gallo Lina P. et al., 2013).

La fibra de acero comúnmente se utiliza entre 0.2 a 1% de fracción volumen, esta dosificación equivale de 15 a $78 \text{ kg}/\text{m}^3$ aproximadamente, algunas veces se añade un porcentaje mayor dependiendo de la aplicación. Por ejemplo, se utiliza más del 2% de fracción volumen para aplicaciones en bóvedas y cajas fuertes. (ACI-544.3R, 2008)

De acuerdo con lo descrito en este subcapítulo, la fibra utilizada para la elaboración de los especímenes de ensayo estaría clasificada como fibra de acero con sección longitudinal irregular y sección transversal circular.

1.4 Concreto reforzado con fibra de acero (CRFA)

El “American Concrete Institute” (ACI) en el reporte 544.1R define al Concreto Reforzado con Fibra de Acero (CRFA) como un concreto hecho de cemento hidráulico con contenido de agregados finos y gruesos y fibras de acero discretas discontinuas.

La resistencia, rigidez y capacidad de adherencia de las fibras son características importantes para el concreto reforzado con fibras, la resistencia depende del material de fabricación de la fibra, la rigidez de la forma transversal, mientras que la adherencia depende principalmente de la relación de aspecto.

Las fibras de acero con mayor resistencia a la extracción se fabrican con un perfil ondulado, superficie deformada o con dobleces en los extremos, este tipo de fibras producen un anclaje superior a las fibras lisas.

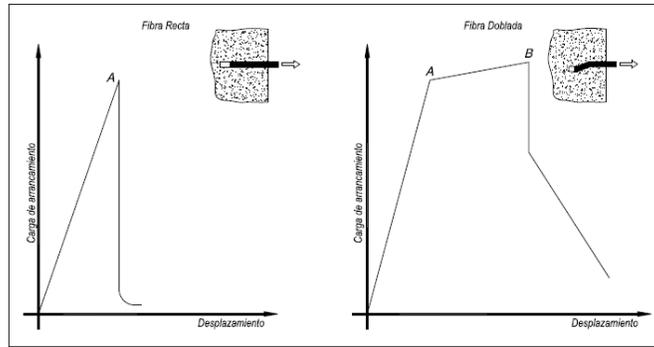


Fig. 1.4 – Incremento de la adherencia fibra-concreto con diferente forma de fibra. (Maccaferri)

En la figura anterior es posible observar el efecto de extracción de la fibra, para una fibra con diferente forma longitudinal a la fibra lisa producirá una mayor resistencia a la extracción. Las fibras con mejor anclaje fallaran principalmente por ruptura para un esfuerzo alto de tensión.

Las fibras de acero están protegidas contra la corrosión por la mezcla cementante. Al colocar el concreto de manera adecuada, se presentara poca y nula corrosión en las fibras de acero. Cualquier corrosión de las fibras en la superficie del concreto será solamente un problema de apariencia.

1.5 Propiedades físicas y mecánicas del CRFA

Con la adición de fibras de acero al concreto se obtiene un nuevo material, modificando sus propiedades físicas y mecánicas.

1.5.1 Propiedades físicas

Una característica que cambia al utilizar fibra de acero es la trabajabilidad del concreto, al añadir fibras al concreto existirá una disminución en la medida de revenimiento, la cual está en función de la relación de aspecto y la cantidad de fibra añadida.

Muchas investigaciones han mostrado que el uso de fibras con una relación de aspecto mayor a 100 generalmente causa trabajabilidad inadecuada y distribución de fibras no uniforme (ACI-544.4R, 1999).

Cuando se utiliza aproximadamente más de 0.33% de fracción volumen de fibra de acero serán requeridos algunos ajustes en el diseño del concreto. El efecto de pérdida de revenimiento puede ser reducido por aditivos químicos, como por ejemplo el reductor de agua de alto rango, al utilizarlo incrementara el revenimiento del CRFA.

El agrietamiento por contracción plástica es un problema en el concreto fresco, es causada por los cambios repentinos en la temperatura y humedad lo cual resulta en la evaporación del agua en la superficie del concreto antes de que haya fraguado. El agrietamiento del concreto a pesar de ser antiestético también afecta su durabilidad.

Uno de los métodos para reducir el efecto del agrietamiento por contracción plástica del concreto es por medio del reforzamiento del concreto con pequeñas fibras distribuidas aleatoriamente. La relación de aspecto no influye significativamente en las fisuración total del concreto, mientras que el factor efectivo es el volumen de fibras crítico de 1.5% para reducir la longitud total de fisuras en el concreto (Özgür E. y Khaled M., 2010).

1.5.2 Propiedades mecánicas

1.5.2.1 Resistencia a compresión

El comité 544.1R del ACI menciona que al adicionar fibras de acero en el concreto el resultado de la resistencia a compresión es variable, puede llegar a aumentar en un rango de 0 a 15% para un porcentaje mayor al 1.5% de fracción volumen de fibra.

Aunque el incremento de la resistencia a compresión es variable se han registrado incrementos del 23% para CRFA con una fracción volumen de fibra del 2%, una relación de aspecto de 100 y un tamaño máximo de agregado de $\frac{3}{4}$ in. (19 mm.), estas pruebas se realizaron en cilindros de 150 x 300 mm.

En la siguiente figura se muestran curvas de esfuerzo a compresión para concretos con diferentes cantidades de fibra de acero.

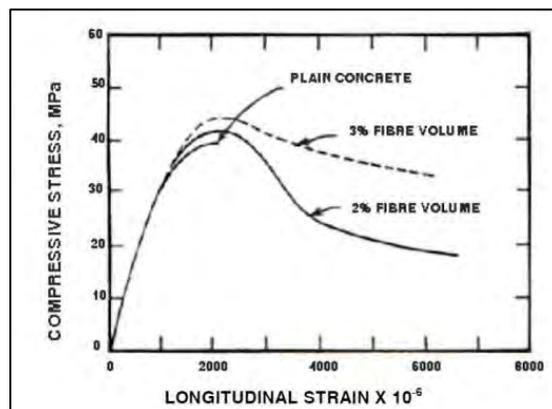


Fig. 1.5 – Curvas de esfuerzo a compresión de CRFA. (Nguyen Van)

1.5.2.2 Resistencia a tensión directa

El comportamiento de tensión directa en el CRFA aumenta considerablemente dependiendo la cantidad, relación de aspecto y orientación de las fibras añadidas a la mezcla.

En tensión directa, el aumento de la resistencia es importante, con incrementos del orden entre 30% al 40% para adiciones del 1.5% de fracción volumen de fibra en morteros y concretos (ACI-544.1R, 1996).

Un aspecto importante es la posición de las fibras en la mezcla, con fibras alineadas en dirección a la tensión es posible generar un mayor incremento en la resistencia, mientras que para fibras distribuidas aleatoriamente en el concreto puede generar un incremento menor o inclusive nulo.

En la siguiente figura se puede observar el incremento en porcentaje de la tensión directa para CRFA variando la cantidad de fibra y su relación de aspecto.

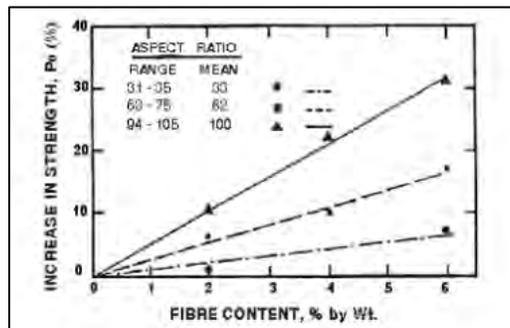


Fig. 1.6 – Influencia del contenido de fibra en el esfuerzo a tensión. (Nguyen Van)

1.5.2.3 Resistencia a flexión

La influencia de las fibras de acero en el concreto es mayor en el esfuerzo a flexión que en el esfuerzo a compresión y tensión.

Al añadir fibras de acero al concreto aumenta el esfuerzo a flexión, este aumento varía dependiendo la relación de aspecto y volumen de fibra utilizada.

Aunque estudios recientes demostraron que el esfuerzo a flexión puede aumentar a más del doble utilizando alrededor de un 4% de fracción volumen de fibra en morteros, ahora se sabe que en el concreto la presencia de agregado grueso con mezclado común y precauciones en su colocación limitan el máximo volumen práctico de fibra añadido al concreto en un rango del 1.5% al 2% (ACI-544.1R, 1996).

En el reporte ACI-544.3R se menciona que el agregado grueso mayor a 19 mm. no es recomendado para el CRFA.

El reporte ACI 544.1R hace referencia una recopilación de datos de esfuerzos a flexión que muestran que el esfuerzo a flexión del CRFA es alrededor de 50% a 70% mayor que el concreto simple en la prueba estándar a flexión.

La prueba estándar a flexión para concretos reforzados con fibra se basa en las recomendaciones del ASTM-C-1609 en el cual se obtiene el esfuerzo a flexión y esfuerzos residuales para distintas magnitudes de la deflexión creada por el ensayo.

Esta prueba se realiza sobre una viga con medidas determinadas y dos cargas aplicadas en el tercio central del claro, generando una comparación entre carga-deflexión de la viga ensayada.

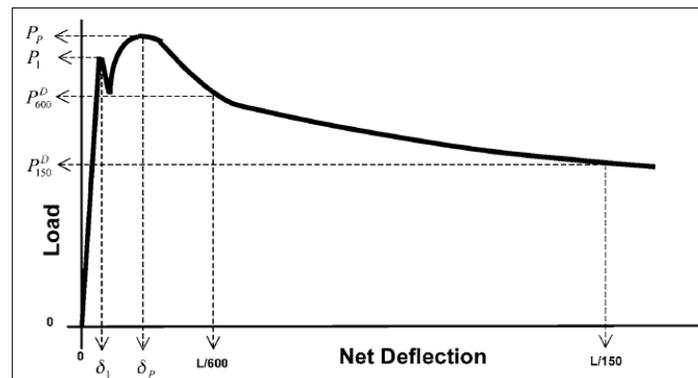


Fig. 1.7 – Ejemplo de grafica carga-deflexión. (ASTM-1609)

En la figura anterior se puede observar la carga P_1 que genera la primera grieta a flexión y la carga máxima obtenida (P_p) que se genera cuando se alcanza el esfuerzo ultimo de flexión o también llamado módulo de ruptura.

1.6 Aplicaciones del concreto reforzado con fibra de acero

Investigaciones sobre alambres y fibras metálicas entre los años 1950 y 1960 fueron la base para el concreto reforzado con fibras de acero. A mediados de 1960 las aplicaciones que tenía el CRFA eran principalmente la construcción de calles y losas de piso. En 1971, E.U.A. utilizó por primera vez el CRFA en pavimentos sobre una estación para pesaje de camiones de carga.

La funcionalidad del CRFA ha ido en aumento gracias a los nuevos desarrollos en el área del concreto.

A continuación se mencionaran algunas aplicaciones del CRFA.

1.6.1 Revestimiento de túneles

Las fibras de acero agregadas al concreto ayudan a mejorar el revestimiento de túneles, el CRFA es aplicado como concreto lanzado. Con una adecuada dosificación y una correcta selección del tipo de fibra a emplear en el concreto lanzado, es posible sustituir la malla electro-soldada por las fibras de acero.

Al utilizar concreto lanzado reforzado con fibra de acero sobre las paredes de los túneles se podrá generar un espesor constante lo cual no se conseguiría usando concreto lanzado reforzado con malla electro-soldada.

La aplicación de CRFA en túneles aumenta la eficiencia en el proceso de revestimiento.

1.6.2 Pavimentos y pisos

En los pavimentos y pisos industriales se puede sustituir el refuerzo convencional (malla electro-soldada) por fibra de acero.

Cuando se utiliza CRFA los esfuerzos de tensión y flexión se distribuyen en toda la estructura del pavimento o piso y son soportados con mayor eficiencia debido a que se crea un refuerzo tridimensional en comparación cuando se utiliza malla electro-soldada que solamente genera un refuerzo bidimensional en la estructura.

Con una adecuada dosificación y distribución de las fibras es posible aumentar la distancia entre las juntas de control de losas y pavimentos.

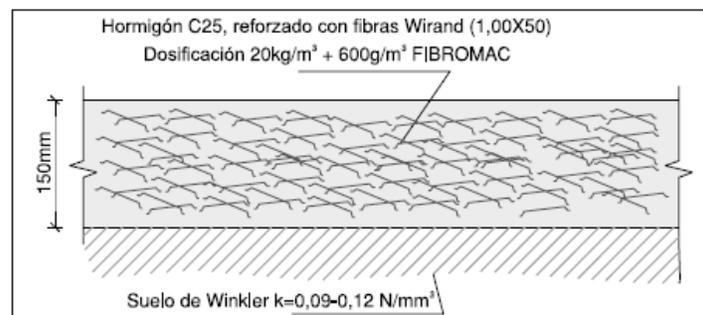


Fig. 1.8 – Losa de concreto fibro-reforzada. (Maccaferri)

1.6.3 Elementos prefabricados

Las fibras se pueden aplicar para la construcción de durmientes prefabricados de concreto para rieles de ferrocarril.

El uso de CRFA también está presente en la construcción de dovelas prefabricadas utilizadas para el revestimiento de túneles, las dovelas son colocadas con la ayuda de máquinas excavadoras automatizadas.

Aunque las fibras de acero no sustituyen por completo el refuerzo tradicional, es posible disminuirlo en gran medida. Al emplear fibras de acero mejora la durabilidad del concreto y también disminuye el tiempo de construcción de elementos prefabricados.

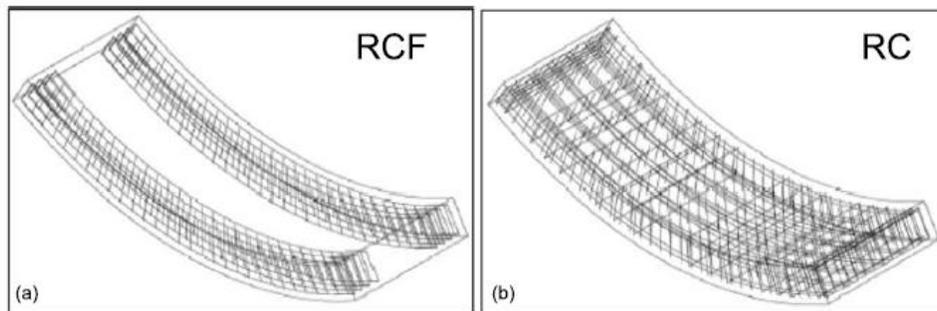


Fig. 1.9 – Comparativa estructural de dovelas construidas con CRFA y concreto reforzado. (Maccaferri)

Capítulo 2. La Llanta (neumático)

La rueda es uno de los inventos más importantes de la historia, desde su invención ha generado un importante desarrollo en la humanidad, la rueda es una herramienta que ayuda a reducir el esfuerzo al transportar cargas sobre el terreno o superficie.

En un principio las ruedas se construían de piedra o madera, posteriormente se construyeron de metal para hacerlas más resistentes y duraderas. En la actualidad la rueda se convirtió a lo que hoy conocemos como llanta o neumático (ANDELLAC, ANILLAC y CNIH, 2013).

La llanta o neumático es una pieza de forma toroidal, construida a partir de caucho, fibra textil y acero, la llanta se coloca en las ruedas de vehículos para permitirle un adecuado contacto con la superficie donde transite.

Las modificaciones en el método de fabricación y el cambio de materiales de la llanta han mejorado en todos los aspectos su funcionalidad. Las llantas ahora tienen mayor durabilidad y resistencia, también ha mejorado su confort durante el transporte y facilidad para su reemplazo.

2.1 Estructura de la llanta¹



Fig. 2.1 - Estructura de una llanta. (Michelin)

1. Revestimiento de goma interior: Es una capa de caucho sintético estanca al aire. Esta capa se encuentra en el interior del neumático y hace la función de cámara de aire.

2. Carcasa: Es una estructura flexible formada por hilos (textiles o de acero) embebidos en goma, que forman arcos rectos y se enrollan en el aro del talón del neumático. Sobre la carcasa se colocan el resto de lonas y capas de goma que conforman el neumático.

¹ Recuperado de www.michelin.es/neumaticos/consejos/todo-sobre-el-neumatico/como-es-un-neumatico

Sus funciones son:

- Soportar la carga y la velocidad con ayuda de la presión.
- Participar en la estabilidad y el confort.
- Participar en el rendimiento y eficiencia energética de la cubierta.

En una carcasa de neumático de coche, existen unos 1400 cables, cada uno de ellos puede resistir una fuerza de 15 kg.

3. Zona baja: Tiene la función de transmitir la potencia del vehículo en la aceleración y en la frenada de la llanta hacia la zona de contacto con el suelo.

4. Aro de talón: Es la parte de la cubierta que se fija y ajusta a la llanta. Está formado por un cable de acero inextensible, de forma y proporción variable según la dimensión y tipo de neumático.

En él se enrolla la lona carcasa. Sus funciones son:

- Realizar la estanqueidad del neumático.
- Transmitir el par motor (la potencia del motor del vehículo) en los esfuerzos de aceleración y frenada.

Un aro puede soportar hasta 1800 kg sin riesgo de rotura.

5. Flanco: Es la zona comprendida entre la banda de rodadura y los talones de la cubierta. El flanco representa la altura de la cubierta. Sus funciones son:

- Soportar la carga.
- Soportar las constantes flexiones mecánicas.
- Resistencia a los roces y a las agresiones.
- Participar en la estabilidad y en el confort.

6 y 7. Lonas de cima: Están constituidas por cables metálicos revestidos de goma. Se posicionan sobre la carcasa formando un cinturón que garantiza la resistencia mecánica del neumático a la velocidad y a la fuerza centrífuga.

Las lonas que forman el cinturón se cruzan oblicuamente y se pegan una encima de la otra. El cruce de sus hilos con los de la carcasa forma triángulos indeformables, que garantizan la rigidez de la cima.

8. Banda de rodadura: es la parte del neumático que está en contacto con el suelo y está formada por una capa de goma en la que se realizan una serie de ranuras que dan origen al dibujo o escultura.

Sus funciones son:

- Proporcionar la adherencia (agarre) en suelo seco y mojado.
- Duración y resistencia al desgaste y a las agresiones.
- Participar en la baja resistencia a la rodadura.
- Participar en el confort acústico (sonoridad en el rodaje).
- Participar en la direccionabilidad y manejabilidad del vehículo.

2.2 Características de la llanta de desecho

La función de la llanta es transmitir las fuerzas que detienen, aceleran y guían a un vehículo al soportar su carga, también deben absorber la energía al rodar sobre las irregularidades del camino, por estas y otras funciones de la llanta es que se produce su desgaste hasta un punto de ser considerado como material de desecho.

Características de una llanta de desecho (SEMARNAT, s.f.):

- Llantas de todos los diámetros que hay en el mercado, que han dejado de ser útiles por haber perdido o disminuido sus funciones principales para las cuales fueron diseñadas.
- Se contemplan como residuos de llantas las incompletas o pedazos que ya no tengan un uso útil en la sociedad.
- Fueron reemplazadas en su lugar de origen por considerarse inseguras o de desecho.
- Residuo con una alta resistencia a la biodegradación natural.
- Cuando se queman, se generan emisiones de gases tóxicos.
- Tienen la capacidad de almacenar agua en su interior, lo cual ofrece condiciones adecuadas a la generación y propagación de plagas nocivas.
- Residuo incapaz de desechar en forma natural el agua que pueda captar, solo lo puede hacer por medio de prácticas manuales.

2.3 La llanta como fuente de contaminación

En México el problema de contaminación por vehículos es importante, no solamente por la generación de gases tóxicos transmitidos al aire o por los aceites que contaminan el suelo, también por las refacciones desechadas del vehículo.

Actualmente en la CDMX se está controlando la emisión de gases producidos por los automóviles con la ayuda de programas de circulación y verificaciones vehiculares, pero falta regular y controlar la disposición final de las llantas de desecho.

La Cámara Nacional de la Industria Hulera (C.N.I.H.), estimo que en el 2002 se generaban en la República Mexicana aproximadamente 25 millones de llantas promedio anual, de las cuales el 23% de estas estuvieron destinadas al Distrito Federal. La misma Cámara estimo que el 91% de todas las llantas usadas proceden de coches o camionetas y camiones pesados, el 9% restante son llantas especiales para motocicletas, aviones, equipo de construcción y otros vehículos (SMADF, 2002).

La Cámara Nacional de la Industria Hulera estimo una generación de 5,500,000 llantas usadas en el Distrito Federal, considerando los vehículos particulares y especiales. Por tanto, se puede considerar que la misma cantidad es desechada de manera anual por efecto del uso de las mismas (SMADF, 2002).

La Asociación Nacional de Distribuidores de Llantas y Plantas Renovadoras A.C. (ANDELLAC) valoro en el 2002 que del total de las llantas desechadas en México:

- 5% es renovado
- 2% se utiliza en generación de energía
- 2% se deposita en centros de acopio autorizados
- 91% se abandonan o se utilizan sin control

La necesidad de desarrollar materiales para llantas más resistentes a la fricción, temperatura y factores climáticos ha creado un problema importante para el medio ambiente, debido a que la llanta tienen una lenta degradación.

Los tiraderos de llantas de desecho imponen riesgos significativos tanto para el ambiente como para la salud pública. Los tiraderos de llantas crean ambientes propicios para la proliferación de mosquitos, roedores y otros vectores de enfermedades que potencialmente pueden aumentar la incidencia de malaria, dengue y enfermedades encefálicas como el virus del Nilo. Además, los incendios de tiraderos de llantas son difíciles de extinguir y pueden arder por meses, emitiendo humos nocivos y generando líquidos que contaminan el suelo, aguas superficiales y acuíferos (SEMARNAT & EPA, 2011).

Por estas razones es importante tener un control sobre las llantas desechadas, eliminar los tiraderos de llantas clandestinos y generar un programa de reciclaje de llantas de desecho.

2.4 Reciclaje de llantas

La finalidad es evitar la creación y crecimiento de los tiraderos de llantas, para esto el reciclaje de llantas es una alternativa para controlar la cantidad de llantas de desecho.

Actualmente existen varios métodos para reutilizar los materiales de la llanta, algunos ejemplos son la tritución mecánica, la tritución criogénica, la renovación y el sistema de pirolisis. El método más utilizado para reciclar la llanta es la tritución mecánica.

Tritución Mecánica: consiste en romper la llanta mecánicamente en partículas pequeñas. El acero es retirado por medio de un separador magnético; los componentes de fibra o textil son separados por clasificadores neumáticos u otro equipo de separación, estos sistemas tienen un alto desempeño y pueden producir caucho de costo relativamente bajo (SMADF, 2002).

Los materiales conseguidos por la tritución son los mismos para cualquier tipo de llanta (llantas de automóviles, motocicletas, camiones, etc.), solamente cambia el porcentaje de material contenido en una llanta.

Los materiales obtenidos de la llanta por tritución mecánica son; alambres de acero, hule (caucho) y fibras textiles. Estos materiales pueden ser reutilizados en diferentes aplicaciones por ejemplo:

- Llancreto de Cemex: Se utiliza residuo de llanta triturada para la elaboración de pavimento, es ideal para construir estacionamientos de tránsito ligero, banquetas, andadores o parques.
- Impermeabilizante: Elaborado con resinas acrílicas, reforzado con partículas de caucho vulcanizado reciclado, indestructible, con gran capacidad impermeable y resistencia al medio ambiente (ANDELLAC, ANILLAC y CNIH, 2013).
- Elaboración de pisos: El caucho de llanta triturada se combina con resinas, y al aplicarle una temperatura y presión apropiadas dentro de moldes se puede obtener placas de caucho con diferentes resistencias, este material es utilizado como adoquín, para pistas atléticas, gimnasios y áreas infantiles.

Capítulo 3. Etapa experimental

Para la elaboración de este trabajo se realizó una etapa experimental con el fin de estudiar el concreto con fibras de acero obtenidas del reciclaje de llantas. Todos los trabajos se efectuaron en las instalaciones del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería.

3.1 Materiales utilizados

Se mencionaran los materiales empleados para la elaboración de la mezcla y fabricación de los especímenes de concreto reforzado con fibra de acero obtenida del reciclado de llantas.

3.1.1 Fibras de acero

El acero se consiguió de una planta recicladora de llantas, la muestra de acero recibida tiene un peso de 2.813 kg. la muestra además de contener fibras de acero también contiene pequeñas cantidades de material textil y hule (caucho).

Las fibras de acero de la muestra tienen dos diámetros diferentes, éstas se distinguirán por fibra gruesa y fibra delgada. La separación de los materiales se realizó manualmente, de esta manera se pudo conseguir la fibra delgada la cual se añadirá al concreto.

En las siguientes imágenes se muestran la fibra delgada, fibra gruesa y desecho (material textil y hule).



Tabla 3.1 – Fibras y desecho separados.

Una vez separados los materiales se pesaron, (como se puede observar en la siguiente tabla) se genero una perdida de material en el proceso de separacion, aun asi, el porcentaje de fibra obtenida tanto delgada como gruesa es alto, sumando un 88.27% de ambas fibras.

| | Fibra [gr.] | % |
|---------------|-------------|--------|
| Fibra Delgada | 1,746 | 62,07% |
| Fibra Gruesa | 0,737 | 26,20% |
| Desecho | 0,280 | 9,95% |
| Pérdida | 0,050 | 1,78% |
| Total | 2,813 | 100% |

Tabla 3.2 – Peso y porcentaje de fibras.

La fibra utilizada tiene sección longitudinal irregular mientras que la sección transversal es circular y constante, por lo tanto, la relación de aspecto es variable, a diferencia de las fibras comerciales.

Por la explicación anterior, solamente se obtuvo una relación de aspecto y longitud representativos, las dimensiones se consiguieron de un promedio de 20 fibras escogidas aleatoriamente.

| No. Fibra | Long. [mm] | Diam. [mm] | $\lambda=L/D$ |
|-----------|------------|------------|---------------|
| 1 | 24 | 0.3 | 80.0 |
| 2 | 36 | 0.3 | 120.0 |
| 3 | 32 | 0.3 | 106.7 |
| 4 | 51 | 0.3 | 170.0 |
| 5 | 64 | 0.3 | 213.3 |
| 6 | 41 | 0.3 | 136.7 |
| 7 | 47 | 0.3 | 156.7 |
| 8 | 41 | 0.3 | 136.7 |
| 9 | 52 | 0.3 | 173.3 |
| 10 | 42 | 0.3 | 140.0 |
| 11 | 25 | 0.3 | 83.3 |
| 12 | 31 | 0.3 | 103.3 |
| 13 | 67 | 0.3 | 223.3 |
| 14 | 21 | 0.3 | 70.0 |
| 15 | 36 | 0.3 | 120.0 |
| 16 | 53 | 0.3 | 176.7 |
| 17 | 24 | 0.3 | 80.0 |
| 18 | 27 | 0.3 | 90.0 |
| 19 | 35 | 0.3 | 116.7 |
| 20 | 28 | 0.3 | 93.3 |
| | 38.85 | | 129.5 |

Tabla 3.3 – Relación de aspecto representativa de la fibra utilizada.

La longitud y relación de aspecto promedio fueron de 38.85 y 129.5 mm. respectivamente, la longitud está dentro del rango (6.4 a 76 mm.) establecido por el ACI, mientras que la relación de aspecto sobrepasa el máximo recomendado que es de 100.

3.1.2 Cemento

Se utilizó cemento Portland compuesto resistente a sulfatos (CPC-30-RS), este cemento cumple con lo establecido por la norma oficial mexicana NMX-C-414-ONNCCE.

3.1.3 Agua

La norma oficial NMX-C-122-ONNCCE tiene establecidas las cantidades máximas permitidas de las impurezas en el agua para mezclado en la elaboración del concreto.

Para la fabricación del concreto se utilizó agua potable tomada directamente de la red de suministro de Ciudad Universitaria.

3.1.4 Agregados

Los agregados fueron conseguidos de una casa de materiales, fue necesario determinar sus características físicas para poder diseñar la mezcla de concreto adecuada. A continuación se muestran las propiedades obtenidas de la grava y arena.

| Característica | Arena | Grava |
|---|-------|-------|
| Absorción [%] | 7,52% | 1,29% |
| Densidad | 2,31 | 2,34 |
| Peso volumétrico seco compactado [kg/m ³] | - | 1331 |
| Módulo de finura | 2,8 | - |

Tabla 3.4 – Propiedades del agregado grueso y fino.

3.1.5 Moldes

Para la fabricación de los especímenes se utilizaron moldes cilíndricos y prismas rectangulares, los moldes cumplen con la norma NMX-C-160-ONNCCE.

El molde cilíndrico cumple con la altura y diámetro establecidos en la norma, 300 mm y 150 mm respectivamente, la relación del diámetro entre la altura debe ser de 0.5.

Los moldes rectangulares utilizados tienen las siguientes medidas; 150 mm. de ancho, 150 mm. de altura y 600 mm. de largo.

En la siguiente tabla se muestran las medidas y volumen de los moldes utilizados.

| Tipo de molde | Medidas [cm] | Volumen [L.] |
|---------------|--------------|--------------|
| Cilindro | 15 x 30 | 5.301 |
| Prisma | 15 x 15 x 60 | 13.5 |

Tabla 3.5 - Datos de los moldes

La preparación de los moldes solamente fue de limpieza y aplicar una ligera capa de aceite para facilitar el desmolde de los especímenes.



Fig. 3.1 – Moldes utilizados.

3.2 Diseño de mezcla

La mezcla fue diseñada con las recomendaciones del comité 211.1 del American Concrete Institute, el diseño se realizó por el método de Volumen Absoluto.

La mezcla patrón fue diseñada en laboratorio para obtener una resistencia de 250 kg/cm^2 , un revenimiento de 7.5 cm, una relación agua-cemento de 0.6 y con tamaño máximo de agregado grueso de 19 mm. (3/4").

El contenido de humedad de los agregados fue considerado al realizar el diseño de la mezcla, una vez obtenidas las propiedades se hicieron las correcciones reajustando las cantidades de agregados y el agua de mezcla.

| Dosificación de mezcla patrón | | |
|-------------------------------|------|-------------------|
| Agua= | 255 | kg/m ³ |
| Cemento= | 342 | kg/m ³ |
| Grava= | 829 | kg/m ³ |
| Arena= | 737 | kg/m ³ |
| | 2163 | kg/m ³ |

Tabla 3.6 – Proporción de materiales para mezcla patrón (1 m³).

Se fabricaron 3 mezclas de las cuales una no tendrá fibra de acero (M-1) y las dos restantes si tendrán fibra de acero pero con diferente proporción (M-2 y M-3), en la siguiente tabla se muestra la cantidad de concreto fabricado para cada mezcla y su respectiva cantidad de fibra de acero.

| Mezcla | Cantidad [m ³] | Agua [Kg] | Cemento [Kg] | Grava [Kg] | Arena [kg] | Fibra [kg] |
|--------|----------------------------|-----------|--------------|------------|------------|------------|
| M-1 | 0.034 | 8.67 | 11.62 | 28.18 | 25.05 | 0 |
| M-2 | 0.062 | 15.81 | 21.20 | 51.39 | 45.69 | 0.308 |
| M-3 | 0.062 | 15.81 | 21.20 | 51.39 | 45.69 | 0.554 |

Tabla 3.7 - Cantidad de material para cada mezcla.

En las cantidades está incluido el porcentaje de desperdicio o merma, que en este caso se consideró del 15%.

3.3 Fabricación de las mezclas

Las mezclas fueron fabricadas cada una por separado, para el mezclado de los materiales se utilizó una revolvedora mecánica con capacidad de 100 litros.



Fig. 3.2 – Revolvedora mecánica.

A continuación se describirá el procedimiento de fabricación de las mezclas.

- a) El primer paso fue el diseñar la mezcla patrón con la corrección del contenido de humedad.
- b) Una vez obtenida la cantidad de materiales para la fabricación de la mezcla, se procedió a pesar todos de los materiales de forma individual, tomando en cuenta la dosificación mostrada en la tabla 3.7.



Fig. 3.3 - Materiales

- c) En la revolvedora se colocaron los materiales de acuerdo al siguiente orden; primero fue colocada la grava y arena, después se añadió solamente el agua de absorción para saturar los agregados y se mezcló durante tres minutos para homogeneizar los agregados.
- d) Después de mezclar los agregados se añadió el cemento y el agua restante en la revolvedora, y se continuó con el mezclado por tres minutos más.
- e) Al terminar el mezclado anterior se detuvo la revolvedora por un tiempo de dos minutos para romper el fraguado falso y se colocó una jerga húmeda tapando la revolvedora (fig. 3.4) para evitar la pérdida de humedad.



Fig. 3.4 - Reposo de mezcla

- f) Por último se reinició el mezclado por dos minutos más.

- g) Para las mezclas con fibra de acero, las fibras se agregan durante los dos últimos minutos de mezclado, la fibra se añadió lentamente tratando de distribuirla en toda la mezcla y evitando arrojarla en conjunto.



Fig. 3.5 – Adición de fibras

La fabricación de las mezclas finalizo al obtener su revenimiento, el procedimiento para obtener el reveimiento se realizo siguiendo las indicaciones de la norma NMX-C-156-ONNCCE.

Para realizar este procedimiento se requiere de lo siguiente:

- Molde o cono de abraham: Molde de metal o cualquier otro material no absorbente con forma de cono truncado de 20 cm. en su diametro mayor, 10 cm. en su diametro menor y 30 cm. de altura.
- Varilla: Barra de acero de seccion circular, recta, lisa de 16 mm. de diametro y arroximadamente de 600 mm. de longitud, uno de sus extremos debe tener forma semiesferica.
- Materiales auxiliares: pala, cucharon y escala numerica.



Fig. 3.6 – Prueba de revenimiento.

El revenimiento de cada mezcla fabricada se muestra en la siguiente tabla.

| | Mezcla M-1 | Mezcla M-2 | Mezcla M-3 |
|-------------------|------------|------------|------------|
| Revenimiento (cm) | 8.0 | 7.0 | 4.5 |

Tabla 3.8 – Revenimiento de mezclas.

3.4 Elaboración de los especímenes

A continuación se describirá el colado de los especímenes.

Para los cilindros, el llenado de los moldes se realizó en tres capas con espesores de aproximadamente 10 cm cada una. Cada capa se varillo con 25 penetraciones y también se golpeó con el mazo de hule para eliminar las oquedades del espécimen.



Fig. 3.7 – Elaboración de cilindro

Para las vigas, el llenado de los moldes rectangulares se realizó en dos capas, cada capa se varillo con aproximadamente 90 penetraciones distribuidos en toda el área superior de la capa de concreto y también se efectuaron los golpes al molde eliminando los vacíos.



Fig. 3.8 – Elaboración de viga.

Para la compactación de los especímenes se utilizó una varilla lisa de acero y un mazo de hule con las especificaciones adecuadas para realizar este procedimiento.

Después de la compactación de los especímenes se realizó el enrase de cada uno de ellos, generando una superficie plana y uniforme.

El tiempo requerido para el llenado de los moldes fue aproximadamente de 5 minutos para el molde rectangular y de 3 minutos para el molde cilíndrico.



Fig. 3.9 – Especímenes recién fabricados

3.5 Desmolde y curado de los especímenes

A las 24 horas después de haber fabricado los especímenes se desmoldaron, el desmolde se facilitó por la aplicación de aceite en las paredes internas del molde. Los especímenes se marcaron con su respectivo identificador y fecha de elaboración.



Fig. 3.10 - Especímenes desmoldados y marcados.

Los especímenes fueron colocados en la cámara de curado a una temperatura de 22°C y se mantuvieron dentro de la cámara por 28 días para después ser ensayados.



Fig. 3.11 - Especímenes en la cámara de curado.

3.6 Ensayos

3.6.1 Ensayo a compresión

Este ensayo se encuentra regido por la norma NMX-C-083-ONNCCE.

Los especímenes ensayados fueron cilindros de 15 x 30 cm, a estos cilindros se les aplicó una carga de forma axial para conocer su resistencia máxima a compresión.

Se fabricaron un total de 13 cilindros para ensayos a compresión, tres cilindros fueron fabricados sin fibra y los diez restantes fueron fabricados con fibra.

Los ensayos a compresión se realizaron a los 28 días después de haber fabricado los especímenes. Los cilindros se retiraron de la cámara de curado e inmediatamente fueron colocándolos en la máquina para determinar su resistencia máxima a compresión.

A los cilindros no se les realizó un cabeceo con azufre, en lugar del cabeceo se utilizaron cabezales de metal con neopreno.



Fig. 3.12 – Cabezales de neopreno

Una vez alcanzada la carga máxima de rotura, se procede a calcular la resistencia a compresión de los especímenes, para esto se utiliza la siguiente ecuación.

$$F'c = \frac{P}{A}$$

Dónde:

$F'c$ = resistencia a compresion [kg/cm^2]

P = carga axial maxima aplicada al cilindro [kg]

A = area transversal del cilindro [cm^2]



Fig. 3.13 Ensayo a compresión.

3.6.2 Ensayo a flexión

El ensayo a flexión está basado en el procedimiento indicado de las recomendaciones del ASTM-C-1609. Para efectuar el ensayo se utilizaron especímenes de prisma rectangular o simplemente vigas de 150x150x600 mm, estas medidas cumplen con lo especificado en la recomendación antes mencionada.

Las vigas ensayadas fueron retiradas de la cámara de curado a los 28 días de su fabricación. La viga antes de ser ensayada debe marcarse con líneas de referencia a cada 15 cm dejando en los extremos una separación de 7.5 cm, como se muestra en la siguiente figura.

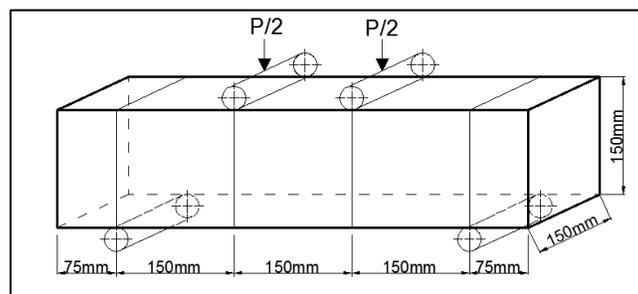


Fig. 3.14 – Esquema de ensayo a flexión

Los trazos dividen la parte central de la viga en tercios y servirán de referencia para colocar los rodillos de soporte y los rodillos de transferencia de carga.

La viga se debe montar sobre los rodillos de soporte después colocar los rodillos de transferencia de carga y por último se coloca el LVDT que medirá la deflexión de la viga, estará posicionado sobre la cara superior de la viga y al centro del claro.

Como se puede apreciar en la siguiente figura, los rodillos superiores de transferencia de carga se localizan en los extremos del tercio central y los rodillos de soporte se colocan en los extremos del claro marcado.



Fig. 3.15 – Ensayo de viga a flexión.

Para obtener el esfuerzo máximo de ruptura a flexión se utiliza la siguiente ecuación

$$f = \frac{P L}{b d^2}$$

Dónde:

$f =$ *esfuerzo de ruptura a flexion* [MPa]

$P =$ *carga* [N]

$L =$ *longitud entre apoyos* [m]

$b =$ *ancho promedio de la viga* [m]

$d =$ *altura promedio de la viga* [m]

Capítulo 4. Resultados

4.1 Resistencia a compresión

A continuación se presentan los resultados obtenidos de resistencia a compresión para cada una de las mezclas de concreto simple y CRFA.

La mezcla M-1 la cual no contiene fibras de acero, género un esfuerzo a compresión de 290 kg/cm².

Para la mezcla M-2 que contiene 5 kg/m³ de fibras de acero, registró un descenso del 3.1% en el esfuerzo a compresión en comparación con la mezcla M-1.

La mezcla M-3 con 9 kg/m³ de fibra de acero no presento cambio en el esfuerzo a compresión con respecto a la mezcla patrón (M-1).

| Cilindro | Carga Max. [kg] | Resistencia a Compresión [kg/cm ²] | Media [kg/cm ²] |
|----------|-----------------|--|-----------------------------|
| 1 | 46,799 | 265 | 290 |
| 2 | 52,976 | 300 | |
| 3 | 53,789 | 304 | |

Tabla 4.1 - Resultados de ensayo a compresión de la mezcla patrón, M-1 (sin fibra)

| Cilindro | Carga Max. [kg] | Resistencia a Compresión [kg/cm ²] | Media [kg/cm ²] |
|----------|-----------------|--|-----------------------------|
| 1 | 46,310 | 262 | 281 |
| 2 | 48,597 | 275 | |
| 3 | 50,173 | 284 | |
| 4 | 51,895 | 294 | |
| 5 | 51,102 | 289 | |

Tabla 4.2 - Resultados de ensayo a compresión de la mezcla M-2 (5 kg/m³)

| Cilindro | Carga Max. [kg] | Resistencia a Compresión [kg/cm ²] | Media [kg/cm ²] |
|----------|-----------------|--|-----------------------------|
| 1 | 50,797 | 287 | 290 |
| 2 | 55,738 | 315 | |
| 3 | 48,703 | 276 | |
| 4 | 52,002 | 294 | |
| 5 | 48,597 | 275 | |

Tabla 4.3 - Resultados de ensayo a compresión de la mezcla M-3 (9 kg/m³)

En la siguiente grafica se muestra una comparativa entre los valores medios obtenidos del esfuerzo a compresión de cada mezcla.

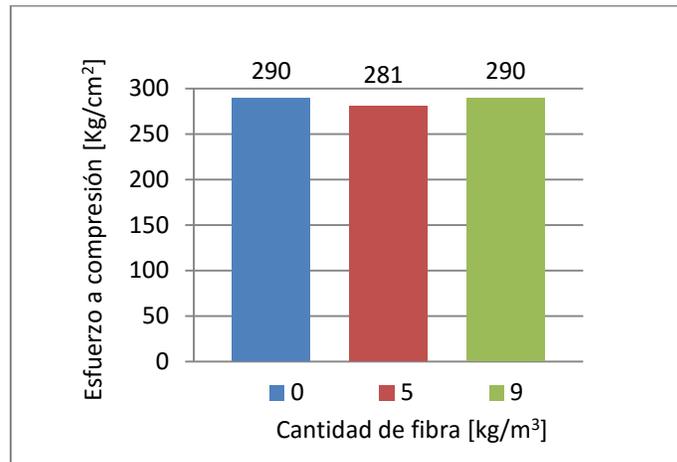


Fig. 4.1 – Comparativa de valores de resistencia a compresión.

Los cilindros ensayados produjeron una falla convencional a compresión, en donde la fisuración se presenta en la misma dirección que la fuerza axial.

Los cilindros fabricados con la mezcla patrón (M-1) que no contienen fibra, se desmoronaron al momento de fallar, mientras que los cilindros M-2 y M-3 que contienen 5 y 9 Kg/m³ de fibra respectivamente no se desmoronaron al fallar, los fragmentos de concreto fisurados se mantuvieron prácticamente en su misma posición sin caer.

| M-1 | M-2 | M-3 |
|---|---|--|
|  |  |  |
| Sin fibra | 5 kg/m ³ | 9 kg/m ³ |

Tabla 4.4 – Comparativa de cilindros después de ensayarlos a compresión.

4.2 Resistencia a flexión

A continuación se muestran los valores obtenidos de los ensayos a flexión.

La adición de fibras de acero en el concreto no aumentaron el módulo de ruptura, al contrario, éste disminuyó para las dos mezclas de CRFA.

El módulo de ruptura se redujo un 12.5% para la mezcla M-2 (5 kg/m^3) y un 11% para la mezcla M-3 (9 kg/m^3) comparándolo con el módulo de la mezcla M-1.

En las siguientes tablas se muestran las cargas máximas, flexión máxima y el módulo de ruptura para cada mezcla.

| Núm. Espécimen | Carga Máx. [Kg] | Flexión Max. [mm] | Mr. [kg/cm^2] | Mr. [Mpa] |
|----------------|-----------------|-------------------|--------------------------|-----------|
| 1 | 3,365 | 1.36 | 44.87 | 4.40 |

Tabla 4.5 – Resultados de ensayo a flexión mezcla patrón, M-1 (sin fibra)

| Núm. Espécimen | Carga Máx. [Kg] | Flexión Max. [mm] | Mr. [kg/cm^2] | Mr. [Mpa] |
|----------------|-----------------|-------------------|--------------------------|-----------|
| 1 | 2,976 | 1.93 | 39,68 | 3,89 |
| 2 | 2,915 | 1.35 | 38,87 | 3,81 |
| | Media | 1.64 | 39,28 | 3,85 |

Tabla 4.6 – Resultados de ensayo a flexión de la mezcla M-2 (5 kg/m^3)

| Núm. Espécimen | Carga Máx. [Kg] | Flexión Max. [mm] | Mr. [kg/cm^2] | Mr. [Mpa] |
|----------------|-----------------|-------------------|--------------------------|-----------|
| 1 | 2,975 | 1.17 | 39,73 | 3,90 |
| 2 | 3,010 | 1.23 | 40,13 | 3,94 |
| | Media | 1.20 | 39,93 | 3,92 |

Tabla 4.7 – Resultados de ensayo a flexión de la mezcla M-3 (9 kg/m^3)

La falla fue frágil en todas las vigas demostrando que la cantidad de fibras añadidas a las mezclas no es la suficiente para lograr que éstas trabajen después de la fisuración de la viga.

En las siguientes imágenes se puede observar la fisuración de las vigas ensayadas.



Fig. 4.2 – Viga M-1 ensayada



Fig. 4.3 - Viga M-2 ensayada



Fig. 4.4 - Viga M-2 ensayada

A continuación se muestran las gráficas obtenidas de los ensayos a flexión realizados.

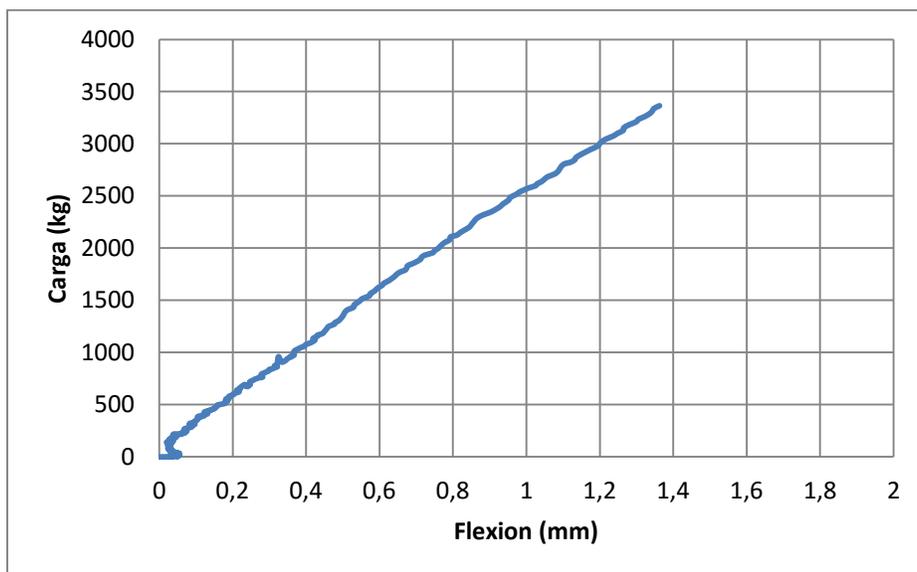


Figura 4.5 – Ensayo de flexión en la mezcla M-1 (sin fibra)

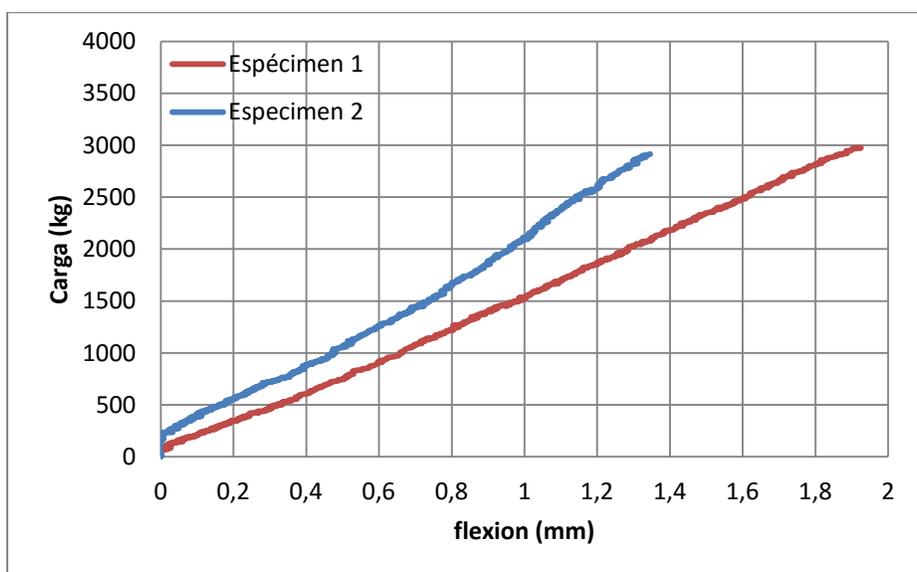


Figura 4.6 – Ensayo de flexión en la mezcla M-2 (5 kg/m³)

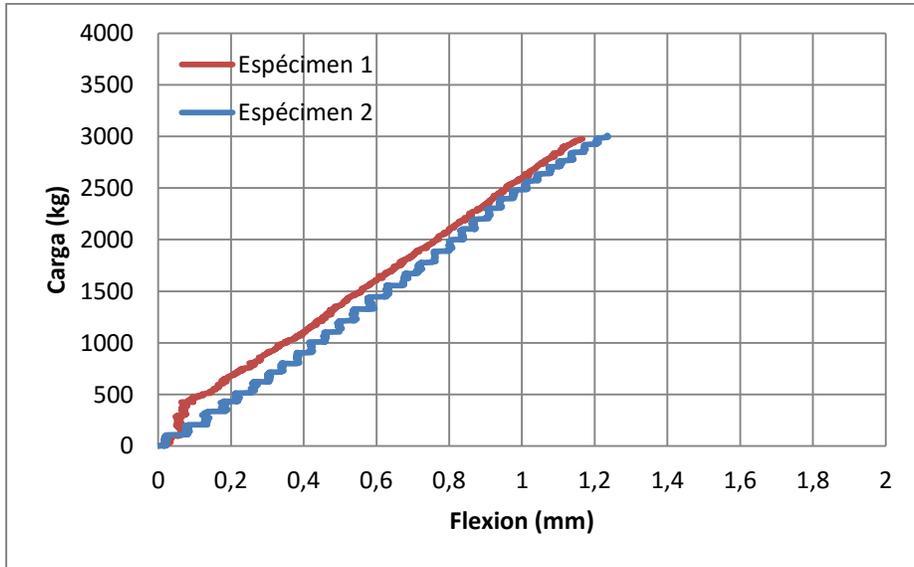


Figura 4.7 – Ensayo de flexión en la mezcla M-3 (9 kg/m^3)

Capítulo 5. Conclusiones

El desarrollo de esta tesina tuvo como objetivo estudiar el comportamiento del esfuerzo a compresión y flexión que presenta el concreto reforzado con fibras de acero obtenidas del reciclado de llantas.

A continuación se presentan las conclusiones generadas:

- La trabajabilidad del concreto desciende considerablemente al añadir fibras de acero, es recomendable utilizar superfluidificantes para mantener el revenimiento deseado.
- Al compactar mediante varillado, se modifica la distribución y acomodo de las fibras, logrando alterar el funcionamiento del CRFA, se recomienda compactar mecánicamente mediante una mesa de vibrado.
- No se presentó incremento en la resistencia a compresión para las mezclas con fibra, la mezcla M-2 disminuyó un 3.1% en comparación con la mezcla M-1, mientras que la mezcla M-3 genero la misma resistencia que la mezcla M-1 que fue de 290 kg/cm^2 .
- Al momento de fallar los cilindros a compresión, las fibras mantienen unidos los fragmentos de concreto fisurados, esto hace al concreto un material dúctil.
- El módulo de ruptura a flexión no aumento para las mezclas con fibra de acero, la mezcla M-2 se redujo un 12.5%, mientras que la mezcla M-3 disminuyó un 11% en comparación con la mezcla M-1.
- Las vigas de CRFA en el ensayo a flexión fallaron de forma frágil, se concluyen que las fibras no aportaron resistencia estructural a la post-fisuración de las vigas por la cantidad de fibra añadida.
- A pesar de añadir 5 kg/m^3 y 9 kg/m^3 de fibra de acero reciclado de llanta al concreto simple, estas dosificaciones no fueron suficientes para aumentar la resistencia a compresión y flexión del concreto.

- Se recomienda continuar con la investigación incluyendo mayor cantidad de fibras según lo especifica el ACI-544-3R.
- Con la investigación se pudo constatar que en México se requiere un programa formal para el tratamiento de todos los neumáticos que año con año son desechados y que pueden ser materia prima para nuevos materiales como éste concreto.

Referencias

ACI-211.1, (2002). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.* American Concrete Institute, committee 211.

ACI-544-1R, (1996). *Report on fiber reinforced concrete.* American Concrete Institute, committee 544.

ACI-544-2R, (1999). *Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete.* American Concrete Institute, committee 544.

ACI-544-3R, (2008). *Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete.* American Concrete Institute, committee 544.

ACI-544-4R, (1999). *Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete.* American Concrete Institute. committee 544.

ANDELLAC, ANILLAC y CNIH, (2013). *Plan de Manejo de Neumáticos Usados de Desecho.* Asociación Nacional de Distribuidores de Llantas y Plantas Renovadoras, A.C., Asociación Nacional de Importadores de Llantas, A.C. y Cámara Nacional de la Industria Hulera.

ASTM A820/A820M, (2006). *Specification for Steel Fibers for Fiber Reinforced Concrete.* American Society for Testing Materials.

ASTM C1609/C1609M, (2013). *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading).* American Society for Testing Materials.

ASTM C1116/C1116M (2003). *Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete.* American Society for Testing Materials.

Gallovich A., Perri G., Perri R., Rossi B. y Winterberg R. (s. f.). *Fibras como Elemento Estructural para el Refuerzo del Hormigón, Manual Técnico.* Maccaferri.

Gallo Lina P., Gonzáles G. y Carrillo J. (2013). *Comportamiento del concreto reforzado con fibras de acero ZP-306 sometido a esfuerzos de compresión.* Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.

Özgür E. y Khaled M. (2010). *Effect of steel fibers on plastic shrinkage cracking of normal and high strength concretes.* Turquía. Recuperado de <http://www.scielo.com/>

SMADF, (2002). *Llantas usadas, diagnóstico de la situación actual en el Distrito Federal.* Secretaria del Medio Ambiente del Distrito Federal.

SEMARNAT, (s.f.). *Guía para el establecimiento de un centro de acopio de llantas de desecho.* Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

SEMARNAT & EPA, (2011). *Situación de la Región Fronteriza, Reportes Indicadores 2010.* (1ª. Ed.). Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Environmental Protection Agency.

Nguyen Van, (s.f.). *Steel Fibre Reinforced Concrete.*

NMX-C-083-ONNCCE-2002. *Industria de la construcción - Concreto - Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto - Método de prueba.*

NMX-C-122-ONNCCE-2004. *Industria de la construcción - Agua para concreto - Especificaciones.*

NMX-C-156-ONNCCE-2010. *Industria de la construcción - Concreto - Determinación del revenimiento en el concreto fresco.*

NMX-C-160-ONNCCE-2004. *Industria de la construcción - Concreto - Elaboración y curado en obra de especímenes de concreto.*

NMX-C-414-ONNCCE-2004. *Industria de la construcción - Cementos Hidráulicos - Especificaciones y métodos de prueba.*