

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

**“DISEÑO DE UN MATERIAL ECOLÓGICO PARA
CONSTRUCCIÓN MEDIANTE LA ADICIÓN DE
CAUCHO DE LLANTA AL CONCRETO”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

JORGE LUIS HERNÁNDEZ MORELOS

DIRECTOR: DRA. MARINA VLASOVA

CODIRECTOR: DR. JESÚS MARIO COLÍN DE LA CRUZ

DR. ARTURO MOLINA OCAMPO

DR. SERGIO ALONSO SERNA BARQUERA

DR. PEDRO ANTONIO MÁRQUEZ AGUILAR

CUERNAVACA MORELOS

Noviembre. 2018

Cuernavaca, Morelos, a 14 de noviembre de 2018.

DR. ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMÍNGUEZ
COORDINADOR DEL POSGRADO EN
INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada "DISEÑO DE UN MATERIAL ECOLÓGICO PARA CONSTRUCCIÓN MEDIANTE LA ADICIÓN DE CAUCHO DE LLANTA AL CONCRETO" que presenta el alumno **JORGE LUIS HERNÁNDEZ MORELOS**, para obtener el título de **MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
DR. PEDRO ANTONIO MÁRQUEZ AGUILAR	Aprobado	
DR. ARTURO MOLINA OCAMPO	Aprobatorio	
DR. SERGIO ALONSO SERNA BARQUERA	APROBATORIO	
DR. JESÚS MARIO COLÍN DE LA CRUZ	Aprobatorio	
DRA. MARINA VLASOVA	Aprobado	

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.

RJR*RSU/nmc

RESUMEN

Uno de los problemas que enfrenta la sociedad son el manejo y eliminación de los residuos sólidos tales como las llantas, el caucho es la materia prima para la fabricación de llantas y se obtiene de medios naturales o sintéticos, se mezcla con azufre, carbón, antioxidantes y otros compuestos que hacen imposible su reciclado. En el presente estudio se pretende utilizar el caucho como agregado a la mezcla de concreto, se evaluaron diferentes mezclas de concreto adicionado con caucho en tres diferentes morfologías, en forma de polvo, fibras y fibras cilíndricas, a través de ensayos destructivos, con el fin de dar un uso al caucho proveniente de las llantas de desecho que provocan gran impacto ambiental. Se realizaron mezclas de concreto adicionado con caucho en porcentajes de 5, 10, 15, 20 y 25% sin variar las proporciones del cemento, agua, arena y gravilla, se vertieron estas mezclas en moldes cúbicos y se realizaron pruebas de compresión a los 28 días de edad. Las mezclas de concreto fresco con caucho presentaron poca trabajabilidad por lo cual fue necesario la utilización de una mayor cantidad de agua y puede tener un impacto en la reducción de resistencia una vez endurecido, los resultados de las pruebas de compresión muestran una reducción en la resistencia y la deformación conforme el contenido de caucho aumenta, siendo las muestras de concreto con caucho en fibras cilíndricas las de mayor resistencia en relación al contenido de caucho, sin embargo se observa que la forma de la fractura cambia de una fractura con desprendimiento de material a una fractura en la cual el material permanece en una sola pieza, además de poseer una densidad menor comparable con la de los concretos ligeros, por lo cual la mezcla de concreto con 5 % de caucho podría ser una mezcla óptima para la utilización en recubrimientos o en aquellas donde no se requiera una alta resistencia y si las propiedades antes mencionadas.

ABSTRACT

One of the problems facing society is the handling and disposal of solid waste such as tires, rubber is the raw material for the manufacture of tires and is obtained from natural or synthetic means, mixes with Sulphur, carbon black, antioxidants and others compounds that make their recycling impossible. In the present study we intend to use the rubber as added to the concrete mixture, we evaluated different mixtures of concrete added with rubber in three different morphology, in the form of powder, fibers and cylindrical fibers, through destructive tests, in order to use the rubber from the waste tires that cause great environmental impact. Mixtures of concrete added with rubber were made in percentages of 5, 10, 15, 20 and 25% without varying the proportions of cement, water, sand and gravel, these mixtures were poured into cubic molds and compression tests were performed at 28 days of age. The mixtures of fresh concrete with rubber showed little workability so it was necessary to use a greater amount of water and can have an impact on the reduction of resistance once hardened, the results of the compression tests show a reduction in resistance and deformation as the rubber content increases, with the samples of concrete with rubber in cylindrical fibers the most resistant in relation to the rubber content, however, it was observed that the shape of the fracture changes from a catastrophic fracture to a ductile fracture, which does not propagate as quickly as in a concrete without rubber, besides having a lower density comparable to that of the light concrete , so that the mixture of concrete with 5% of rubber could be an optimal mixture for the use in coatings or in those where it does not require a high resistance and if the properties mentioned before.

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)** por la beca otorgada para cursar la Maestría en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, sin su apoyo esto no hubiera sido posible. A mi director de tesis la **Dra. Marina Vlasova** por su paciencia, dedicación y motivación hacia mí, su conocimiento y enseñanza han sido clave para concluir este proyecto. A mi codirector de tesis el **Dr. Jesús Mario colín de la cruz**, por su incondicional apoyo durante los últimos años, además de persuadirme de estudiar un posgrado por lo cual estoy muy agradecido, ha sido capaz de ganarse mi lealtad y admiración. A mi comité tutorial **Dr. Arturo Molina Ocampo, Dr. Sergio Alonso Serna Barquera, Dr. Pedro Antonio Márquez Aguilar** por sus valiosos comentarios, críticas o sugerencias que hicieron de esta tesis un mejor trabajo, les reconozco y agradezco todas las enseñanzas que recibí de cada uno de ustedes. Al **Dr. Rene Guardián tapia** por su apoyo para realizar las pruebas de difracción de rayos X. Al **Dr. Osvaldo Flores del Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM**, por su apoyo y enseñanza en las pruebas de compresión. Al **Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la UAEM** del cual soy orgullosamente parte. A la **Facultad de Ciencia Químicas e Ingeniera de la UAEM** donde se realizó la parte experimental de esta tesis. A la **Facultad de Química de la UNAM** por su apoyo para la realización de las pruebas de compresión. A todas aquellas personas familiares, amigos, compañeros, maestros y doctores que contribuyeron directa o indirectamente para la realización de esta tesis con comentarios, crítica y aportes los cuales fueron tomados en cuenta y ayudaron a la progresión de este trabajo muchas gracias.

DEDICATORIAS

A mi familia, mi padre, madre y hermana por su motivación, apoyo incondicional ante toda situación y por siempre creer en mí aun cuando no lo merecía, ustedes siempre estuvieron ahí para dar una palabra de aliento, un comentario, una broma o una simple risa que me hacía seguir creyendo en mí, solo ustedes saben las muchas situaciones que hemos afrontado y los difíciles tiempos que hemos pasado pero si algo aprendí de ustedes es siempre seguir adelante, al día de hoy me siento feliz de poder compartir con ustedes de este éxito que espero vengan muchos más, los amo y gracias infinitas por todo.

A mi novia Karen que ha sabido ganarse mi amor y cariño a través de su personalidad e inteligencia, gracias por ayudarme, por motivarme por estar ahí cuando más lo necesitaba, somos un equipo te amo.

A mis amigos los cuales sé que puedo confiar y que estarán cuando los necesite, ha sido un largo camino desde que los conozco y el tiempo ha reforzado nuestra relación de amistad de verdad muchas gracias.

A mis profesores los cuales sé que siempre tuve la puerta abierta para una consulta, un consejo o una duda, muchas gracias por todo.

A todas aquellas personas que estuvieron a lado mío apoyándome, motivándome y que siempre creyeron en mí muchas gracias.

ÍNDICE

Capítulo 1: Antecedentes.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Justificación.....	5
1.3 Objetivos.....	6
Capítulo 2: Marco teórico.....	7
2.1. Concreto.....	8
2.1.1 Trabajabilidad.....	10
2.1.2 Endurecimiento del concreto.....	11
2.1.3 Proceso de curado.....	13
2.1.4 Resistencia del concreto.....	14
2.1.5 Densidad del concreto.....	16
2.2 Cementos Hidráulicos.....	18
2.2.1 Compuestos y fases cristalinas del cemento portland.....	18
2.2.2 Tiempo de fraguado.....	20
2.2.3 Resistencia del cemento.....	21
2.3 Clasificación de los cementos en México.....	21
2.4 Clases resistentes de cementos.....	22
2.5 Cementos portland especiales.....	23
2.6 Agua para concreto.....	24
2.7 Agregados para el concreto.....	25
2.8 Gradación de los agregados.....	26
2.8.1 Granulometría del agregado fino.....	28
2.8.2 Módulo de finura del agregado fino.....	29
2.8.3 Granulometría del agregado grueso.....	30
2.9 Fibras como agregado del concreto.....	31

2.9.1 Ventajas y desventajas del uso de fibras.....	31
2.9.2 Fibras de acero.....	32
2.9.3 Fibras de vidrio.....	33
2.9.4 Fibras sintéticas.....	34
2.9.5 Fibras naturales.....	35
2.9.6 Fibras naturales no procesadas.....	35
2.10 Caucho.....	35
2.10.1 Propiedades físicas del caucho.....	36
2.10.2 Vulcanización.....	36
2.11 Llantas de caucho.....	37
2.11.1 Impacto ambiental provocado por las llantas de caucho.....	39
2.11.2 Impacto de la proliferación de fauna por causa de las llantas.....	40
2.12 Reciclado y reutilizado de llantas.....	41
Capítulo 3: Desarrollo experimental.....	43
3.1 Proporcionamiento de las mezclas de concreto.....	44
3.2 Materiales utilizados para las mezclas de concreto.....	45
3.2.1 Difracción de rayos x.....	49
3.3 Elaboración de las mezclas de concreto y caucho.....	51
3.4 Pruebas de compresión del concreto con caucho.....	56
Capítulo 4: Resultados y discusión.....	58
4.1. Resultados de difracción de rayos X.....	59
4.2. Resultados de la prueba de compresión.....	63
4.3. Densidades del concreto con caucho.....	74
Capítulo 5: Conclusiones Y recomendaciones.....	76
Referencias.....	80

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Promedio de las densidades del concreto fresco.	17
Tabla 2.2. Análisis de 6 tipos diferentes de agua distribuida domésticamente.	24
Tabla 2.3. Límites granulométricos para el agregado fino según las normas ASTM C 33 (AASHTO M6), COVENIN 277, IRAM 1512, NCh163, NMX-C-111, NTC 174, NTP 400.037, UNIT 84.	29
Tabla 2.4. Composición y proporciones de los materiales de las llantas para vehículos de pasajeros y vehículos de carga.	38
Tabla 3.1. Proporciones de los diferentes agregados utilizados en la mezcla de concreto.	44
Tabla 3.2. Porcentajes de las diferentes mezclas de concreto adicionado con caucho.	45
Tabla 3.3. Proporciones utilizadas de concreto - caucho para las muestras.	51
Tabla 4.1. Promedio de la resistencia y deformación para las muestras de concreto con caucho en fibras, fibras cilíndricas y polvo.	71
Tabla 4.2. Densidades de las distintas muestras.	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Variación de las proporciones usadas en una mezcla de concreto.	8
Figura 2.2. Partículas de los agregados distribuidos en el concreto.	9
Figura 2.3. Cono de Abrams o revenimiento.	11
Figura 2.4. Aumento de la resistencia de acuerdo a la edad de los concretos y distintas condiciones de curado.	14
Figura 2.5 Relación de la resistencia y el proporcionamiento agua – cemento.	15
Figura 2.6. Prueba de compresión en concreto (A) y mortero (B).	16
Figura 2.7. Proceso de cribado de las partículas de los agregados.	26
Figura 2.8. Curvas de los límites de granulométricos de los agregados.	27
Figura 2.9 Recipientes de mismo volumen con partículas de distintos tamaños.	28
Figura 2.10. Fibras utilizadas en el concreto con distintas morfologías.	31
Figura 2.11. Fibras de acero utilizadas en el concreto.	33
Figura 2.12. Paneles de edificios hechos de concreto reforzado con fibras de vidrio.	34
Figura 2.13. Fibras de polipropileno empleados como agregados al concreto.	35
Figura 2.14. Incendio causado por el amontonamiento de llantas.	40
Figura 2.15. Debido a la forma de las llantas es muy fácil que el agua de lluvia se estanque en su interior provocando la proliferación de fauna nociva.	41
Figura 3.1. Arena utilizada para la fabricación de las mezclas de concreto, tamizada en una criba del número 18.	46
Figura 3.2. Gravilla empleada para las mezclas de concreto, con un tamaño promedio de un centímetro de diámetro.	46
Figura 3.3. Caucho en polvo obtenido por desbaste de la banda de rodamiento y cribado.	47
Figura 3.4. Caucho en fibras las cuales han sido pasadas por una criba del número 16.	48
Figura 3.5. Caucho en fibras cilíndricas, poseen un tamaño de entre 8 mm y 11 mm y 2 mm de diámetro en promedio.	49
Figura 3.6. Grava antes y después del proceso de molinado.	50
Figura 3.7. Difractómetro de rayos-x marca XRD Bruker Modelo D2 PHASE.	50
Figura 3.8. Proceso de fabricación de las mezclas de concreto y caucho.	52
Figura 3.9. Elaboración de probetas de concreto para la prueba de compresión.	53
Figura 3.10. Seccionado del bloque de concreto.	54

Figura 3.11. Cubo de concreto empleado para la prueba de compresión y vista transversal.	55
Figura 3.12. Muestras para la prueba de compresión empacadas.	55
Figura 3.13. Máquina de ensayos universales Instron 4206.	56
Figura 3.14. Prueba de compresión, extensómetro en la primera imagen e inicio y final de la prueba de compresión.	57
Figura 4.1. Difractograma del cemento portland con identificación de los picos y sus fases cristalinas.	59
Figura 4.2. Difractograma de la arena con su nomenclatura de los picos identificados.	60
Figura 4.3. Difractograma de la muestra de grava con la identificación de las fases y nomenclatura.	61
Figura 4.4. Difractograma del caucho empleado en la fabricación del concreto.	62
Figura 4.5. Grafica de resistencia en relación al contenido de caucho en polvo.	63
Figura 4.6. Muestra M1 de concreto con caucho en polvo después de la prueba de compresión.	64
Figura 4.7. Muestras MP2 Y MP3 de concreto con caucho en polvo después de la prueba de compresión.	65
Figura 4.8. Muestras MP4 y MP5 de concreto con caucho en polvo después de la prueba de compresión.	65
Figura 4.9. Grafica de resistencia en relación al contenido de caucho en fibras.	66
Figura 4.10. Muestras MF2 y MF3 de concreto con caucho en fibras después de la prueba de compresión.	67
Figura 4.11. Muestras MF4, MF5 y MF6 de concreto con caucho en fibras después de la prueba de compresión.	68
Figura 4.12. Grafica de resistencia en relación al contenido de caucho en fibras cilíndricas.	69
Figura 4.13. MuestrasMC2 y MC3 de concreto con caucho en fibras cilíndricas después de la prueba de compresión.	70
Figura 4.14. Muestras MC4, MC5 y MC6 de concreto con caucho en fibras cilíndricas después de la prueba de compresión.	71
Figura 4.15. Vista transversal de las muestras MF2, MF3.	73
Figura 4.16. Vista transversal de las muestras MF4, MF5.	74

1.1 INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción es un sector que tiene un gran impacto en la economía de los países en desarrollo, una industria que está en constante crecimiento debido a la demanda demográfica de infraestructura en donde habitar, así como la constante modernización de las ciudades que buscan materiales de construcción amigables con el medio ambiente y no causen un impacto negativo en los ecosistemas, la calidad del concreto dependen de la adecuada elección de las materias primas que darán como resultado buenas propiedades en los materiales de construcción.

El concreto es el material más utilizado y versátil en la industria de la construcción, está compuesto principalmente por cemento, agua, arena y grava, estos compuestos dosificados de la manera correcta formarán una masa parecida a una roca. El concreto ha evolucionado a través de los años para adecuarse a las nuevas necesidades que trae consigo el mundo moderno adaptando sus propiedades como la resistencia, trabajabilidad, apariencia y durabilidad a los requerimientos que demanda la sociedad, ofreciendo así una amplia variedad de productos que ofrecen eficiencia e innovación.

El diseño y dosificación de los elementos que conforman el concreto se basa principalmente en el uso así como su colocación, otros aspectos a considerar serán su resistencia, trabajabilidad, condiciones ambientales y ambiente de secado, todo ello afectará las características del concreto fresco y una vez endurecido. La resistencia es una de las características a tomar en cuenta durante el diseño de mezclas y se determina por medio de la prueba de compresión de acuerdo a los estándares y normas establecidos en cada país, la resistencia se mide en pascales (Pa o N/m^2), esta característica se toma en cuenta principalmente cuando se requiere un concreto para aplicaciones estructurales donde los miembros de concreto estarán

sometidos a grandes cargas estáticas y dinámicas, sin embargo existen concretos en los cuales se busca maximizar otras propiedades como la porosidad o la ligereza sacrificando la resistencia.

Con el crecimiento masivo de la industria de la construcción y con el pasar del tiempo donde la urbanización de las ciudades crece de forma acelerada es necesaria la utilización y explotación de los recursos y materias primas para la fabricación del concreto, el minado de arenas y gravas en los ríos, lechos marinos y zonas naturales ha afectado los ecosistemas provocando la desaparición de zonas ecológicas.

Por otro lado debido al crecimiento poblacional en las últimas décadas, se hace evidente el mayor uso y comercialización de vehículos para transportes en las grandes ciudades y por ende la utilización de llantas de caucho, las cuales una vez cumplido con su ciclo de vida útil pasa a ser un problema ambiental debido a su difícil reutilización o desaparición. Las llantas están compuestas principalmente de caucho, además de materiales textiles y acero dependiendo de su diseño, el caucho es un material altamente duradero y resistente a la mayoría de los entornos naturales, como resultado la eliminación de neumáticos es una preocupación en la sociedad.

Se han realizado diversos estudios para determinar y reportar las propiedades del concreto tanto fresco como endurecido con adiciones de caucho o comúnmente llamado concreto engomado, la cuales remplazan principalmente el agregado fino con caucho granulado (Onuaguluchi y Daman, 2104) (Sukontasukkul 2008) (Thomas *et al.* 2015) esto debido que, durante el proceso de molinado mecánico las partículas de caucho mayormente tiene una gradación similar a las del agregado fino.

Algunos estudios han reportado la utilización del caucho de llanta como sustituto parcial o completo de los agregados finos y gruesos (Ganjian, Khorami y Maghsoudi 2007) (Sukontasukkul y Chaikaew 2005) (Toutanji

1996) , esto se logra mediante la gradación y correcta granulometría que permite la sustitución de estos por caucho, los valores de sustitución del agregado fino por caucho han ido desde 5 % hasta el 100 % (Issa y Salem 2013) (Batayneh, Marie y Asi 2007), mientras que otros estudios las colocan como adiciones a los concreto sin variar los porcentajes de agregados y pasta de cemento(Mendis, Al-Deen y Ashraf 2017) (Feng *et al.* 2015) (Mavroulidou 2010).

Las propiedades del concreto engomado abarcan desde fungir como aditivo para la protección contra los ciclos de congelamiento y deshielo del concreto (Richardson *et al.* 2015) (Zhu *et al.* 2011) (Richardson, Coventry y Ward 2011) esto se logra debido a la finura y morfología de las partículas de caucho que permiten la introducción de un mayor contenido de aire durante el mezclado del concreto fresco y en consecuencia una mayor porosidad cuando el concreto endurece, por lo cual permiten que el agua congelada se expanda y ocupe estos lugares vacíos sin afectar la estructura del concreto.

La mayoría de los estudios y artículos reportan la disminución de resistencia y deformación conforme el contenido de caucho aumenta, sin embargo, esta disminución de resistencia no es lineal y tiene que ver con factores como los porcentajes de caucho utilizado, así como su tamaño y morfología, la mayoría de estos estudios emplean tamaños menores a un centímetro y morfología de caucho en chips o llamadas migajas de caucho (Mendis, Al-Deen y Ashraf 206) (Lijuan, Shenghua y Lan 2014).

La pérdida de resistencia y deformación trae consigo una mejora en la ductilidad del concreto con caucho, así como una forma de fractura distinta a la observada comúnmente en el concreto simple, otro factor es la velocidad de propagación de la fractura la cual ocurre en un tiempo mayor, por lo cual es un material que puede absorber energía y disiparla de mejor manera que

el concreto tradicional (Son, Hajirasouliha y Pilakoutas 2010) (Hernández *et al.* 2007) (ukontasukkul y Chaikaew 2006)

El concreto engomado trae consigo la capacidad de funcionar como aislamiento térmico y acústico dando buenos resultados en proporciones bajas de caucho y utilizándolo como agregado fino, lo que da a un posible uso como capas superficiales o muros divisorios (Sukontasukkul 2008), lo cual por su bajo peso del concreto debido al caucho lo hace un material liviano.

En general el concreto con caucho tiene propiedades que lo hacen atractivo para utilizar en aplicaciones específicas las cuales han sido reportados como barreras de contención, pavimentos, banquetas, recubrimientos, incluso si se combina con láminas de acero ha demostrado buenas propiedades, es por eso que este trabajo busca poder utilizar y evaluar diversas morfologías y tamaños de partículas de caucho adicionado al concreto, así evaluar sus propiedades mecánicas para una elección de la proporción más óptima, se ha vuelto una necesidad buscar la optimización de los materiales de construcción, reutilizando el caucho de las llantas de desecho como agregado para el concreto, a fin de reducir la explotación de los recursos naturales, materias primas comerciales y costos de producción.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Uno de los grandes problemas del manejo de residuos es el reutilizado de llantas que han cumplido con su ciclo de vida útil, algunos componentes de las llantas como el acero en forma de alambres se pueden reciclar, sin embargo el caucho por ser un material no biodegradable es difícil su desaparición y reciclado, según la secretaria de medio ambiente y recursos naturales SEMARNAT cada año se desechan 25 millones de llantas en México de las cuales el 91 % terminan en basureros a cielo abierto, provocando daños ambientales y el 9 % restante se renuevan, se utilizan como combustible para hornos de cemento o diversas aplicaciones específicas.

Otro problema de gran impacto ambiental es la explotación de recursos naturales para la obtención de materias primas para la construcción, el minado de recursos pétreos como la arena y grava, sin embargo afecta los lechos marinos, cuerpos de agua, flora y fauna de los lugares de minado, según la procuraduría federal de protección ambiental en 2014 se realizaron un total de 314 operativos en varios estados de la república mexicana y encontraron que la mayoría de las minas no cumplen con los requisitos de extracción de materias primas al no contar con la autorización del impacto al ambiental, además de minar una porción mayor de lo especificado por lo que se convierte en un problema que afecta el medio ambiente.

Por lo tanto para disminuir estos efectos se ha propuesto utilizar el caucho proveniente de las llantas de desecho como agregado para mezclas de concreto, y de esta manera generar un compuesto con propiedades distintas al concreto ordinario además de promover un ahorro de materias primas.

1.3 OBJETIVO PRINCIPAL

Desarrollo y evaluación de las propiedades mecánicas de un compuesto a base de concreto dopado con caucho proveniente de una llanta de desperdicio.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterización de la pasta, agregados y caucho para la elaboración del concreto.
- Diseño de distintas mezcla de concreto modificado con partículas de caucho en diferentes proporciones.
- Caracterización mecánica por medio de pruebas de compresión de las diferentes mezclas de concreto con caucho.
- Análisis y discusión de datos obtenidos.



Capítulo 2 Marco teórico

2.1 Concreto

El concreto es la mezcla de dos componentes, la pasta, formada por cemento y agua, y los agregados (finos y gruesos), estos al mezclarse forman una masa similar a una roca debido al proceso de endurecimiento del cemento al reaccionar con el agua conocido como hidratación. Los agregados finos tienen un rango de tamaño de entre 0.074 mm y 4.76 mm, mientras que los agregados gruesos pueden variar desde 4.76 mm hasta 50.8 mm, estos tamaños dependerán del diseño de la mezcla y el uso al que estará destinado el concreto. La pasta está compuesta por un material cementante y agua principalmente, aunque también contiene una cierta cantidad de aire incluido intencionalmente o atrapado durante el proceso de mezcla. La pasta forma del 25 % al 40 % del volumen de la mezcla de concreto, mientras que el aire varía del 4 % al 8 % del volumen para mezclas con aire incluido y del 1 % al 3 % para mezclas sin aire incluido como se observa en la figura 2.1.



Figura 2.1. Variación de las proporciones usadas en una mezcla de concreto.

El contenido de agregados puede variar del 60 % al 75 % del volumen de la mezcla. La resistencia y revenimiento del concreto dependen de los agregados, por lo tanto es importante elegir agregados con propiedades mecánicas apropiadas y resistencia a las condiciones ambientales.

La calidad del concreto durante la mezcla y una vez endurecido depende de las características de la pasta y de una correcta granulometría de los agregados. En una mezcla de concreto preparada correctamente, cada partícula de los agregados es cubierta completamente por la pasta y no hay espacios vacíos entre estas, como se observa en la figura 2.2.



Figura 2.2. Partículas de los agregados distribuidos en el concreto.

La cantidad de agua con relación a la cantidad de cemento también influye en la calidad del concreto, las ventajas de utilizar una menor cantidad de agua en el proceso de mezclado son:

- Mayor resistencia en pruebas de flexión y compresión.
- Mayor hermeticidad, debido al bajo uso de agua se disminuye la porosidad del concreto endurecido.
- Mejor resistencia a la exposición ambiental.
- Mejor unión varilla – concreto en el concreto armado.
- Reducción de la retracción plástica y elástica debido al proceso de secado.
- Menor reducción de volumen por secamiento.

Por lo tanto al utilizar una menor cantidad de agua en la mezcla, el concreto endurecido tendrá mejores propiedades, sin embargo el proceso de mezclado, consolidado y asentamiento se dificultará. Menores cantidades de agua resultan en mezclas más rígidas (secas) por lo cual el proceso de asentamiento se tendrá que realizar por medio de vibración, aunque este problema puede ser contrarrestado con el uso de aditivos para mejorar la trabajabilidad.

Existen distintos aditivos y se emplean para ajustar el tiempo de fraguado y endurecimiento, reducir la demanda de agua, aumentar la manejabilidad, incluir aire al concreto para motivos específicos y ajustar otras propiedades del concreto fresco o endurecido.

2.1.1 Trabajabilidad

La facilidad de colocación, consolidación, acabado del concreto fresco y el grado que resiste a la segregación se denomina trabajabilidad. El concreto debe de ser capaz de fluir y ser maleable sin que se produzca la segregación de los agregados, es decir, estos no deben hundirse o asentarse en el fondo de la mezcla porque afecta la homogeneidad del concreto. El grado de trabajabilidad del concreto se mide por medio de la prueba de revenido.

1. Los factores que afectan la trabajabilidad son:
2. El medio y tiempo de transporte.
3. Cantidad y características de los materiales cementantes.
4. Consistencia del concreto, esta se realiza por medio de la prueba de revenimiento utilizando el cono Abrams figura 2.3.
5. Tamaño y forma de los agregados.
6. Aire incluido o atrapado durante el proceso de mezclado.
7. Cantidad de agua.
8. Temperatura del concreto y medio ambiente donde se realice el mezclado.



Figura 2.3. Cono de Abrams o de revenimiento.

2.1.2 Endurecimiento del concreto

La reacción química del material cementante con el agua recibe el nombre de hidratación. El cemento está compuesto principalmente por cuatro fases cristalinas que forman el 90 % total del peso del cemento Portland, silicato dicálcico, silicato tricálcico, aluminato tricálcico y ferro aluminato tetracálcico, además de estos compuestos se agregan otros que le confieren características únicas en el proceso de hidratación del cemento, los cuatro principales compuestos están presentes en todos los cemento pero varían en proporción de acuerdo al uso y tipo de cemento. Las partículas de cemento después de la pulverización del Clinker (Kosmatka 2004) tienen un diámetro promedio de 15 micrómetros, aunque esto es relativo puesto que en un kilogramo de cemento portland existen 16,000 billones de partículas aproximadamente, esto es debido a la diferencia de tamaño de las partículas y poseen un área superficial de 400 metros cuadrados por kilogramo. Durante el proceso de hidratación los compuestos principales (silicato dicálcico y tricálcico) conforman el 75 % de cemento, al reaccionar con agua forman dos compuestos: hidróxido de calcio y silicato de calcio hidratado, los cuales aportan propiedades como la resistencia, la durabilidad,

endurecimiento y estabilidad dimensional. El silicato de calcio hidratado forma vínculos densos entre las fases cristalinas y los granos de cemento no hidratados, también se adhiere a los granos de arena y a los agregados gruesos, cementándolos todos juntos (Copeland, Schulz 1962).

A diferencia del cemento endurecido el volumen del concreto permanece constante una vez fraguado, sin embargo, el agua sobrante del proceso de hidratación tiende a evaporarse dejando poros vacíos, estos poros no tienen resistencia alguna, por lo cual afectan directamente a la resistencia del concreto, mientras menor sea la cantidad de poros en el concreto más resistente será, también el contenido de agua utilizada está relacionada con la resistencia final del concreto. La proporción ideal agua – cemento para tener una hidratación completa es de 0.4 gramos de agua por gramo de cemento (Powers 1948 y 1949). Sin embargo raramente se obtiene la hidratación completa en las obras de construcción debido a las condiciones de curado, por lo que llevaría años al concreto desarrollar una mayor resistencia.

El proceso de hidratado es un proceso químico exotérmico y es importante conocer la cantidad de calor liberado durante la hidratación. El calor liberado protege al concreto de las bajas temperaturas, pero en obras donde es necesario el uso de concreto masivo es perjudicial, por ejemplo, en las presas al utilizar grandes volúmenes de concreto en su proceso de hidratación generará más calor y creará diferenciales de temperatura provocando cambios volumétricos y formación de grietas. Otro factor a considerar durante el proceso de hidratación del concreto es la velocidad de endurecimiento.

El yeso es un elemento que se agrega al cemento pulverizado y ayuda a retardar el proceso de endurecimiento los primeros minutos después de haber realizado la mezcla, otros factores que influyen en la velocidad de

secado del concreto son la finura del cemento, los aditivos utilizados, la cantidad de agua, temperatura de los materiales y ambiente.

2.1.3 Proceso de curado

El curado es el proceso en donde se mantiene el concreto a una temperatura y humedad adecuada con el fin de favorecer el proceso de hidratación y desarrollar las características deseadas. El proceso de hidratación continuará si se presentan las siguientes condiciones:

- Presencia de cemento sin hidratar.
- El concreto se encuentra húmedo o la humedad ambiental es mayor a 80 % (powers 1948).
- La temperatura es la adecuada.
- Suficiente espacio para la formación de los productos derivados de la hidratación.

El curado es un proceso de importancia en la construcción y de este dependerá la calidad del concreto, sin embargo puede ser fácilmente descuidado debido a la pérdida de humedad por evaporación, si la humedad se pierde, el proceso de hidratación se interrumpe, otro factor es la temperatura ambiental, si el clima es frío o cerca del punto de congelación la hidratación se detendrá, estos factores influyen directamente en el desarrollo de la resistencia, por lo cual tienen que ser debidamente considerados.

Los métodos utilizados para el curado del concreto son:

1. Mantener el medio húmedo a través de la aplicación de agua en la superficie del concreto finalizada la primera etapa de fraguado,
2. Evitar la pérdida de agua y humedad del concreto mediante el uso de materiales sellantes, aunque el uso de sellantes es más restringido por las características finales, se puede usar mantas o lonas para evitar que el agua de la superficie se evapore,

3. Acelerar las reacciones por medio de aditivos, los cuales aceleran el desarrollo de la resistencia a edades más tempranas, estas condiciones se muestran en la figura 2.4.

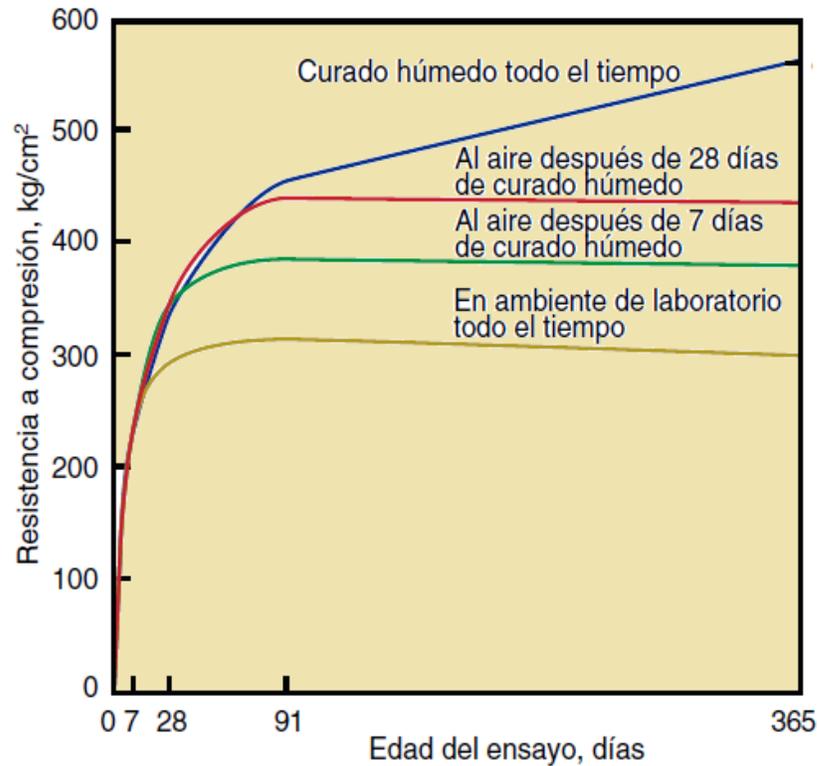


Figura 2.4. Aumento de la resistencia de acuerdo a la edad del concreto y distintas condiciones de curado.

2.1.4 Resistencia del concreto

La resistencia del concreto se puede definir como la máxima resistencia a la carga axial sobre especímenes de concreto, se expresa en unidades de kilogramo sobre centímetro cuadrado (kg/cm^2) o en mega-pascales (MPa) y se mide comúnmente a una edad de 28 días, también se realizan pruebas a los 7 y 14 días para tener un control sobre el desarrollo de la resistencia. Un factor importante en la resistencia final de concreto es la relación agua – cemento o agua – material cementante (Abrams 1918). La figura 2.5 muestra la curva de la resistencia a compresión en relación al porcentaje de agua –

cemento, en las pruebas de compresión realizadas en cilindros de concreto con una edad de 28 días, se observa que la resistencia aumenta conforme disminuye la relación agua – cemento, es decir, la resistencia aumenta conforme disminuye el contenido de agua, sin embargo, esta relación afecta la resistencia a flexión, tracción y adherencia entre el concreto y el acero.

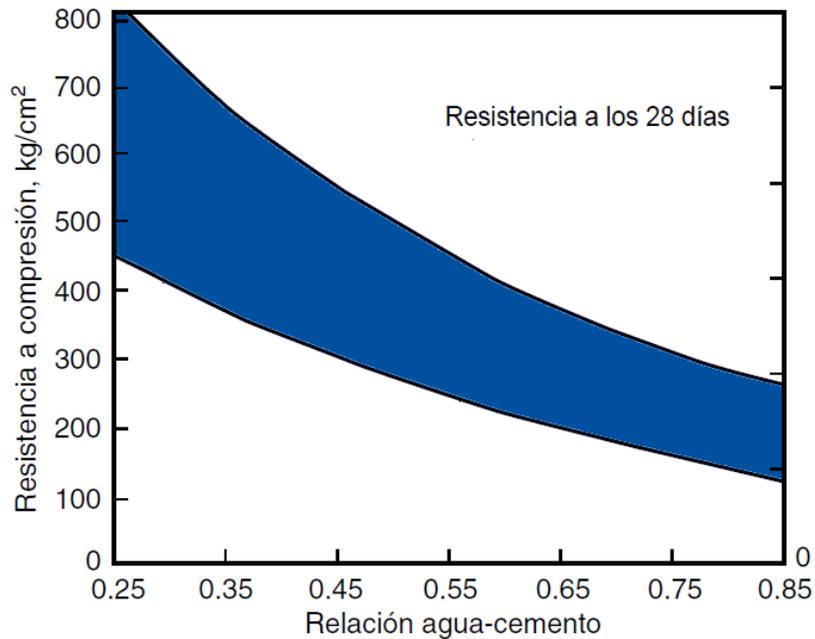


Figura 2.5 Relación de la resistencia y el proporcionamiento agua – cemento, fuente Diseño y Control de Mezclas de Concreto, 2004.

Para determinar la resistencia a la compresión se utilizan distintas probetas dependiendo el caso y la normatividad de cada país, usualmente se utilizan probetas de forma cúbica, de 50 mm para mortero y cilindros de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura en concreto según la norma ASTM C31 figura 2.6, aunque también cilindros con una relación similar de diámetro – altura son utilizados y aceptados.

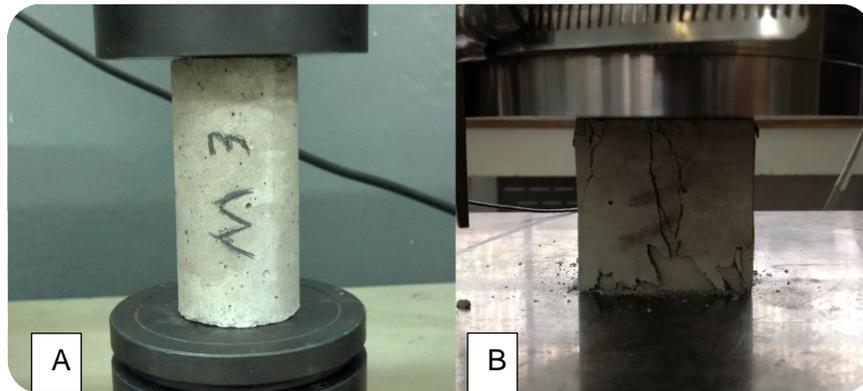


Figura 2.6. Prueba de compresión en concreto (A) y mortero (B).

Un concreto para uso general tiene una resistencia a la compresión de entre 200 y 400 kg/cm² (20 y 40 MPa), mientras que los concretos de alta resistencia empleados en puentes y edificios poseen una resistencia entre 700 y 1400 kg/cm².

El módulo de elasticidad denotado por el símbolo E, se puede definir como la razón entre el esfuerzo normal a una deformación correspondiente para el esfuerzo de tensión o compresión abajo del límite de proporcionalidad del material. En concretos de peso normal, el E varía de 140,000 a 420,000 kg/cm² o de 14,000 a 41,000 MPa y puede ser aproximado a 15,500 veces la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión en kilogramos por centímetros cuadrados o 5,000 veces la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión en megapascuales (57,000 veces la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión en libras por pulgada cuadrada) (Word 1992).

2.1.5 Densidad del concreto

El concreto de uso general tiene una densidad (peso volumétrico, masa unitaria) de entre 2,200 a 2,400 kg/m³, la densidad del concreto depende de factores como la densidad de los agregados, la cantidad de aire incluido intencionalmente o atrapado durante el mezclado y la porosidad.

Al aumentar el tamaño de agregados en la mezcla se reduce la cantidad de pasta provocando un aumento en la densidad como se muestra en la tabla 2.1, para el caso de concretos armados la densidad del concreto se sumará al de la armadura y se considera aproximadamente de 2,400 kg/m³.

Tabla 2.1. Promedio de las densidades del concreto fresco.

Tamaño máximo del agregado mm	Contenido de aire %	Agua Kg/m ³	Cemento Kg/m ³	Densidad kg/m ³				
				Gravedad específica del agregado				
				2.55	2.60	2.65	2.70	2.75
19	6.0	168	336	2194	2227	2259	2291	2323
37.5	4.5	145	291	2259	2291	2339	2371	2403
75	3.5	121	242	2307	2355	2387	2435	2467

Fuente: Diseño y Control de Mezclas de Concreto, 2004, Tabla 1-1.

Comúnmente el peso del concreto seco es igual al del concreto fresco menos el peso del agua evaporada durante el proceso de hidratación, parte del agua agregada se conserva en el concreto y otra parte se conserva en los poros y capilares. El agua evaporable en el concreto en un ambiente con una humedad relativa del 50 % es cerca del 0.5 % al 3 % del peso total del concreto, aunque esto dependerá de las características del agregado, tales como, porosidad, forma y tamaño.

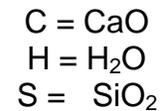
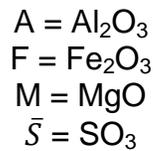
Las densidades mostradas anteriormente solo son consideradas para el concreto normal, para otro tipo de concreto o concretos especiales las densidades varían, por ejemplo, los concretos ligeros que utilizan agregados porosos como el tezontle reducen su densidad y peso, estos concretos ofrecen propiedades aislantes y tienen una densidad en promedio de 240 kg/m³ y 600 kg/m³.

2.2 Cementos Hidráulicos

El cemento Portland es el material más utilizado en la industria de la construcción, está compuesto por silicatos hidráulicos que reaccionan con el agua y se endurecen, el endurecimiento ocurre por el proceso químico llamado hidratación, las fases presentes en el concreto como el silicato tricálcico y silicato dicálcico se hidratan formando silicatos de calcio hidratado, esta reacción de endurecimiento se presenta como una formación de fibras que crecen conforme el proceso de hidratado continúe, debido al crecimiento de las fibras que se enlazan entre sí o se adhieren a las superficies de los agregados provocando una red que dará rigidez al material además del endurecimiento que será progresivo mientras estén presentes las condiciones adecuadas, la etapa de fraguado o pérdida de trabajabilidad suele ocurrir aproximadamente después de tres horas de vertido del concreto, aunque también dependerá del tipo de cemento, las condiciones ambientales, finura del cemento y uso aditivos acelerantes. La mayor parte de hidratación y desarrollo de la resistencia ocurre a lo largo del primer mes, pero si hay humedad y temperatura adecuada continuará de manera más lenta por un largo periodo. Se ha reportado el aumento continuo de la resistencia, hasta por 30 años (Washa y Wendt 1975).

2.2.1 Compuestos y fases cristalinas del cemento portland

El Clinker está compuesto principalmente por cuatro fases cristalinas, las cuales forman el 90 % total del cemento Portland, mientras que el yeso u otra fuente de sulfatos de calcio que se añade después de la molienda y pulverizado forma del 4 % al 6 %, los componentes químicos que se usan en el cemento portland se abrevian de la siguiente manera:



Las abreviaciones y formulas químicas de las fases encontradas en el cemento portland se presentan a continuación:

- Silicato tricálcico $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$
- Silicato dicálcico $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$
- Aluminato tricálcico $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$
- Ferroaluminato tetracálcico $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$

Las formulas químicas del sulfato de calcio se abrevian de la siguiente manera:

- Sulfato de calcio anhidro (anhidrita) $\text{CaSO}_4 = \text{CaO} \cdot \text{SO}_3 = \text{C}\bar{S}$
- Sulfato de calcio dihidratado (yeso) $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{CaO} \cdot \text{SO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{C}\bar{S} \text{H}_2$
- Hemidrato de sulfato de calcio $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O} = \text{CaO} \cdot \text{SO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O} = \text{C}\bar{S} \text{H}1/2$

Las fases presentes en el cemento portland se dividen principalmente en:

Silicato tricálcico (alita) C_3S – Está presente entre el 50 % al 70 % del cemento, es el principal responsable del fraguado y el endurecimiento del cemento a una edad temprana, entre mayor contenido de silicato tricálcico la resistencia del cemento será mayor.

Silicato dicálcico (velita) C_2S – Se encuentra entre el 15 % y 30 % del cemento y se encarga principalmente por el aumento de la resistencia progresiva del cemento portland más allá de una semana.

Aluminato tricálcico C_3A - Durante el proceso de hidratación y endurecimiento libera gran cantidad de calor, contribuye al desarrollo de la resistencia a una edad temprana y se encuentra entre el 5 % al 10 % en el Clinker, una baja cantidad de esta fase en el cemento portland contribuye a una mayor resistencia de suelos y aguas sulfatadas.

Ferroaluminato tetracálcico C_4AF - Esta fase debe su color gris al cemento, se utiliza principalmente durante el proceso de clinkerización de las materias primas y es el producto resultante del hierro y aluminio, su contribución al desarrollo de resistencia es muy bajo por lo cual solo es un desecho de los procesos anteriores, esta presente entre el 5 % hasta el 15 %.

Sulfato de calcio (anhidrita, yeso o hemidrato) – Es agregado al cemento portland durante el proceso de molienda del Clinker y su principal función es retrasar el proceso de fraguado mediante la reacción del sulfato con el C_3A , la formación de etringita (trisulfoaluminato del calcio), también contribuye al control de la retracción por secado e influye en la resistencia.

2.2.2 Tiempo de fraguado

El fraguado es la pérdida de elasticidad y endurecimiento de la pasta de cemento (Kosmatka 2004), se identifican dos etapas del fraguado, fraguado inicial que ocurre desde la adición de agua hasta la reducción de fluidez, mientras que el fraguado final es cuando la pasta comienza a presentar un grado de resistencia, este proceso no debe ocurrir rápidamente ni muy lentamente, el fraguado indicará si el proceso de hidratación se está llevando a cabo de manera normal, el yeso agregado durante el proceso de molienda del Clinker se encarga de regular el tiempo de fraguado de la pasta, sin embargo el tiempo también dependerá de otros factores como la finura, la relación agua – cemento y los aditivos. Los tiempos de fraguado del concreto se diferenciarán de los tiempos de la pasta debido a factores como los

agregados y las condiciones ambientales. En los ensayos realizados para especificar los tiempos de fraguado se utiliza la aguja Gillmore o el aparato Vicat.

2.2.3 Resistencia del cemento

La resistencia del cemento se determina mediante ensayos de compresión, se elaboran probetas según la norma de cada país, la resistencia de las probetas dependerá de las características de la pasta, finura y composición, las normas ASTM C 1157, IRAM 50000, MNX-C-414-ONNCCE y NTP 334.082 especifican los requerimientos mínimos y máximos de resistencia para los diferentes tipos de cemento, mientras que las normas ASTM C 150 y ASTM C 595 (AASHTO M 85 y M240) para la mayoría de los países latinoamericanos solo especifican las resistencias mínimas.

2.3 Clasificación de los cementos en México

En México los cementos y concretos están regulados por una serie de normas emitidas por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), estas normas pautan los tipos y clases de cemento comercializados en México, la norma NMX –C-414- ONNCCE refiere seis tipos básicos de cemento, los cuales se describen a continuación:

Cemento portland ordinario (CPO) - Contiene hasta un 5 % de materiales como humo de sílice, caliza, escorias y puzolanas, es utilizado en columnas, trabes, castillos, dalas, losas, pisos, pavimentos, guarniciones y banquetas, también se puede usar en miembros prefabricados como son tabicones, adoquines, bloques y entre otros.

Cemento portland puzolanico (CPP) - Este tipo de cemento contiene entre 6 % y 50 % de material puzolanico en masa, es resistente a ambientes químicamente agresivos y puede ser utilizado en suelos salinos, coladeras, drenajes y tuberías.

Cemento portland con escoria de alto horno (CPEG) - Contiene entre 6 % y 60 % de escoria, puede ser empleado en la construcción en general y es recomendado cuando se tiene un ataque de sulfatos bajo.

Cemento portland compuesto (CPC) - Se compone de dos o más adiciones además del Clinker y yeso que tiene un contenido del 50 % al 94 % sin contar los materiales adicionales, 6 % al 35 % de caliza, 6 % al 35 % de escoria, 1 % al 10 % de humo de sílice y 6 % al 35 % de material puzolanico, presenta una buena resistencia química y bajo calor de fraguado ideal para alcantarillados.

Cemento portland con humo de sílice (CPS) - Contiene del 1 % al 10 % de humo de sílice, es ideal para construcciones donde se requiere una resistencia más temprana, así como una mayor resistencia una vez fraguado y en miembros estructurales.

Cemento con escorias de alto horno (CEG) - Contiene una alta cantidad de escoria aproximadamente del 61 % al 80 %, por esta razón pierde la denominación portland, se utiliza en condiciones de bajo calor de hidratación y alta resistencia a los sulfatos, por lo cual es ideal en ambientes de aguas subterráneas o suelos sulfatados, debido al alto contenido de escorias su fraguado y desarrollo de resistencia suele ser más lenta.

2.4 Clases resistentes de cementos

Los cementos se dividen en distintas clases resistentes las más comunes son 20, 30 y 40 las cuales denotan la resistencia a compresión mínima a los 28 días de 20 MPa, 30 MPa y 40 MPa respectivamente, la clase R como la 30R y 40R indican resistencia de 20 MPa y 30 MPa a los 3 días respectivamente y 30 MPa y 40 MPa a los 28 días, todas las clases resistentes tendrán un tiempo de fraguado inicial de 45 minutos después del mezclado.

2.5 Cementos portland especiales

Alta resistencia inicial - Este tipo de cementos generan una alta resistencia a un nivel de edad temprano, se debe a la mayor área superficial del cemento, se compone principalmente de Clinker y yeso, se utiliza en miembros prefabricados, así como en pavimentos y climas fríos.

Bajo calor de hidratación - Este tipo de cementos se utiliza en la fabricación de concretos donde se requiera bajo calor durante el proceso de hidratación, grandes volúmenes de concreto vertido, como por ejemplo, las presas, esta propiedad se debe a la baja cantidad de silicatos tricálcicos y aluminatos tricálcicos.

Blanco - Cemento muy similar al ordinario en diferencia al color blanco debido a la ausencia de ferroaluminatos, su uso es principalmente arquitectónico donde el diseño y acabado es importante.

Cementos portland modificados - Este tipo de cementos contienen cantidades de escorias, calizas o puzolanas durante el proceso de pulverizado y mezclado del Clinker, debido a estos agregados el desarrollo de la resistencia es más lento, en esta categoría se encuentran los cementos portland con filler calcáreo, cementos portland modificados con escoria y cementos portland modificados con puzolana.

Cementos portland adicionados - A diferencia de los cementos modificados estos presentan una mayor cantidad de minerales mezclados lo que influye en las características finales del cemento, como mayor durabilidad pero afecta otras propiedades, como el desarrollo de la resistencia temprana y menor permeabilidad, en este tipo de cementos se encuentra el cemento portland con escoria granulada, el cual es utilizado de manera general y donde se requiere bajo calor de hidratación y permeabilidad, además es utilizado en miembros de concreto expuestos al

agua salada o sulfatadas y presas de agua, el cemento portland puzolanico también pertenece a esta clasificación con propiedades similares al cemento con escoria, posee una resistencia a los sulfatos y al agua de mar en miembros expuestos.

2.6 Agua para concreto

La tabla 2.2 muestra el estudio de 6 aguas distintas con características similares a las distribuidas domésticamente, los resultados indican que son aptas para la fabricación de concreto o mortero, cualquier análisis que arroje datos similares a los de esta tabla indicara que se podrá hacer uso de esta para la fabricación de concreto, sin embargo con aguas de dudosa calidad o análisis se tendrán que hacer pruebas de calidad a través de la fabricación de probetas para compresión, los resultados obtenidos tendrán que ser de al menos 90 % de resistencia a los 7 días en comparación a una probeta de referencia fabricada con agua potable o agua destilada.

Tabla 2.2. Análisis de 6 tipos diferentes de agua distribuida domésticamente,

Sustancia química	Análisis (ppm)					
	1	2	3	4	5	6
Sílice (SiO ₂)	2.4	0	6.5	9.4	22	3
Hierro (Fe)	0.1	0	0	0.2	0.1	0
Calcio (Ca)	5.8	15.3	29.5	96	3	1.3
Magnesio (Mg)	1.4	5.5	7.6	27	2.4	0.3
Sodio (Na)	1.7	16.1	2.3	183	215	1.4
Potasio (K)	0.7	0	1.6	18	9.8	0.2
Bicarbonato (HCO ₃)	14	35.8	122	334	549	4.1
Sulfato (SO ₄)	9.7	59.9	5.3	121	11	2.6
Cloruro (Cl)	2	3	1.4	280	22	1
Nitrato (NO ₃)	0.5	0	1.6	0.2	0.5	0
Total de solidos	31	250	125	983	564	19

Fuente: Diseño y Control de Mezclas de Concreto, 2004.

En aguas de dudosa calidad se tendrá que tener cuidado con las impurezas que pueda contener porque pueden afectar las características del mezclado, así como la resistencia, disminución de la durabilidad, cambios de volumen y en concretos armados causar la corrosión del acero utilizado, la cantidad máxima de impurezas que puede contener el agua para la elaboración de concreto no deberá rebasar de 2000 partes por millón (ppm).

2.7 Agregados para el concreto

Los agregados influyen en la economía y propiedades finales del concreto, su selección y correcta graduación determinaran la calidad del concreto, los agregados finos y gruesos ocupan un volumen de entre el 60 % y 75 % del volumen. El agregado fino suele ser arena o piedra molida con un tamaño menor de los 5 mm (0.2 pulg.), el agregado grueso comúnmente grava, su tamaño es mayor de 5 mm aunque el tamaño promedio esta entre 9.5 mm y 37.5 mm (3/8 y 1 1/2 pulg.)

Los agregados finos se obtienen mediante la extracción de minas cerca de ríos, lechos marinos o lagos, los agregados gruesos se fabrican por medio de la trituración de piedras de cantera o gravas de un tamaño mayor, los procesos de extracción, trituración y graduación se realizan cerca de la mina por lo cual puede haber variaciones en la propiedades de los agregados, como el contenido de humedad, calidad y limpieza, la grava es el agregado grueso más utilizado en la elaboración de concreto aunque también la piedra triturada y la escoria de alto horno se pueden utilizar.

En los concretos comunes y de densidades aproximadas de entre 2200 kg/m³ a 2400 kg/m³ se utiliza la arena y grava, también es posible el uso de escorias de alto horno enfriados al aire, para los concretos ligeros, el uso de agregados más finos o porosos como pizarra, escoria expandida, arcilla o esquisto formarán concretos con densidades aproximadas de entre 1350 kg/m³ a 1850 kg/m³ y para propósitos aislantes y no estructurales se utilizan

vermiculita, perlita, piedra pómez, cagafierro y diatomita para concretos con densidades de entre 250 kg/m^3 a 1450 kg/m^3 , materiales como hematita, limonita, barita, ilmenita y esferas de hierro se utilizan para producir concretos de alta densidad y para propósitos de blindaje contra la radiación. Las características de los agregados siguen las normas ASTM C 33 o AASHTO M 6/M80, COVENIN 277, IRAM 1512, IRAM 1531, IRAM 1627, NCh163, NMX-C-111, NTC 174, NTP 400.037, UNIT 84 y UNIT 102.

2.8 Gradación de los agregados

La gradación o granulometría es la clasificación de las partículas de acuerdo a su tamaño por medio del tamizado o cribado, el proceso de cribado debe realizarse de acuerdo a las normas ASTM C 136, AASHTO T 27, COVENIN 0255, IRAM 1505, NCh165, NMX-C-077, NTC 77, NTE 0696, NTP 400.012 y UNIT 48, Figura 2.7.



Figura 2.7. Proceso de cribado de las partículas de los agregados.

El tamizado o cribado se realiza por una serie de cribas que están formadas por mallas metálicas, las aberturas de estas mallas son de forma cuadrada por lo que el número de tamiz dependerá de la separación de estos alambres, para un agregado fino las aberturas de las cribas serán de entre $150 \mu\text{m}$ a 9.5 mm , mientras que las aberturas para los agregados gruesos

variaron de entre 1.18 mm hasta 100mm. El tamaño de agregado grueso tiene un rango de tamaños y se define como el porcentaje de masa que pasara a través de una serie de tamices, mientras que para el agregado fino solo se tendrá un rango de tamaño para la construcción de autopistas y otro para la construcción en general, sin embargo en países como México, Chile y argentina no se usa este sistema existen rangos específicos dentro de cierto limites nominales. Los límites granulométricos son el porcentaje de material que pasa en cada criba y se muestran en figura 2.8.

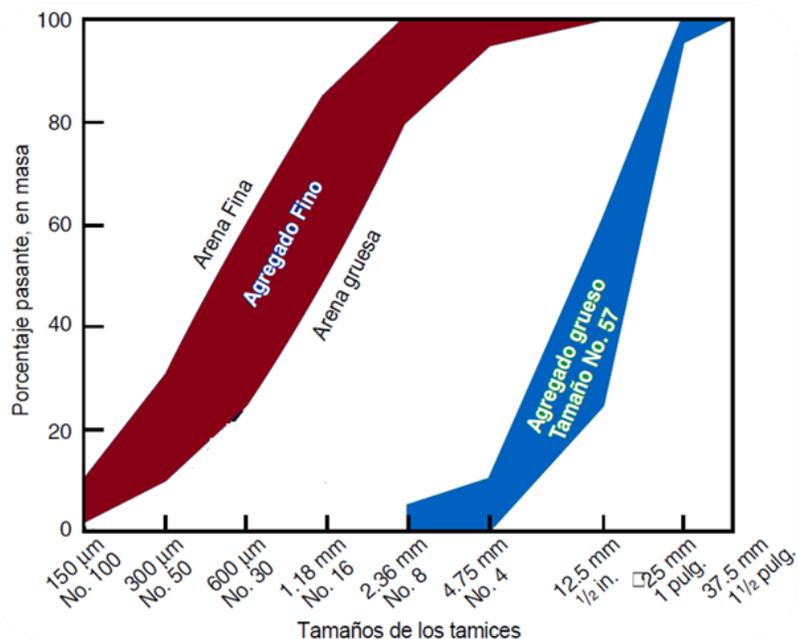


Figura 2.8. Curvas de los límites de granulométricos de los agregados, normas AASHTO M6, IRAM 1512, Nch 163, NMX-C-111, NTC 174.

Es importante mantener los agregados dentro de estos límites, si la arena utilizada en la mezcla es muy fina demandara más agua, si por el contrario la arena es demasiado gruesa afectará la trabajabilidad, la granulometría influirá en factores como la economía, bombeabilidad, porosidad, durabilidad y retracción por secado. Los límites de tamaños de agregados influirá en la cantidad de pasta como se muestra en la figura 2.9, se observa que en los

dos primeros recipientes donde el tamaño de partículas es el mismo, la cantidad de agua utilizada en ambos es similar, mientras que en el tercer recipiente donde se tienen dos partículas de diferentes tamaños, la cantidad de agua es menor en comparación con los anteriores, esto es debido a que los espacios vacíos que quedan entre partículas es menor.

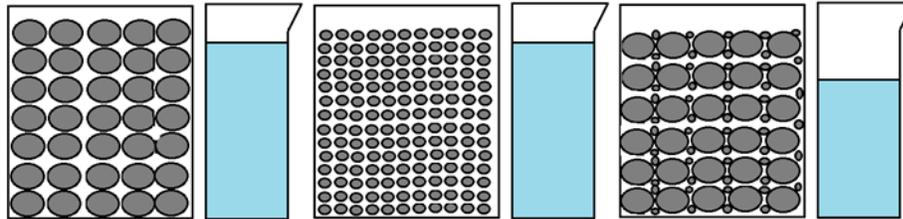


Figura 2.9 Recipientes de mismo volumen con partículas de distintos tamaños.

2.8.1 Granulometría del agregado fino

El tamaño de los agregados finos dependerá del tipo de obra en la que se utilice el concreto, las proporciones de la pasta y el agregado grueso, el rango de granulometría del agregado fino está determinado por las normas ASTM C 33 o AASHTO M6/M80, COVENIN 277, IRAM 1512, NCh163, NMX-C- 111, NTC 174, NTP 400.037, UNIT 84. Los límites granulométricos para los agregados finos se presentan en la tabla 2.3 de acuerdo a las normas ASTM C 33 (AASHTO M6), COVENIN 277, IRAM 1512, NCh163, NMX-C-111, NTC 174, NTP 400.037, UNIT 84.

Los requisitos según las normas ASTM C 33 (AASHTO M6), COVENIN 277, IRAM 1501, NMX-C-111 y NTC 174 son:

1. Entre cribas consecutivas no se debe retener más del 45 % del agregado fino, si es así no se podrá utilizar.
2. Los rangos de módulo de finura para el agregado fino debe estar entre 2.3 y 3.1 y la variación no deberá de ser mayor de 0.2, de no ser así el

agregado no podrá ser utilizado a menos que se realice un ajuste en las proporciones de la mezcla.

Tabla 2.3. Límites granulométricos para el agregado fino según las normas ASTM C 33 (AASHTO M6), COVENIN 277, IRAM 1512, NCh163, NMX-C-111, NTC 174, NTP 400.037, UNIT 84

Numero de criba	Longitud de apertura	Porcentaje que pasa en masa
-	9.5 mm	100
4	4.75 mm	95 a 100
8	2.36 mm	80 a 100
16	1.18 mm	50 a 85
3	600 µm	25 a 60
50	300 µm	10 a 30
100	150 µm	2 a 10

2.8.2 Módulo de finura del agregado fino

El módulo de finura es un valor adimensional que indica que tan fino o grueso es el agregado, y es calculado de acuerdo a las normas ASTM C 125, COVENIN 255, IRAM 1627, NCh 165, NMXC- 111, NTC 385, NTE 0694:83, NTP 400.011 y UNIT-NM 2, el módulo de finura se calcula por medio de la suma de los porcentajes de masa retenida en cada una de las cribas y dividida por cien, las cribas utilizadas para determinar el módulo de finura son los números 100, 50, 30, 15, 8, 4, 3/8 de pulgada, 3/4 de pulgada, 1 1/2 de pulgada, 3 pulgadas y 6 pulgadas. El módulo de finura determina las proporciones de los agregados para las mezclas de concreto, entre menor sea el número el agregado será más fino.

2.8.3 Granulometría del agregado grueso

Las normas ASTM C 33 (AASHTO M 80), COVENIN 277, IRAM 1531, NCh163, NMX-C-111, NTC 174, NTP 400.037 y UNIT 102 especifican los rangos de los agregados gruesos, estos pueden ser variados, sin afectar las propiedades del concreto siempre y cuando las proporciones del agregado fino y la pasta permitan una mezcla trabajable.

Para concretos con agregados gruesos de distintos tamaños producirán concretos con distintas resistencias a pesar de tener la misma relación agua – cemento, los agregados gruesos de mayor tamaño y uniformes son utilizados en concretos de alta resistencia. El tamaño del agregado se determina por la medida de la criba por la que pasa y queda retenida en la criba de menor tamaño, por lo cual el tamaño máximo del agregado según las normas ASTM C 125, Nch 163, NTC 385, NTE 0694:83, NTP 400.037, UNIT-NM 2 y el ACI 116 definen como la menor criba, la que pasa el agregado, mientras que el tamaño máximo nominal según las normas ASTM C 125 y ACI 116 el menor tamaño de criba es en la cual pasa la mayoría del agregado, este rango puede retener ciertos agregados, alrededor del 5 % al 15 % dependiendo del número de la criba.

Para elegir el tamaño correcto del agregado grueso depende de factores como el tamaño del miembro del concreto. Las restricciones sobre el tamaño del agregado grueso utilizado en el concreto armado son:

1. El tamaño del agregado grueso no debe exceder un quinto del tamaño del miembro de concreto.
2. No debe sobrepasar tres cuartos de la distancia entre las varillas de refuerzo y las barras del refuerzo y las cimbras.
3. No exceder un tercio de profundidad de las losas.

2.9 Fibras como agregado del concreto

Las fibras toman importancia en la construcción como agregado del concreto prefabricado, premezclado y concreto lanzado, estas fibras pueden ser de diversos materiales, tales como el vidrio, plástico o fibras naturales hechas de celulosa de madera y pueden tener diversas formas como llanas, onduladas, cilíndricas o rizadas dependiendo su uso, el espesor de las fibras se encuentra en el orden de 0.005 mm hasta 0.75 mm y longitudes de entre 60 mm y 150 mm figura 2.10, se pueden mezclar con el concreto en bajos volúmenes, menos del 1 % y favorece en el control de la figuración del concreto además al utilizarlas adecuadamente aumentan la resistencia al agrietamiento.

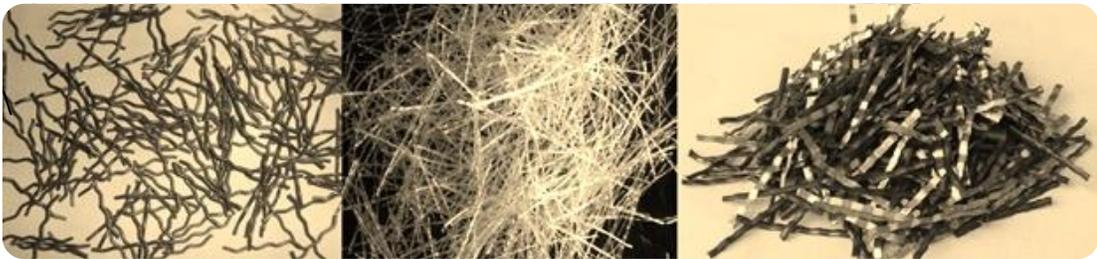


Figura 2.10. Fibras utilizadas en el concreto con distintas morfologías.

2.9.1 Ventajas y desventajas del uso de fibras

Durante el proceso de mezclado las fibras tienden a distribuirse aleatoriamente por lo que puede ser un problema para soportar las cargas aplicadas o tensiones en ciertas direcciones específicas, la orientación de la fibras estará dada principalmente por el método de fabricación y puede ser bidimensional o tridimensional, si el mezclado es por medio de mezcladoras u ollas, la dirección de las fibras tenderá a tener una dirección tridimensional, mientras que si el concreto es colocado por medio de rociado, la dirección de las fibras será bidimensional, durante los esfuerzo de flexión o tensión las fibras suelen estar en una posición o tener un anclaje que difícilmente pueda

ofrecer una resistencia eficiente, solo un pequeño porcentaje de estas fibras estarán colocadas adecuadamente para soportar los esfuerzos, para el caso de la orientación bidimensional la eficiencia rondará aproximadamente de 0.4 mientras que para las fibras con orientación tridimensional será 0.25, todas estas eficiencias son la relación de longitud de la fibras y la longitud crítica embebida, desde el punto de vista de la construcción el uso de fibras no es un método muy eficiente para mejorar la resistencia de los miembros de concreto. El principal uso del concreto con fibras es en miembros de concretos con un espesor delgado con formas irregulares o donde el uso de armadura por sus dimensiones o forma, sea de difícil colocación, comúnmente se utiliza en el concreto rociado, por medio de este método se ha mostrado una disminución del peso y una resistencia similar a un miembro mucho más grueso y con armadura convencional.

2.9.2 Fibras de acero

Las fibras de acero tienen una relación de esbeltez de entre 20 a 100, poseen formas variadas que permiten un mejor anclaje al concreto figura 2.11, la norma ASTM A 820 clasifica a las fibras de acero en cuatro tipos:

- Tipo I – son fabricadas en frío de acero conformado y las más comunes en el mercado.
- Tipo II – fibras de chapa, cortadas de chapas de acero.
- Tipo III – fibras extraídas de fundición, el método de fabricación de estas es más complejo que las anteriores, se realiza por medio de una rueda que levanta el metal fundido a través de capilaridad, el metal se enfría rápidamente para formar las fibras en forma de media luna.
- Tipo IV – se engloban todas las demás fibras de acero que varían en forma y longitud además de los métodos de fabricación, los datos de estas fibras se consultan en la norma ASTM A 820.



Figura 2.11. Fibras de acero utilizadas en el concreto.

El uso de este tipo de fibras en el concreto no afectan su resistencia a compresión, los valores en volumen de fibras de acero agregados en la mezcla de concreto van desde 0.25 % hasta 2 % de volumen, sin embargo en una adición 1.5 % de fibras de acero al concreto aumentará hasta 150 % la resistencia a la flexión y hasta 40 % en la resistencia a la tracción, para valores más altos afectará la trabajabilidad del concreto y dificultará su colado.

2.9.3 Fibras de vidrio

Durante los años 60's se experimentó con el uso de fibras de vidrio como agregado al concreto, sin embargo se demostraron que las fibras de borosilicato o vidrio – E, reducían la resistencia del concreto debido a la interacción con la pasta, se emplearon fibras de vidrio – RA resistentes a álcalis para aumentar la durabilidad aunque al igual que la fibras anteriores se observó una disminución en la resistencia principalmente por la reacción de rigidización de las fibras por el hidróxido de calcio formado durante la hidratación del cemento. Para mitigar la rigidización de las fibras y aumentar su durabilidad el uso de revestimientos químicos ha sido empleado además de la utilización de lechadas con humo de sílice entre las fibras para rellenar los espacios entre estas y mitigar la penetración de hidróxido de calcio. Se puede usar la metacaolinita en concretos reforzados con fibras de vidrio sin

afectar considerablemente la resistencia a la flexión, la deformación, el módulo de elasticidad y la tenacidad (Marikunte, Aldea, Shah 1997). Debido a su baja resistencia las fibras de vidrio en el concreto se utiliza en la fabricación de paneles para fachadas de edificios figura 2.12.



Figura 2.12. Paneles de edificios hechos de concreto reforzado con fibras de vidrio.

2.9.4 Fibras sintéticas

Están fabricadas de productos textiles y petroquímicos como el nylon, polietileno, polipropileno, carbón, poliéster, aramida y acrílicos, se emplean principalmente para controlar la figuración por contracción, el uso de fibras sintéticas se ha utilizado en el whitetopping o capa delgada de concreto que se utiliza como recubrimiento de pavimentos para evitar su figuración y la aparición de baches, sin embargo uno de los problemas más comunes asociados al uso de fibras sintéticas en el concreto es la baja adherencia entre la fibra y la pasta de cemento, los ensayos realizados no son concluyentes de la proporciones eficientes de fibras sintéticas en el concreto, además de su alto coste en las fibras de aramida y carbón aunado a un bajo módulo de elasticidad para el caso de la fibras de polietileno y polipropileno. El uso de las fibras fabricadas de polipropileno en el concreto reduce significativamente la figuración es por eso que se han vuelto las más populares además de sus características de ser ligeras, químicamente

inertes e hidrofóbicas, sus formas son cilíndricas alargadas y se pueden seccionar en longitudes dependiendo su uso figura 2.13.

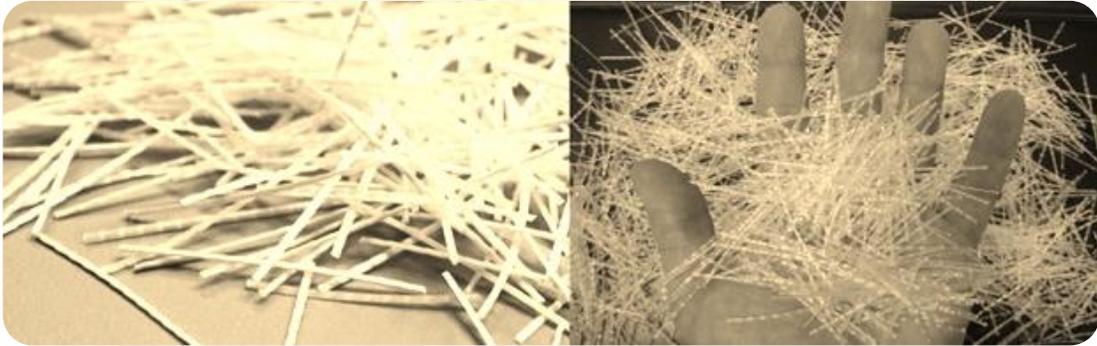


Figura 2.13. Fibras de polipropileno empleados como agregados al concreto.

2.9.5 Fibras naturales

Las fibras naturales han sido empleadas desde la antigüedad para la fabricación de ladrillos de adobe reforzados como la paja, estas proveen un bajo coste de producción, se pueden catalogar como fibras naturales procesadas y fibras no procesadas.

2.9.6 Fibras naturales no procesadas

Dentro de las fibras naturales sin procesar se encuentra las fibras vegetales, yute, madera, coco, bambú y sisal, se han utilizado en el concreto para la fabricación de planchas finas y techos, sin embargo el principal problema ha sido su baja durabilidad debido a la alta absorción de agua lo que provoca cambios dimensionales, estos problemas afectan la adherencia entre la fibra y el concreto es por eso que el uso de estas fibras es casi inexistente.

2.10 Caucho

El caucho es un material que puede ser natural o sintético y se caracteriza principalmente por su elasticidad, el caucho sintético se obtiene a través de varios procesos químicos y derivados de polímeros, mientras que el caucho

natural se obtiene de la corteza del árbol de hule por medio del proceso de sangrado que consiste en hacer cortes en la corteza del árbol para recolectar una sustancia lechosa que se conoce como el látex, el caucho sintético se produce principalmente en países del sudeste asiático mientras que el caucho sintético se produce en países como Japón, Europa, Estados Unidos y Brasil. La industria de productos de caucho es muy grande y abarca la fabricación de diversos productos de goma como acoplamientos, calzado, mangueras, correas, preservativos y un sin fin de productos de uso diario, la mayor parte de la producción del caucho se destina a la fabricación de llantas para autos, el 75 % del caucho sintético y el 60 % del caucho natural se utiliza para la fabricación de este producto.

2.10.1 Propiedades físicas de caucho

El caucho en bruto es sensible a los cambios de temperatura por lo que tiende a volverse rígido y fibroso a bajas temperatura, mientras que a temperaturas más altas se ablanda y se vuelve flexible permitiendo alteraciones permanentes, la plasticidad del caucho dependerá en gran medida del tipo de árbol extraído y del proceso de obtención del látex, si contiene bacterias o si hay oxidación es por eso que durante los procesos de producción se le adiciona productos químicos para modificar su plasticidad. El caucho tiene una densidad aproximada de entre 0.950 gr/cm^3 a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ y 0.934 gr/cm^3 a $20 \text{ }^\circ\text{C}$, el caucho se puede deformar varias veces, sin embargo después de un largo periodo no regresará a su forma inicial a menos que se le aplique calor, este fenómeno se le conoce como deformación residual y es propio del caucho.

2.10.2 Vulcanización

El proceso de vulcanización consiste en aplicar calor en el caucho crudo en presencia de azufre para modificar sus propiedades, el azufre crea puentes entre las cadenas lineales, estos puentes unen las moléculas creando una

mayor o menor extensión entre sí, las propiedades resultantes son un caucho más resistente y por ende con mayor duración, mejor estabilidad, elasticidad y resistente al ataque químico. El vulcanizado es un proceso de curado irreversible por lo que el caucho adquirirá propiedades de los materiales termoestables es decir no se fundirán con el calor.

2.11 Llantas de caucho

Las llantas son fabricadas principalmente de caucho y constituye la mitad de su peso, otros materiales empleados son el acero y nylon que las hacen más durables y resistentes, las llantas radiales se componen de una banda de rodamiento, cintura inextensible, arcos radiales y membrana inflada. La fabricación de llantas abarca el 60 % de la producción de caucho, el caucho es un elastómero el cual puede regresar a su forma original después de haber aplicado una fuerza. Los cauchos más utilizados para la fabricación de neumáticos son:

- Cauchos naturales (NR)
- Estireno – Butadieno (SBR)
- Polibutadienos (BR)
- Polisoprenos sintéticos (IR)

Estos cauchos dependiendo del material fabricado y los procesos de obtención tienen diferentes características, sin embargo una vez vulcanizados todos poseen la característica de ser muy duraderos y por ende necesitaran de un mayor tiempo para su degradación. En el proceso de vulcanizado se agregan otros elementos como activadores, tales como magnesio u óxido de zinc esto con el fin de reducir el tiempo de vulcanizado de horas a solo minutos. Se suele agregar antioxidantes a las llantas para evitar la degradación del caucho por el oxígeno y ozono, negro de humo para darle a la llanta una mayor resistencia a la abrasión, Otros componentes de las llantas son:

- Rellenos reforzantes – el negro de humo que son pequeñas partículas de carbono las cuales aumentan la resistencia del neumático a la abrasión.
- Fibras de refuerzo – las cuales pueden ser de acero o textiles y aportan resistencia y estructura a la llanta.
- Plastificantes – proporcionan una mejor viscosidad para facilitar el manejo y preparación, además de proporcionar una mejor flexibilidad a bajas temperaturas.
- Agentes vulcanizantes - principalmente el azufre para entrecruzar las cadenas poliméricas en compañía de temperatura.
- Acelerantes –aceleran el proceso de vulcanización del caucho los cuales son óxido de zinc, ácido esteárico, sulfurados, benzotiazol y derivados.

Las proporciones de los materiales con lo que están fabricados las llantas según la asociación de fabricantes de caucho (Rubber Manufacturers Association) para el uso de pasajeros como vehículos pequeños, camionetas y de carga están dados en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Composición y proporciones de los materiales de las llantas para vehículos de pasajeros y vehículos de carga.

Material	Contenido en porcentaje	
	Automóviles y camionetas	Vehículos pesados
Caucho natural	14	27
Caucho sintético	27	14
Negro de humo	28	28
Acero	14 – 15	14 - 15
Fibra textil, antioxidantes	16 -17	16 - 17

2.11.1 Impacto ambiental provocado por las llantas de caucho

Un estudio realizado por la SEMARNAT estima que anualmente en el país se desecha 25 millones de llantas, este valor equivale a un cuarto de llanta por habitante, en comparación con Estados Unidos se desecha una llanta por habitante, de este número de llantas desechadas 9 de cada diez termina en un tirado a cielo abierto o rellenos sanitarios lo que también podría abarcar terrenos baldíos o diseminadas en calles. De los 25 millones de llantas el 91 % es abandonado, 5 % de estas llantas pasan por el proceso de renovación para devolverle su vida útil, 2 % se deposita en centros de acopio para un uso en específico y 2 % se utiliza como combustible a través de su quema en hornos de cemento.

Las características provenientes de caucho vulcanizado lo hace un material altamente resistente y durable, es por eso que la degradación de este material puede tardar varios años. La fabricación masiva de llantas es un grave problema de contaminación de los últimos años por el alto coste de producción y también de desaparición, la quema de neumáticos a cielo abierto es un problema por la cantidad de gases tóxicos que se liberan al ambiente y dañinos para la salud por la emisión de monóxidos de carbono, óxidos de nitrógeno, dióxidos de carbono, óxidos de zinc, bencenos, fenoles y óxidos de plomo. Las llantas en desuso no solo contaminan al ser quemadas sino que también pueden afectar al ambiente de varias formas como son:

- Las llantas por su diversidad de tamaños son consideradas un residuo voluminoso que ocupa espacios considerables en los rellenos sanitarios o tiraderos a cielo abierto.
- Son focos de infección y proliferación de fauna nociva, en tiempos de lluvia debido a su forma las llantas pueden retener el agua en su interior, por lo cual es foco de incubación de mosquitos transmisores

de enfermedades como la malaria, paludismo, dengue, zika entre otras.

- Son contaminantes visuales, debido a que después de su vida útil no tienen un reusó aparente, las llantas son desechadas o botadas en medio de calles o terrenos baldíos lo que genera una mala imagen.
- Fuente de incendios, debido a los amontonamientos es muy fácil que estos puedan llegar a incendiarse con relativa facilidad liberando grandes cantidades de humos tóxicos perjudiciales para la salud humana y medio ambiente.



Figura 2.14. Incendio causado por el amontonamiento de llantas.

2.11.2 Impacto de la proliferación de fauna por causa de las llantas

Los parásitos son aquellos virus, bacterias, helmintos o protozoos que dependen de otro organismo para vivir, el agua estancada en su interior y la luz y calor del ambiente provoca la reproducción de fauna nociva y principalmente los mosquitos Según la SEMARNAT las especies de fácil reproducción en las llantas son *Aedes sollicitans*, *Anopheles*, *Coliseta*, *Celex*, *Melanura*, entre otras.



Figura 2.15. Debido a la forma de las llantas es muy fácil que el agua de lluvia se estanque en su interior provocando la proliferación de fauna nociva.

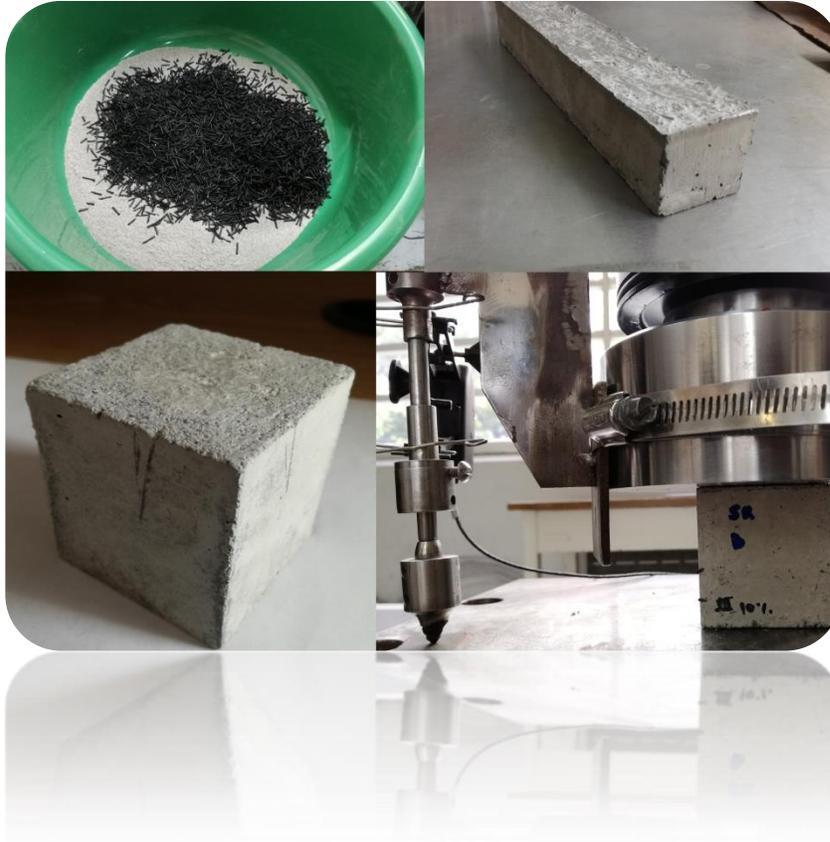
2.12 Reciclado y reutilizado de llantas

En países de Europa y Estados Unidos existen empresas y normas que se encargan de regular el abandono de llantas en vertederos, en América Latina países como México Chile y Argentina están adoptando estas políticas, en Estados Unidos en el año 2003, 290 millones de llantas desechadas, 45 millones se reciclaron para hacer nuevas llantas para automóviles y camiones.

Uno de los usos más comunes que se le da a las llantas sobrantes es como combustible, según la asociación de fabricantes de caucho (RMA) en 2005 en Estados Unidos el 52 % de las llantas fueron utilizadas como combustible. Según la agencia europea de fabricantes de llantas y cauchos (ETRMA) en Europa la cifra fue de un 31 %. Para aprovechar los materiales y caucho de las llantas hay distintos procesos los cuales se mencionan a continuación:

- Termólisis – consiste en la incineración en un ambiente controlado o libre de oxígeno, este proceso romperá los enlaces químicos dando lugar a la aparición de cadenas de hidrocarburos.

- Pirolisis –involucra la degradación térmica en un ambiente controlado y con temperaturas entre 600 °C y 800 °C, dando como resultado la obtención de cera, oleofinas y hollín.
- Pirolisis de baja temperatura – en este proceso se descomponen los residuos en aceites de bajo punto de fusión aproximadamente a 400 °C utilizando cera de polietileno.
- Pirolisis de alta temperatura - Las temperaturas en este proceso van de un rango desde los 630 °C hasta los 877 °C.
- Incineración – es un proceso en el cual la llanta se transforma en un producto gaseoso y residuos sólidos inertes compuestos por escorias y cenizas, debido al proceso de combustión controlada, este proceso es altamente contaminante por la cantidad de gases tóxicos que emiten.
- Trituración – es un proceso mecánico en el cual la llanta se muele en partículas más pequeñas y uniformes, este proceso es necesario cuando se pretenda utilizar como combustible u otros procesos para la manufactura de materiales secundarios.
- Trituración criogénica –para este proceso se utiliza nitrógeno líquido para congelar las llantas y obtener un menor tamaño de partículas y facilitar la extracción de los materiales de acero y textiles de las llantas.



Capítulo 3

Desarrollo experimental

3.1 Proporcionamiento de las mezclas de concreto

Para este proyecto se realizaron 6 mezclas distintas de concreto, 5 mezclas de concreto adicionada con caucho y una mezcla de control sin caucho. El criterio de proporcionamiento de las mezclas se realizó consultando las cantidades recomendadas por el fabricante CEMEX, las cantidades están proporcionadas en relación a una cantidad de 50 kg de cemento la tabla 3.1 indica el proporcionamiento adecuado de agua – cemento y de los agregados (arena y grava).

Tabla 3.1. Proporciones de los diferentes agregados utilizados en la mezcla de concreto.

Material	Cantidad
Cemento	50 Kg
agua	0.024 m ³
Arena	0.054 m ³
Grava	0.072 m ³

En la tabla se muestran las cantidades de cemento, agua, arena y grava necesarias para obtener una mezcla de concreto con una resistencia de 250 Kg/cm² después de los 28 días de curado, esto en las condiciones y siguiendo la norma ASTM C39 para probetas cilíndricas de concreto, las proporciones han sido aprobadas por el Instituto Mexicano del Cemento Y Concreto.

Siguiendo las proporciones para realizar el concreto se realizaron los cálculos los cuales incluye el porcentaje de caucho agregado en cada mezcla y los cuales aparecen en la tabla 3.2, estas seis mezclas incluyen los porcentajes de 5 %, 10 %, 15 %, 20 % y 25 % de caucho, además de la mezcla de control donde las proporciones permanecen constantes y corresponde a la mezcla 1, la mezcla 2 corresponde a 5 % y continúan sucesivamente conforme el aumento del caucho.

Tabla 3.2. Porcentajes de las diferentes mezclas de concreto adicionado con caucho.

Material	Mezcla I	Mezcla II	Mezcla III	Mezcla IV	Mezcla V	Mezcla VI
Cemento %	9.56	9.09	8.61	8.13	7.65	7.17
Gravilla %	43.40	41.23	39.06	36.89	34.72	32.55
Arena %	32.55	30.92	29.30	27.67	26.04	24.41
Agua %	14.46	13.74	13.02	12.29	11.57	10.85
Caucho %	0	5	10	15	20	25

3.2 Materiales utilizados para las mezclas de concreto

Para elaborar las mezclas de concreto se utilizó cemento portland compuesto marca CEMEX TOLTECA CPC 30R que una vez fraguado desarrolla una resistencia de 30 MPa y 20 MPa a los tres días de fraguado, se eligió este cemento por ser de uso común y el más utilizado para las obras por su versatilidad, posee características como resistencia a los sulfatos, bajo calor de hidratación por lo que puede estar en contacto directo con los suelos y ser usado en miembros de alcantarillado.

Como agregados para el concreto se empleó grava y arena ordinarios, las cuales se consiguieron de un distribuidor local y han sido graduadas desde la mina donde son extraídas, desafortunadamente el banco de donde se minaron no fue proporcionado por el dueño.

El agregado fino o arena antes de realizar el proceso de mezclado se optó por extenderla en una superficie libre de humedad y dejarla secar por al menos una semana para eliminar cualquier rastro de humedad que pudiera contener y afectar el contenido de agua en la mezcla de concreto, finalmente aunque esta arena ya había sido graduada en la mina de extracción se optó por cribarla una vez más para así eliminar aquellas partículas de mayor tamaño que pudieron haberse infiltrado en los procesos de transporte y

almacenamiento, para ello se utilizó una criba del número 18 y de tamaño de abertura de un milímetro como se muestra en la imagen 3.1.



Figura 3.1. Arena utilizada para la fabricación de las mezclas de concreto, tamizada en una criba del número 18.

En el caso del agregado grueso o gravilla se utilizó el mismo proceso de secado que la arena para eliminar cualquier resto de humedad que pudiera contener, debido a los métodos de almacenamiento a la intemperie y pudiera afectar la proporción agua – cemento. En el presente trabajo, a la grava utilizada y previo a su uso, se le dejó en reposo durante una semana para permitir que se secase.

La gravilla tiene un tamaño de entre 4.71 mm y 19.1 milímetros el cual ha sido graduado desde el proceso de minado y triturado, el tamaño de la gravilla se muestra en la figura 3.2.



Figura 3.2. Gravilla empleada para las mezclas de concreto, con tamaño promedio de un centímetro de diámetro.

Para este proyecto se emplearon tres tamaños y morfologías distintas de partículas de caucho, las cuales por sus formas variadas y después de haber revisado la literatura no se encontró trabajos de investigación acerca de estas morfologías las cuales se emplearon en este trabajo, el caucho fue obtenido de diferentes maneras según su morfología y poseen características que los diferencian unas de otras y se nombran a continuación:

Caucho en polvo - El cual se obtuvo por medio de molienda mecánica, se empleó un cepillo de alambre con el cual se fue desgastando la superficie de la banda de rodamiento de la llanta hasta obtener las partículas de caucho mismas que se hicieron pasar por una criba del número 20 y una abertura de 0.84 mm, esto con el fin de tener un tamaño similar y menor a esa medida como se aprecia en la imagen 3.3, la forma de estas partículas es irregular y tienden a aglutinarse unas con otras muy similar a un polvo.



Figura 3.3. Caucho en polvo obtenido por desbaste de la banda de rodamiento y cribado.

Caucho en fibras - Este tipo de morfología de caucho se obtuvo mediante la molienda y triturado de la llanta por medios mecánicos, separando los

materiales de acero y fibras de nylon del caucho, a diferencia del caucho en polvo este proceso fue realizado por un tercero el cual disponía del equipo necesario por lo que las fibras se entregaron en diferentes tamaños, para su clasificación se hizo pasar por una criba del número 16 y con una abertura de 1.19 mm, las fibras y tamaños resultantes se muestran en la figura 3.4, se observa que sus formas son irregulares y mayormente alargadas aunque puede haber un bajo porcentaje de éstas que se han colado que son más cortas, muy similar a un caucho rayado debido a la delgadez de estas fibras.



Figura 3.4. Caucho en fibras las cuales han sido pasadas por una criba del número 16.

Caucho en fibras cilíndricas – Este tipo de morfología de caucho se obtuvo de los desperdicios de una fábrica de llantas, posee una forma cilíndrica y tamaños de entre 8 mm a 11 mm de largo y dos milímetros de diámetro, estas partes de caucho son llamadas típicamente pelos de llantas, son sobrantes que se forman durante el proceso de inyectado del caucho y que al final del proceso de producción de la llanta son retirados por lo que se podría considerar un caucho en buen estado y sin ningún tipo de degradación debido a agentes externos, la imagen 3.5 muestra este tipo de caucho.



Figura 3.5. Caucho en fibras cilíndricas, poseen un tamaño de entre 8 mm y 11 mm y 1 a 1.5 mm de diámetro en promedio.

3.2.1 Difracción de rayos x

Para caracterizar y conocer las distintas fases cristalinas presentes en los materiales para fabricar el concreto se utilizó la técnica por medio de difracción de rayos x, esta técnica nos permite comparar patrones de difracción desconocidos con los patrones de compuestos conocidos, por lo que procedió a preparar las muestras en polvo del cemento, arena, grava y caucho, debido a que tanto el cemento, arena y caucho ya se encuentran en partículas muy finas solo se procedió a graduarlos por medio del cribado para tener un tamaño de partícula uniforme, mientras que para la grava por tener un tamaño de partícula más grande se tuvo que recurrir al molinado por medio del molino planetario de bolas.

El molino planetario de bolas se utiliza para moler finamente materiales duros o semiduros, esto ocurre mediante los impactos de esferas fabricadas de un material resistente sobre vasos de molienda rotativos, la molienda de la grava no necesito ningún ambiente controlado por lo que se procedió a verter la grava en los dos vasos de molienda hasta tres cuartos del volumen y las esferas como se muestra en la figura 3.6.



Figura 3.6. Grava antes y después del proceso de molinado.

Se cerraron los vasos de molienda y se procedió a colocarlos dentro del molino, se programó 300 revoluciones por minuto durante 4 minutos, después de este tiempo se procedió a retirarlos teniendo como resultado un polvo más fino el cual aparece en la figura 3.6, se realizó el proceso de cribado para obtener un tamaño de partícula más uniforme y estar listo para el análisis por medio de difracción de rayos x.



Figura 3.7. Difractómetro de rayos-x marca XRD Bruker Modelo D2 PHASER.

Para la caracterización de las muestras por medio de difracción de rayos x se utilizó la máquina XRD Bruker D2 PHASER figura 3.7 el cual es un equipo de sobremesa, se encuentra en el CIICAp. Se vertió el polvo de la muestra en un portamuestras redondo y se niveló con ayuda de un portaobjetos de vidrio, se programó la máquina antes de iniciar el análisis en un rango de 2θ

de 5 a 80 grados y se inició el análisis para finalmente obtener los datos experimentales de difracción de la muestra y se procedió a compararlos con los datos de difracción de los compuestos puros y así identificar las fases presentes.

3.3 Elaboración de las mezclas de concreto y caucho

Para elaborar las muestras de concreto y caucho se debió tener en cuenta el volumen de concreto que se utilizaría para el llenado de los moldes, se elaboraron seis distintas mezclas de concreto donde cinco de ellas pertenecían a mezclas de concreto con distintas proporciones de caucho como se muestra en la tabla 3.3, y una mezcla de concreto sin caucho como mezcla de control para obtener un punto de comparación.

Tabla 3.3. Proporciones utilizadas de concreto - caucho para las muestras.

Muestra	Contenido de caucho (%)	Contenido de concreto (%)
M1	0	100
M2	5	95
M3	10	90
M4	15	85
M5	20	80
M6	25	75

Para la fabricación de las mezclas de concreto se procedió al pesaje de los diferentes materiales el cemento, arena, gravilla y caucho, para posteriormente verter en principio los agregados más finos (cemento y arena) en un recipiente como lo muestra la imagen 3.8, se mezclaron manualmente hasta tener un aspecto homogéneo y posteriormente se vertió el caucho continuando con el proceso de mezclado hasta que se observara una

distribución homogénea del caucho en la mezcla para a continuación agregar la gravilla por ser el agregado grueso y por ende de mayor tamaño y finalmente el agua, cabe destacar que debido a la cantidad de caucho y la pobre trabajabilidad que presentaba la mezcla se tuvo que recurrir a la adición de una mayor cantidad de agua por lo que la proporción agua-cemento se vio afectada, se realizaron movimientos envolventes para evitar la segregación de los elementos, al final el concreto resultante tuvo un aspecto firme donde los agregados y el caucho se encuentran suspendidos dentro de la pasta de cemento como lo muestra la imagen.



Figura 3.8. Proceso de fabricación de las mezclas de concreto y caucho.

El vertido de estas mezclas se realizó en un molde desmontable fabricado de madera y previamente aceitado en las paredes esto con el fin de que la madera no absorbiera la humedad del concreto y también para facilitar el desmolde sin adherirse restos de concreto, el molde de sección cuadrada de 5 cm de lado y de 30 cm de largo, con el fin de diseccionar el tabique de concreto resultante en cubos, se utilizó este molde por la facilidad de fabricación, colado y desmolde en comparación con un molde cúbico de 5 cm que presentan más problemas debido a su tamaño.

Las mezclas resultantes fueron vertidas en los moldes previamente aceitados que se observan en la figura 3.9 para su fácil desmolde, el vertido de la mezcla de concreto fue realizado a través de tres capas que representaban un tercio del contenido del molde cada una, entre cada capa se procedía a realizar el compactado de la mezcla con una varilla pisón, la cual su punta es semiesférica y permite que la mezcla de concreto se asiente de una mejor forma eliminando la mayoría de las burbujas de aire o imperfecciones ocasionadas por los espacios entre capas, no se realizaron más de 30 apisonamientos entre cada capa para evitar la segregación.



Figura 3.9. Elaboración de probetas de concreto para la prueba de compresión.

Una vez cumplido con el vertido y compactado de las tres capas de concreto, se rellenó el molde al tope y con un rasero de metal se procedió a realizar el aplanado de la superficie eliminando cualquier exceso de mezcla y tratando que la superficie estuviera a nivel de las orillas del molde sin tener un aspecto con depresiones o relieve que afectara cuando se realizara la prueba de compresión.

El desmolde de las muestras se realizó pasadas las 24 horas después de su moldeo como se muestra en la imagen 3.9, para ello se tuvo cuidado en retirar las paredes del molde para evitar fracturar las esquinas de la muestras que aunque el concreto ya se encontraba fraguado la cantidad de humedad y el proceso de hidratación aún se estaban llevando a cabo.

Para el proceso de curado una vez desmoldados las muestras se siguió la norma NMX-C-148 ONCE que especifica las condiciones de curado húmedo, por lo que se procedió a sumergir las muestras inmediatamente en un recipiente lleno de agua potable sin ningún aditivo y se mantuvieron en ese estado hasta pasado los 28 días de curado que especifica la norma.



Figura 3.10. Seccionado del bloque de concreto.

Los bloques de concreto pasaron a ser divididos mediante el corte de estos por medio de un disco de diamante y como se observa en la imagen 3.10, la sección de corte dio como resultado cubos de 5 cm de lado que serían empleados para la prueba de compresión, así mismo gracias al corte realizado en el tabique de concreto para la disección de los cubos se pudo ver la distribución de los agregados y de las partículas de caucho que se puede observar en la imagen 3.11, en ella se observa como cada elemento

está completamente cubierto por la pasta de cemento y en el caso de la gravilla no están en contacto directo con otras gravillas si no que están suspendidas, no se observa segregación de los agregados así como poca porosidad o huecos formados durante el vertido de la mezcla en el molde, las partículas y fibras de caucho se pueden apreciar y están indicadas en la figura 3.11 a pesar de que la mezcla tiene un porcentaje de 5 % caucho.



Figura 3.11. Cubo de concreto empleado para la prueba de compresión y vista transversal.

Los cubos fueron empacados y marcados para protección y fácil identificación además de ser almacenados hasta su ensayo para evitar fracturas por golpes o caídas, en total se realizaron 48 cubos figura 3.12, 3 cubos por cada mezcla y 3 distintas morfologías.



Figura 3.12. Muestras para la prueba de compresión empacadas.

3.4 Pruebas de compresión del concreto con caucho

Los ensayos de compresión fueron realizados en la máquina de ensayos universales Instron 4206 figura 3.13 con una capacidad máxima de 15000 kg y que se encuentran en la Facultad de química de la Universidad Nacional Autónoma de México, la máquina se controla mediante el software pDaqView y una consola central que permite el control de los parámetros como el tipo de ensayo, velocidad del cabezal, dimensiones de la probeta entre otros.



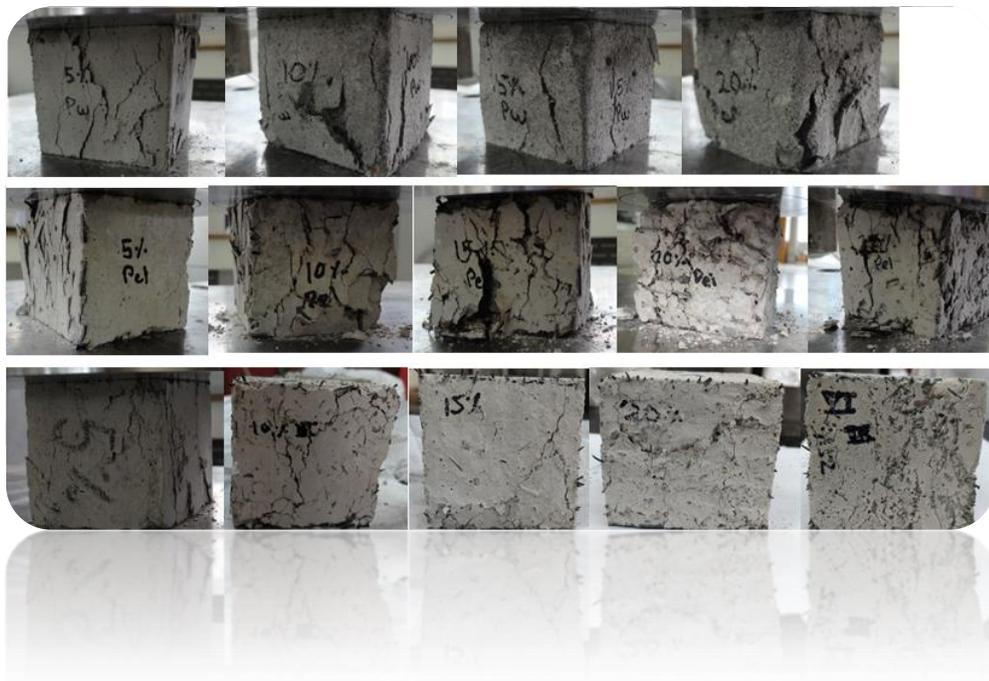
Figura 3.13. Máquina de ensayos universales Instron 4206.

Para las pruebas de compresión se colocó la probeta de concreto sobre la placa de la base y se centró antes de bajar el cabezal que aplica la carga, se tuvo mucho cuidado con la velocidad de desplazamiento del cabezal para que está no golpeará el cubo y por ende causara una fractura, la precarga utilizada sobre el cubo antes de iniciar la prueba fue de 1 kg aproximadamente y la velocidad de compresión que se utilizó durante la prueba fue de 0.1 mm/min, se tuvo mucho cuidado de colocar adecuadamente el extensómetro el cual su función es medir la distancia que se ha movido el cabezal figura 3.14, una vez verificado los pasos anteriores se puso en operación la máquina y se detuvo hasta que el cabezal ha

alcanzado dos milímetros en compresión sin importar el tipo de muestra que se tratara, el cabezal se regresó a su posición inicial manualmente y se retiró la probeta cuidadosamente para no dañar o despedazar la muestra ya fracturada, se retiraron los fragmentos de concreto desprendidos de la placa de la máquina antes de poner e iniciar una nueva prueba.



Figura 3.14. Prueba de compresión, el cabezal comprime el cubo y el extensómetro registra el desplazamiento de éste.



Capítulo 4

Resultados y discusión

4.1 Resultados de difracción de rayos X

Cemento – Los resultados de difracción de rayos X del cemento portland CPC 30R se muestra en el difractograma de la imagen 4.1, en ella se observa la identificación de las fases cristalinas encontradas en cada pico característico y su nomenclatura dependiendo del tipo de fase cristalina.

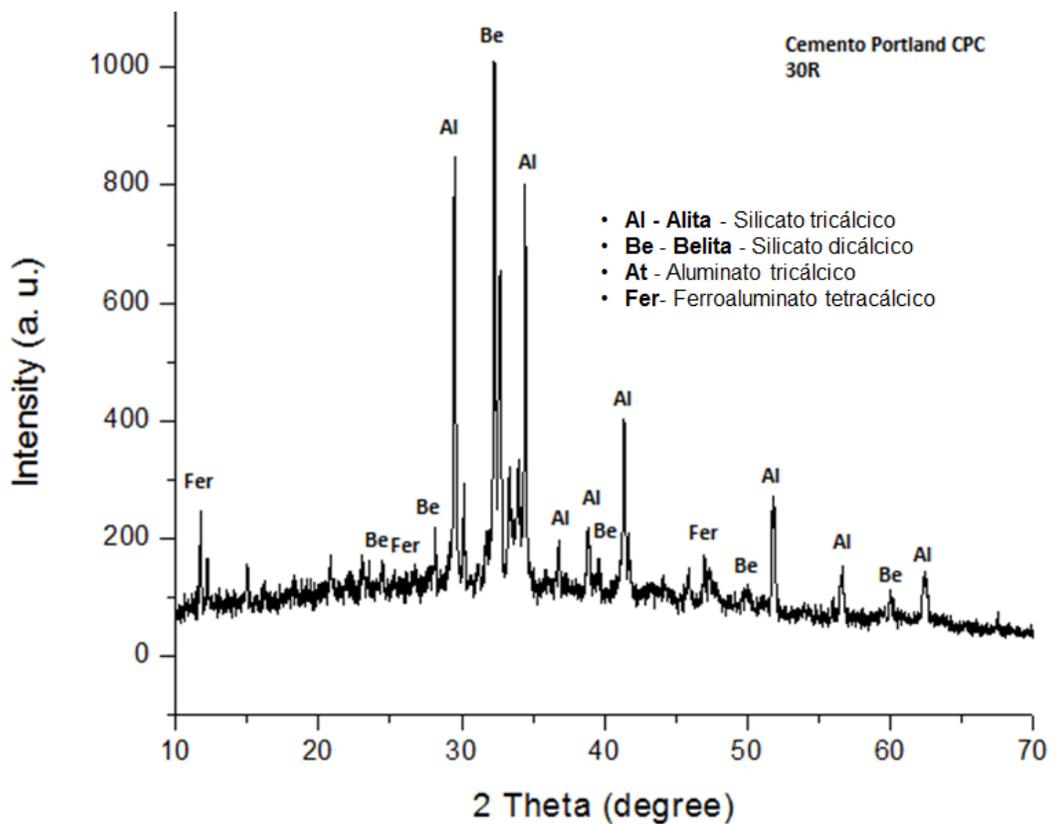


Figura 4.1. Difractograma del cemento portland con identificación de los picos y sus fases cristalinas.

De acuerdo a la literatura (Kosmatka 2004) se observan las 4 fases cristalinas esperadas, la alita o silicato tricálcico que al ser un cemento de la clasificación R se encarga del fraguado, el endurecimiento y desarrollo de resistencia a una edad temprana, la belita o silicato dicálcico que se encarga del desarrollo de resistencia de manera gradual y lenta, aluminato tricálcico

el cual es el responsable de la liberación de calor una vez inicia el proceso de hidratación y fraguado, al ser un cemento portland compuesto, este elemento ayuda en la resistencia a los suelos y aguas sulfatadas, finalmente el ferroaluminato tetracálcico que no tiene mayor función que darle el color gris característico del cemento y es un desecho del proceso de clinckerizado.

Arena - el difractograma de la muestra de arena se muestra en la figura 4.2 en ella se observa la identificación de las fases cristalinas encontradas en cada pico así como su nomenclatura.

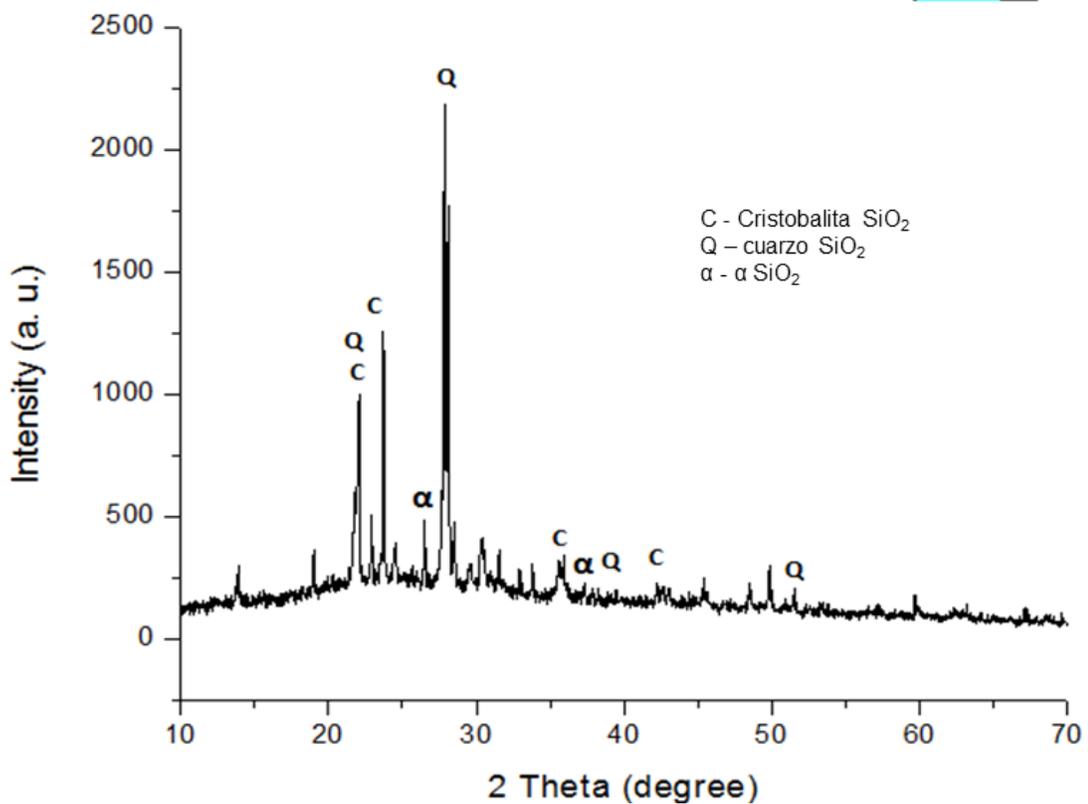


Figura 4.2. Difractograma de rayos-x de la arena con su nomenclatura de las fases cristalinas identificadas.

Como se puede ver la mayoría de los picos corresponde a las formas alotrópicas del dióxido de silicio o comúnmente llamado sílice, la forma más común encontrada en las arenas es el sílice en forma de cuarzo como

aparece en los picos, algunas formas de cristobalita y cuarzo- α también están presentes en la muestra de arena.

Grava – el difractograma de la muestra de grava se muestra en la figura 4.3, en ella se muestra la identificación de las fases cristalinas de los picos así como su nomenclatura.

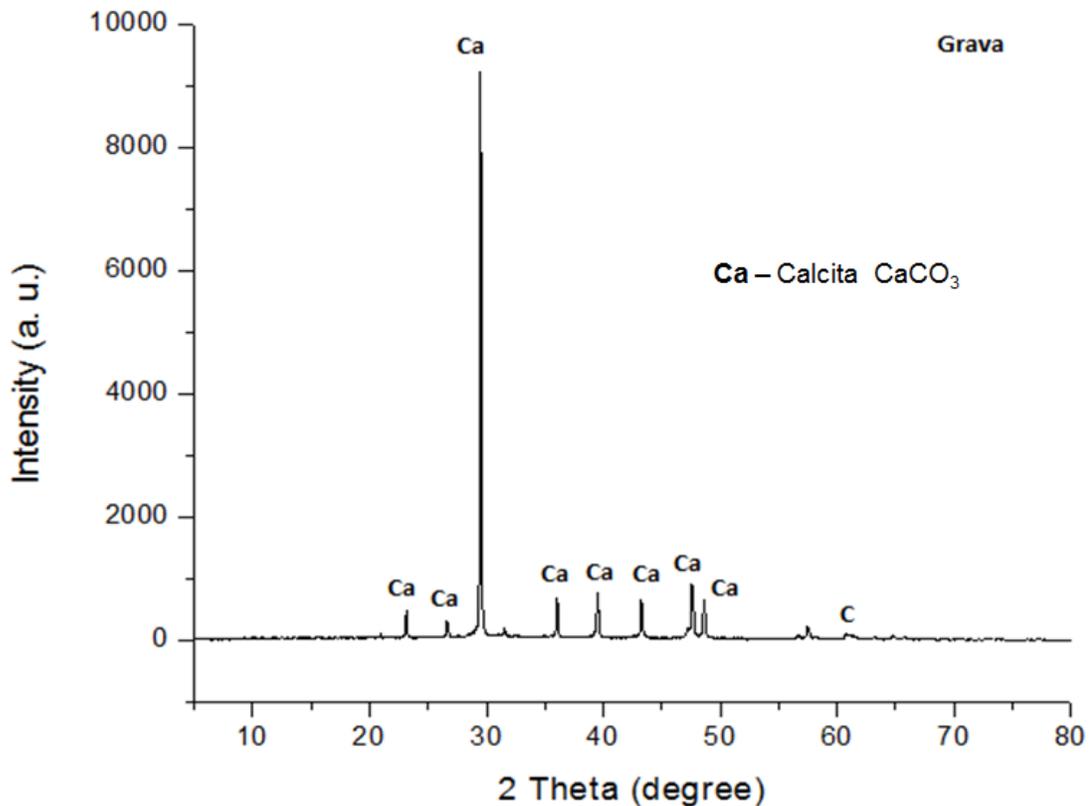


Figura 4.3. Difractograma de la muestra de grava con la identificación de las fases cristalinas y nomenclatura.

Se muestra que la fase cristalina presente en la grava es la calcita (CaCO_3), por lo que se puede inferir que la grava se obtuvo de la trituración de la piedra caliza, este tipo de piedra es utilizada principalmente como materia prima para la fabricación de cemento por medio de su calcinación.

Caucho – el difractograma de la muestra de caucho se muestra en la figura 4.4 así como la identificación de las fases cristalinas.

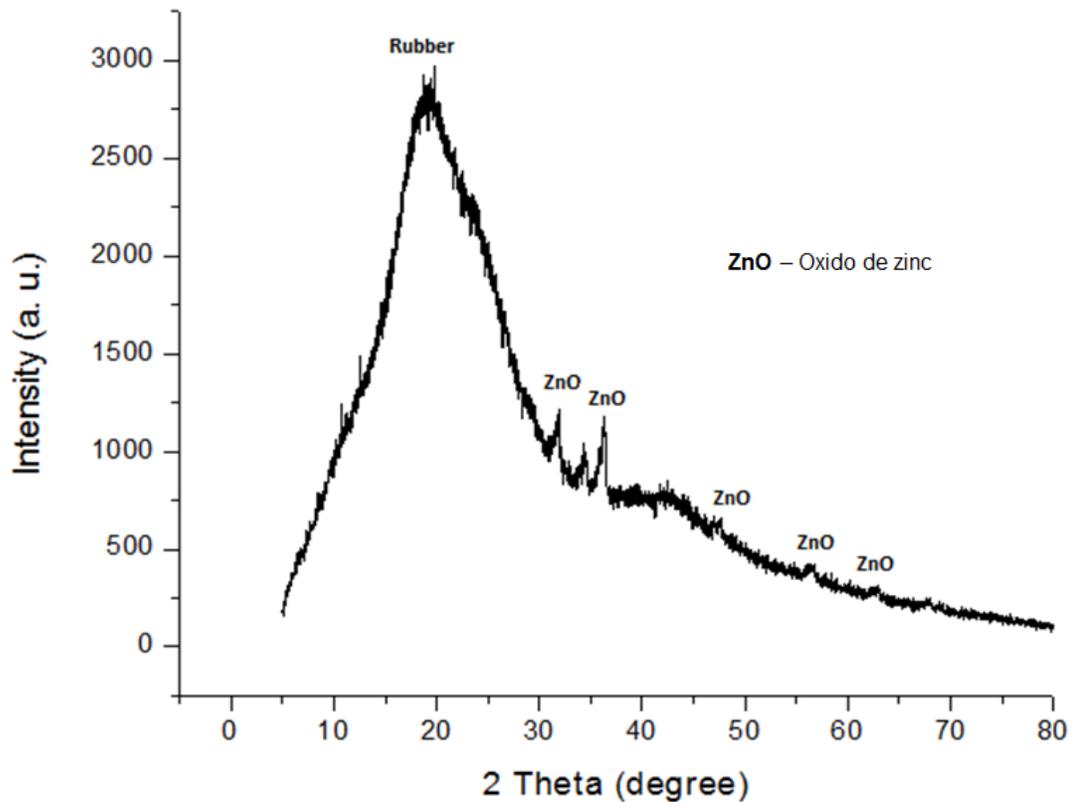


Figura 4.4. Difractograma del caucho adicionado a las probetas de concreto.

Como se observa en la figura 4.4 se observa que principalmente el caucho utilizado en la mezcla de concreto es amorfo y no posee estructura cristalina, sin embargo se observa algunos picos correspondientes al óxido de zinc, este compuesto se utiliza principalmente como acelerante del proceso de vulcanización del caucho.

4.2. Resultados de la prueba de compresión

Caucho en polvo - los resultados de la prueba de compresión a los 28 días para el concreto adicionado con caucho en polvo se muestran en la figura 4.5, en ella se muestra la resistencia en relación al contenido de caucho.

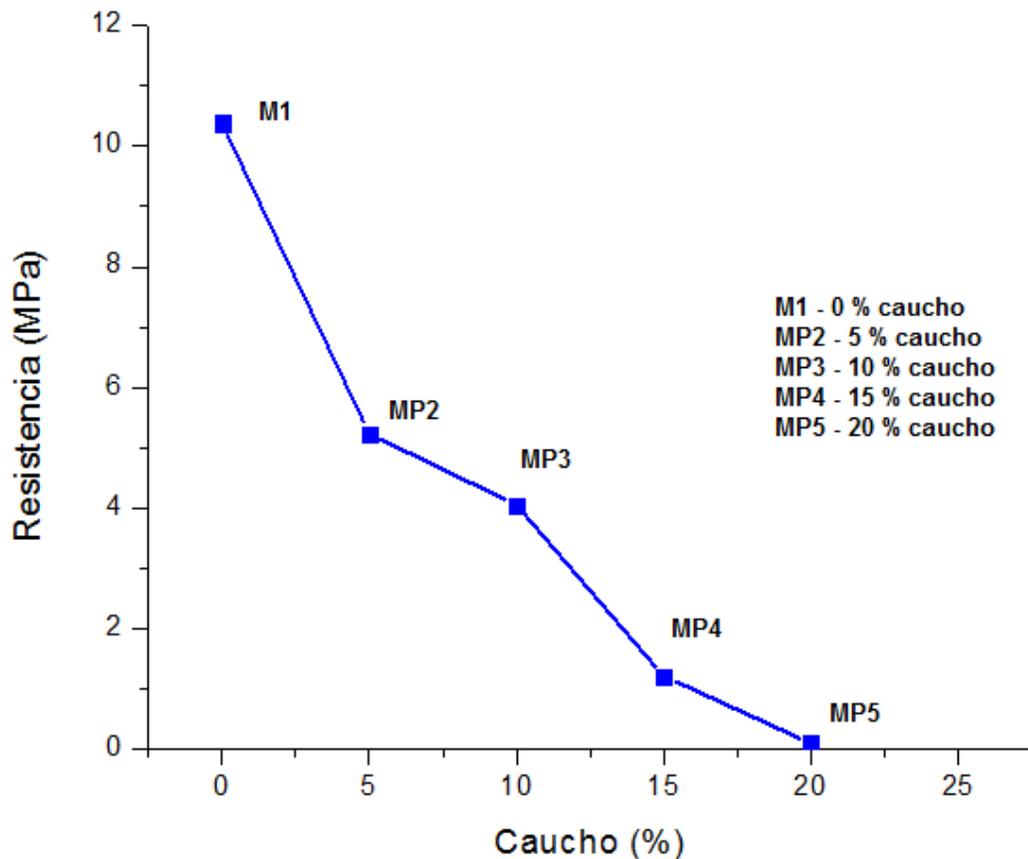


Figura 4.5. Gráfica de resistencia en relación al contenido de caucho en polvo.

El punto M1 corresponde a la mezcla de concreto sin caucho con un valor de 10.38 MPa y los siguientes puntos a las muestras con caucho, se observa una disminución de la resistencia conforme el contenido de caucho en las muestras de concreto aumenta, la resistencia de la muestra MP2 disminuye hasta casi el 50 % en relación a la muestra M1, en tanto la muestra MP3 presenta valores cercanos a los 4.048MPa, los valores de

resistencia para las muestras MP4 y MP5 ha sido de apenas de 1.207 MPa y 0,094 MPa respectivamente, debido a la reducción significativa de resistencia para las muestras con alto contenido de caucho la muestra MP6 no ha sido posible ensayarla debido a su pobre resistencia.

La figura 4.6 muestra el cubo correspondiente a la muestra M1 después de haber realizado la prueba de compresión, todos los cubos fueron llevados hasta los dos milímetros de deformación antes de detener la máquina por lo que todos representan la misma deformación.



Figura 4.6. Muestra M1 de concreto con caucho en polvo después de la prueba de compresión.

Los cubos que se observan en la imagen 4.7, representan las mezclas de concreto tanto MP2 y MP3 contienen un 5 y 10 % de caucho en polvo respectivamente mientras que M1 es solo concreto, el modo de fractura que se puede ver en M1 es lineal, empieza desde la parte superior del cubo y sigue su recorrido hasta la parte inferior, a diferencia de los que contienen caucho su modo de fractura tiende a dispersarse a través de todo el cubo y como se puede ver en la muestra MP3 hay desprendimiento de material.

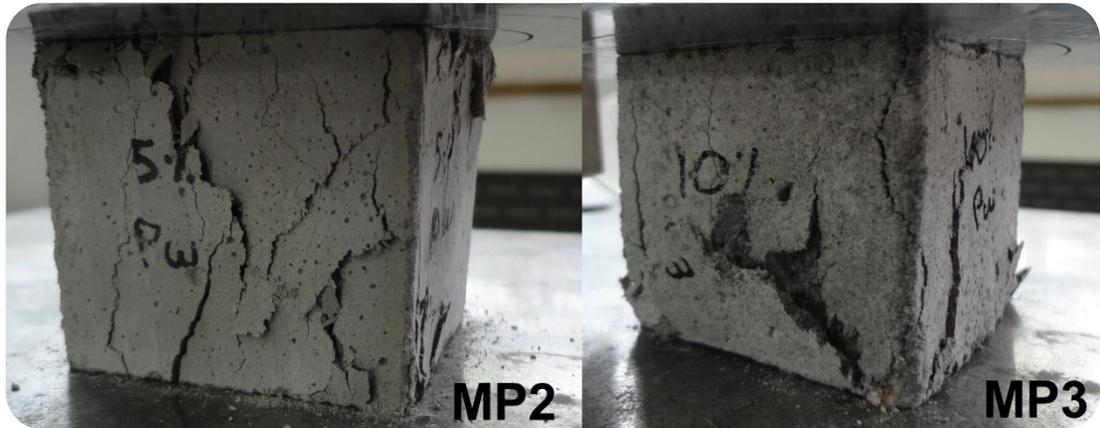


Figura 4.7. Muestras MP2 Y MP3 de concreto con caucho en polvo después de la prueba de compresión.

En la figura 4.8 se observa las muestras MP4 Y MP5 con contenidos de 15 y 20 % caucho, en ellos el modo de fractura es similar al visto en las muestra MP3 con direcciones irregulares y formación de fracturas internas que se dispersan aleatoriamente, por lo cual el caucho puede podría amortiguar y distribuir la fuerza de compresión de mejor manera que el concreto sin embargo la pérdida de resistencia debido al caucho es significativa.



Figura 4.8. Muestras MP4 y MP5 de concreto con caucho en polvo después de la prueba de compresión.

Caucho en fibras – los resultados de la prueba de compresión a los 28 días para las muestras de concreto adicionado con caucho en fibras se muestra en la figura 4.9, en ella se muestra la relación entre la resistencia y el contenido de caucho.

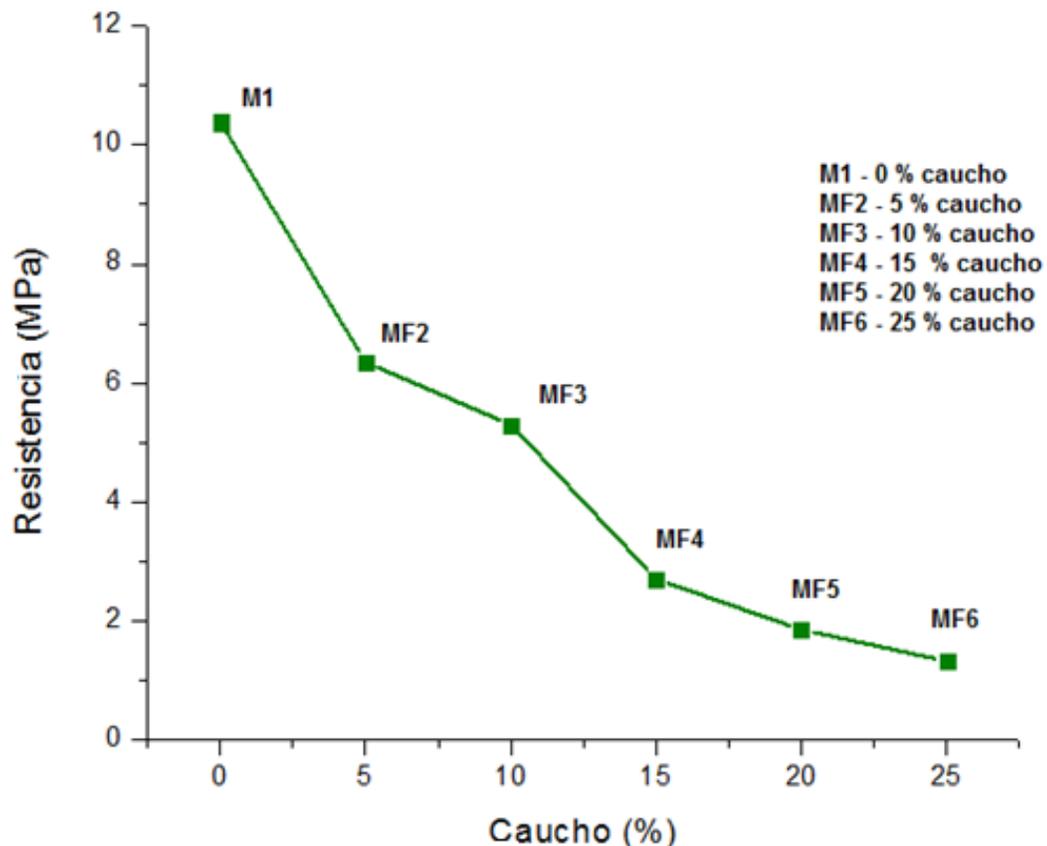


Figura 4.9. Gráfica de resistencia en relación al contenido de caucho en fibras.

La gráfica muestra la disminución de resistencia en relación al aumento de contenido de caucho para cada muestra, el valor MF2 representa una disminución de 39 % en relación a la muestra sin caucho y el valor de la muestra MF3 una disminución del 45.63 %, para las muestras MF4, MF5 y MF6 presentan valores de resistencia relativamente similares entre sí con 2.703 MPa, 1.853 MPa y 1.323 MPa respectivamente.

En la figura 4.10 se observa las muestras MF2 y MF3 con caucho en fibras después de haber sido ensayados por medio de la prueba de compresión, todas las muestras fueron llevadas hasta los dos milímetros de deformación antes de detener la máquina por lo que representan la misma deformación.

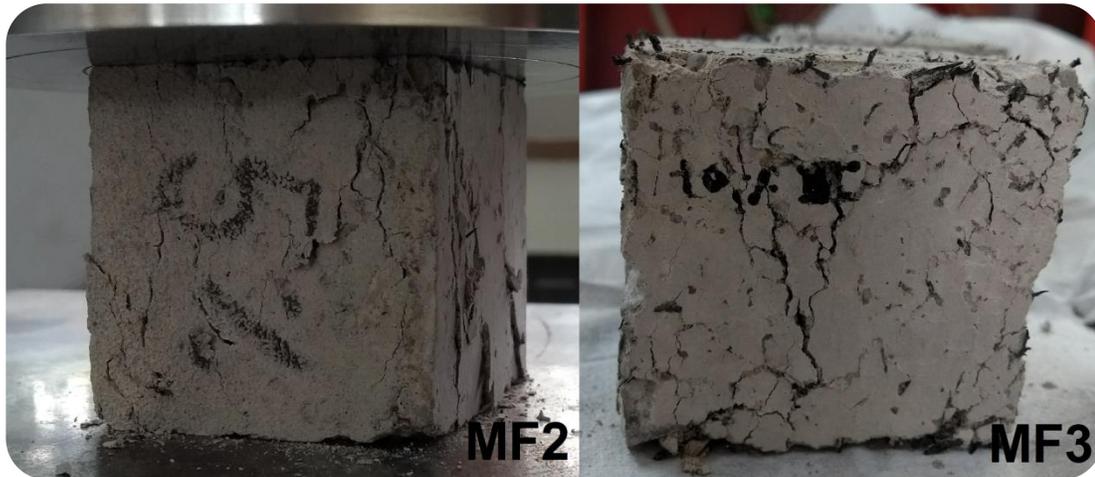


Figura 4.10. Muestras MF2 y MF3 de concreto con caucho en fibras después de la prueba de compresión.

La muestra M1 (figura 4.6) corresponde a la muestra sin caucho mientras que MF2 y MF3 a las muestras con 5 y 10 % de caucho en fibras respectivamente, se observa que el modo de fractura de la muestra M1 es catastrófico con desprendimiento de material, las fracturas comienzan desde la parte superior y se propaga rápidamente, para el caso de las muestras con caucho la formación de fracturas es dispersa y tiende a propagarse en direcciones en zigzag, se observa la formación de pequeñas fracturas en donde la propagación de éstas es posiblemente detenida por la adición de las fibras de caucho, no hay desprendimiento de material y los cubos de concreto con caucho permanecen en un sola pieza después de haber realizado la prueba de compresión.

En la imagen 4.11 se encuentran las muestras MF4, MF5 y MF6 de concreto con fibras de caucho, como se puede apreciar éstas no presentan fracturas grandes si no que el modo de fractura es por medio de la formación de grietas más pequeñas las cuales no tienden a propagarse a diferencia de la muestra M1.

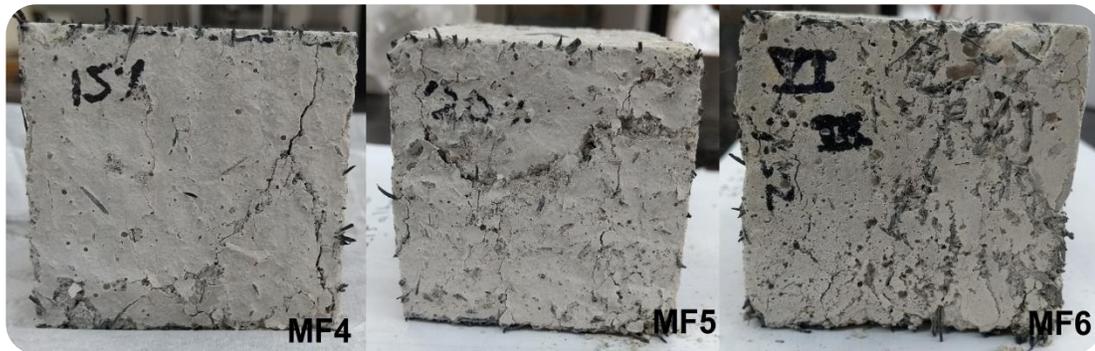


Figura 4.11. Muestras MF4, MF5 y MF6 de concreto con caucho en fibras después de la prueba de compresión.

Los cubos permanecieron en una sola pieza sin desprendimiento de material, esto debido a la adición de caucho de llanta en forma de fibras, estas fibras se anclan a la matriz de concreto y no permite la separación del material cambiando el comportamiento y propagación de las grietas, sin embargo debido al agregado grueso este anclaje de la fibra no es completo, la fibra solo se ancla en la parte de la pasta de concreto por lo que la grieta tiende a formarse y disiparse por medio del agregado grueso.

Caucho en fibras cilíndricas – los resultados de resistencia a los 28 días de la prueba de compresión se muestra en la figura 4.12, en ella se muestra la resistencia de las muestras en relación al contenido de caucho en forma de fibras cilíndricas.

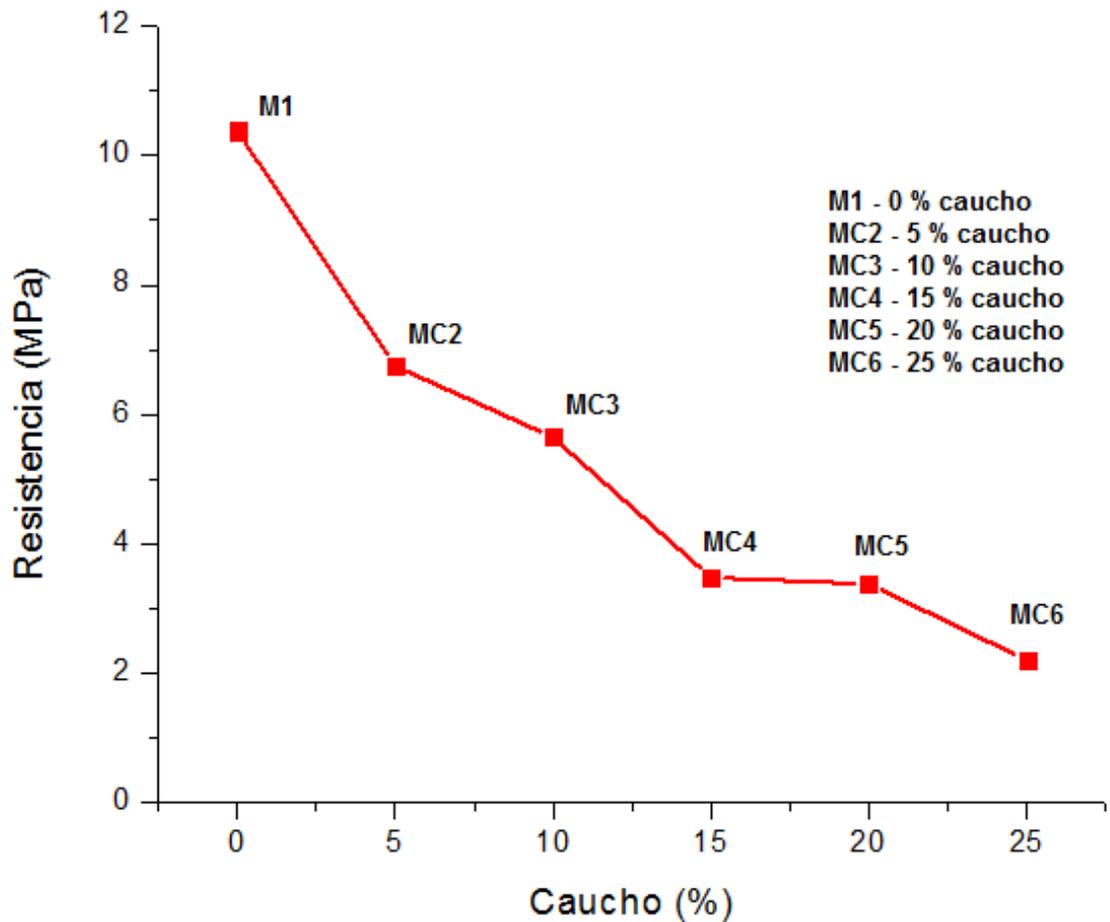


Figura 4.12. Gráfica de resistencia en relación al contenido de caucho en fibras cilíndricas.

Semejante a las demás morfologías, el caucho en fibras cilíndricas como adición al concreto tiende a reducir la resistencia a compresión, como se muestra en la gráfica la resistencia decae conforme el contenido de caucho aumenta, la resistencia de la muestra MC2 es menor en un 35 % en relación a la muestra M1 con 6.747 MPa, la muestra MC3 exhibe una resistencia de 5,644 MPa, para las muestras MC4 y MC5 los valores de resistencia son similares con 3.472 MPa y 3.377 MPa respectivamente y el valor de MC6 representa el valor más bajo de resistencia con 2.196 MPa.

Las figura 4.13 muestra las probetas MC2 y MC3 adicionadas con caucho en fibras cilíndricas después del ensayo de compresión, todas fueron llevadas a los dos milímetros de deformación antes de detener la máquina por lo que presentan la misma deformación.



Figura 4.13. MuestrasMC2 y MC3 de concreto con caucho en fibras cilíndricas después de la prueba de compresión.

Como se ve en la imagen las muestras MC2 y M3 presentan fracturas similares a las de M1 (Figura 4.6), hay desprendimiento de material para todas las muestras sin embargo la MC3 presenta una alta desfragmentación sin embargo, aunque presentan las grietas muy definidas las muestras MC2 y MC3 permanecieron en un una sola pieza pues las fibras cilíndricas presentaban un anclaje con la matriz de concreto la cual les permitía permanecer unidas.

En la figura 4.14 se observan las muestras MC4, MC5 y MC6, el modo de fractura de éstas es similar a las anteriores donde las grietas son muy remarcadas en el contorno de las mismas y se observa la separación de fragmentos de concreto del cubo sin embargo, las muestras permanecieron unidas por las fibras cilíndricas de caucho siendo más obvia esta propiedad en las muestras MC5 YMC6.



Figura 4.14. Muestras MC4, MC5 y MC6 de concreto con caucho en fibras cilíndricas después de la prueba de compresión.

Las resistencias y deformación para las diversas muestras de concreto adicionado con caucho en fibras, fibras cilíndricas y polvo se muestran en la tabla 4.1, en ella se muestra la comparativa entre las distintas morfologías del caucho.

Tabla 4.1. Promedio de la resistencia y deformación para las muestras de concreto con caucho en fibras, fibras cilíndricas y polvo.

Proporción concreto - caucho	Caucho fibras		Caucho fibras cilíndricas		Caucho polvo	
	ϵ (%)	σ (MPa)	ϵ (%)	σ (MPa)	ϵ (%)	σ (MPa)
100 - 0	2.359	10.38	2.359	10.38	2.359	10.38
95 - 5	0.972	6.351	1.406	6.747	1.4674	5.233
90 - 10	0.891	5.299	1.133	5.644	0.7897	4.048
85 - 15	0.881	2.703	0.961	3.472	0.7586	1.207
80 - 20	0.795	1.853	0.722	3.377	0.6966	0.094
75 - 25	0.727	1.323	0.546	2.196	-	-

Como se muestra en la tabla de las diferentes muestras adicionadas con caucho presentan la disminución de la resistencia conforme el contenido de caucho aumenta, esto puede deberse a que el caucho es un material menos resistente y rígido a diferencia de la matriz de concreto donde los agregados dan la rigidez a la mezcla, además que la adición de caucho puede afectar la gradación de los agregados.

Se observa en la tabla que las muestras con caucho en polvo presentaron la disminución de resistencia más significativa en relación a las otras morfologías de caucho empleadas, esto debido a que las partículas de caucho más finas tienen una mayor efecto en la resistencia del concreto que las partículas en forma de fibras, otro punto a consideración es que el polvo de caucho propicia la entrada de una mayor cantidad de aire durante el proceso de mezclado y ayuda a la formación de porosidad (Richardson y Coventry 2016), y por ende una menor resistencia, los valores de las muestras MP2 y MP3 poseen valores muy similares entre sí, mientras que los valores para las muestras MP4 y MP5 la reducción de resistencia es significativa por lo que no se recomendaría agregar más de 10 % de caucho en polvo a las mezclas de concreto, estas mezclas mostraron ser más ligeras al concreto normal por lo que se podrían emplear para aplicaciones no estructurales y aquellas donde la porosidad en el concreto sea importante como la resistencia al congelamiento y deshielo, pues permitiría que el agua pudiera ocupar los lugares vacíos causados por los poros sin que afecte la estructura de concreto.

Las muestras con caucho en fibras cilíndricas presentan la mayor resistencia en relación al contenido de caucho en comparación a las demás morfologías, además del modo de fractura se asemeja a la muestra M1 sin caucho siendo un fractura que se propaga en toda la muestra sin embargo la matriz de concreto permanece unida debido al anclaje que proveen las fibras, este anclaje es débil debido a la superficie lisa del caucho que impide tener

puntos de apoyo, según la literatura encontrada las fibras de caucho impiden la formación y propagación de grietas internas en la primera parte de la prueba sin embargo en cargas más altas y debido a la baja resistencia del caucho la matriz de concreto falla (Lijuan 2014).

Las muestras con caucho en fibras presentan buenas propiedades en relación a su morfología, al igual que las demás morfologías la adición de caucho al concreto reduce su resistencia sin embargo los valores de deformación de las muestras son similares y no difieren mucho de las muestras que le preceden, las probetas permanecieron en una sola pieza después de la prueba de compresión, esto ocurre por la adición de fibras de caucho que a diferencia de las fibras cilíndricas poseen un mejor anclaje al concreto debido a su forma irregular que permite tener una mejor adhesión mecánica con el concreto, la imagen 4.15 muestra las probetas MF2 y MF3 en vista transversal después de la prueba de compresión, permite observar la distribución del agregado grueso así como las partículas de caucho las cuales se alojan en la pasta de cemento, se observa en la muestra MF2 grietas definidas la cuales se propagan por medio de la pasta y el agregado grueso, la muestras MF3 se observa la aparición de grietas sin embargo estas se propagan principalmente por medio del agregado grueso.

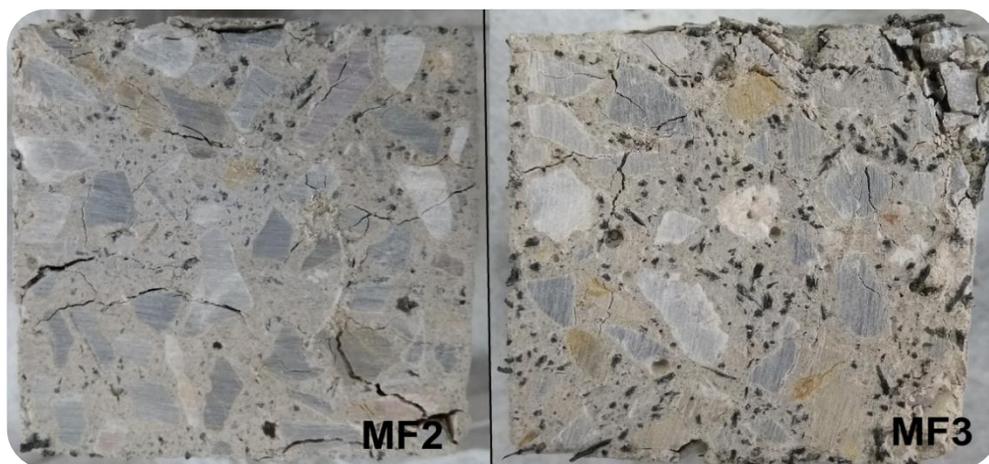


Figura 4.15. Vista transversal de las muestras MF2, MF3.

En la figura 4.16 se muestra las muestras MF4 Y MF5 en vista transversal después de la prueba de compresión, no se observa la aparición de grietas a simple vista además de la acumulación de fibras de caucho en la pasta de cemento, por esto se puede inferir que las muestras con caucho falla en principio en la matriz de cemento que rodea el agregado grueso, la grava se muestra sin grietas visibles.

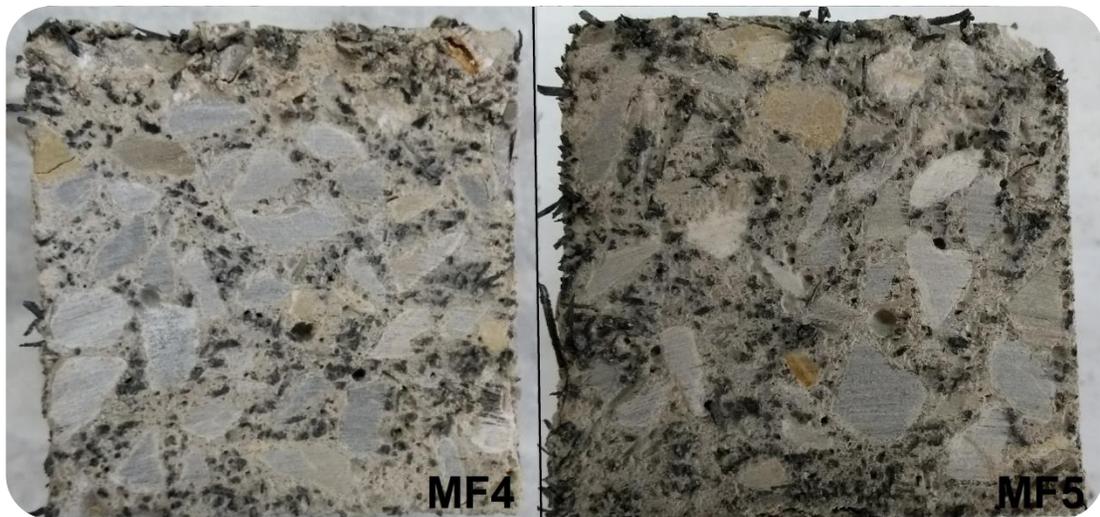


Figura 4.16. Vista transversal de las muestras MF4, MF5.

4.3. Densidades del concreto con caucho

Las densidades de las muestras de concreto con caucho para las distintas proporciones y morfologías se muestran en la tabla 4.2, en ella se aprecia que la densidad más alta corresponde a la muestra M1 sin caucho, mientras más contenido de caucho en las muestras menor es la densidad, esto se debe a que el caucho agregado posee una menor densidad que la pasta y los agregados, por lo cual a mayor contenido la muestra es más ligera, a esta disminución de densidad también se le atribuye la disminución de resistencia de las muestras.

Tabla 4.2. Densidades de las distintas muestras.

Porcentaje Concreto - caucho	Polvo	Fibras cilíndricas	Fibras
	Densidad g/cm ³	Densidad g/cm ³	Densidad g/cm ³
100 - 0	2.283		
95 - 5	2.078	2.150	2.050
90 -10	1.849	2.108	1.971
85 - 15	1.806	2.068	1.913
80 - 20	1.770	1.927	1.895
75 - 25	1.719	1.866	1.798

Como se aprecia en la tabla, las muestras con caucho en polvo poseen la menor densidad con respecto a la proporción de concreto – caucho, esto explica la porosidad provocada por la incorporación de aire durante el proceso de mezclado debido a las partículas finas de caucho, por lo que las muestras de concreto con caucho poseen una mayor porosidad y en consecuencia un material más ligero que el concreto normal. Las muestras con caucho en fibras presentan un valor intermedio en relación a las otras dos morfologías, al igual que los datos de la prueba de compresión posee una resistencia media en comparación a las otras dos morfologías, por lo que la densidad afecta la resistencia soportada en las muestras con caucho en fibras, estas muestras son las que poseen una mejor sujeción a la matriz de concreto debido a su morfología irregular que permite una mejor sujeción mecánica. Las muestras con caucho en fibras cilíndricas poseen la mayor densidad en relación al contenido de caucho, la mayor densidad se puede deber al tipo de morfología que no permite la inclusión de aire en el proceso de mezclado a diferencia de las otras dos morfologías, la densidad también contribuye a tener una mayor resistencia en las pruebas de compresión.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

En este estudio cinco mezclas diferentes de concreto adicionado con caucho en tres distintas morfologías fueron elaborados y ensayados, los resultados llevaron a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. La resistencia a la compresión de las muestras de concreto disminuyó conforme el contenido de caucho aumentaba para las tres morfologías de caucho empleadas.
2. La densidad de las muestras de concreto disminuye conforme el contenido de caucho aumenta para las tres morfologías empleadas, las muestras de concreto con caucho en polvo presentaron la densidad más baja en relación al contenido de caucho seguida de las muestras con caucho en fibras y finalmente las muestras con caucho en fibras cilíndricas.
3. Las muestras de concreto con caucho en polvo en proporciones de 10 a 25 % y las muestras de concreto con caucho en fibras en proporciones de 20 a 25 % presentan densidades en rangos de 600 a 1800 kg/m³, los cuales pueden ser considerados concretos ligeros.
4. Las muestras de concreto con caucho presentaron un menor peso conforme el contenido de caucho aumenta, siendo las muestras con caucho en polvo las más ligeras en relación al contenido de caucho, seguidas de las de caucho en fibras y finalmente las de caucho en fibras cilíndricas, esto se podría deber al aumento de la porosidad debido a la morfología que permite la inclusión de una mayor cantidad de aire durante el proceso de mezclado del concreto fresco, debido a esta porosidad es posible su uso como aislamiento térmico.
5. Las muestras con caucho en fibras, después de las pruebas de compresión no se separaron y permanecieron juntas debido al anclaje de las mismas, esto debido a la forma alargada e irregular de la fibra que permite una mejor adherencia mecánica entre el concreto.

6. Las muestras con caucho en fibras cilíndricas presentaron una mayor resistencia y mayor densidad en comparación a las otras dos morfologías de caucho, esto debido a su forma alargada y lisa que no permite la inclusión de aire durante su mezclado, sin embargo esta morfología no presenta una buena adherencia mecánica entre las matriz de concreto debido a su superficie lisa.
7. Debido a la caída de resistencia del concreto conforme aumenta el contenido de caucho se recomienda su uso en miembros no estructurales secundarios, en donde se requiera de ser ligeros a fin de reducir las cargas muertas, para colar elementos de relleno que no soporten cargas estructurales.
8. Los resultados obtenidos muestran que los efectos de la incorporación de partículas de caucho al concreto no son despreciables y fomentan la continuación de esta investigación debido a las propiedades presentadas, además de promover el reutilizado de materiales de desecho y al ahorro de materiales para construcción.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar ensayos a distintos periodos de tiempo para evaluar las propiedades del concreto con caucho a largo plazo.
2. Se recomienda la elaboración de probetas de concreto con caucho siguiendo la norma ASTM C31 para probetas cilíndricas y realizar ensayos para conocer sus propiedades.
3. Realizar pruebas de flexión en tres puntos para conocer su resistencia a flexión y proponer un uso en otras aplicaciones.
4. Realizar pruebas de aislamiento acústico y térmico.
5. Modificar la longitud y superficie de las fibras de caucho para obtener una mejor adherencia mecánica en el concreto.
6. Modificar las proporciones de cemento en la mezcla de concreto a fin de contrarrestar la pérdida de resistencia debido al caucho.

REFERENCIAS

1. A. O. Atahan, A. O. Yücel, Crumb rubber in concrete: Static and dynamic evaluation, *Constr. Build. Mater.* 36 (2012) 617–622.
2. A. Aguado, J. M. Salla, Los Hormigones con Polímeros en la Construcción: Propiedades y Aplicaciones, *Informes de la Construcción*, 39 (1987) 61-72.
3. D. A. Abrams, Design of Concrete Mixtures, Lewis Institute, Structural Materials Research Laboratory, 1 PCA LS001, http://www.portcement.org/pdf_files/LS001.pdf, (1918).
4. M. K. Batayneh, I. Marie, I. Asi, Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries, *Waste Management*, 28 (2008) 2171–2176.
5. J. Colín, F. Castillo, B. Leal, O. Flores, I. Gamboa, H. Martínez, Rubber Additions into Concrete and Gamma Radiation Effects on Mechanical Properties and Microwave Absorption Capacity, *J. Nucl. Phys. Mat. Sci. Rad. A.* 5 (2017) 197–211.
6. Copeland, L. E. Schulz, G. Edith, Electron Optical Investigation of the Hydration Products of Calcium Silicates and Portland Cement), *Research Department Bulletin RX135*, Portland cement Association http://www.portcement.org/pdf_files/RX135.pdf, 1962.
7. E. Ganjian, M. Khorami, A. A. Maghsoudi, Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 1828–1836.
8. T. Gupta, S. Chaudhary, R. K. Sharma, Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate, *Constr. Build. Mater.* 73 (2014) 562–574.
9. F. Hernández, G. Barluenga, M. Bollati, B. Witoszek, Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete, *Cem. Concr. Res.* 32 (2002) 1587–1596.
10. F. Hernández, G. Barluenga, B. Landa, M. Bollati, B. Witoszek, Fatigue behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete and its implications in the design of rigid pavements, *Constr. Build. Mater.* 21 (2007) 1918–1927.
11. <http://www.semarnat.gob.mx/temas/residuos-solidos-urbanos> (14-06-2018)
12. C. A. Issa, G. Salem, Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design, *Constr. Build. Mater.* 42 (2013) 48–52.
13. A. R. Khaloo, M. Dehestani, P. Rahmatabadi, Mechanical properties of concrete containing a high volumen of tire–rubber particles, *Waste Management*, 28 (2008) 2472–2482.

14. H. Kosmatka, B. Kerkhoff, C. William, J. Tanesi, Fundamentos del concreto, Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU., 2004, pp. 1 – 20.
15. H. Kosmatka, B. Kerkhoff, C. William, J. Tanesi, Diseño y Proporcionamiento de Mezclas de Concreto Normal, Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU., 2004, pp. 185 – 216.
16. A. Lagashetty, A. Venkataraman, Polymer Nanocomposites, Resonance, 10 (2005) 49–57.
17. L. Li, S. Ruan, L. Zeng, Mechanical properties and constitutive equations of concrete containing a low volume of tire rubber particles, Constr. Build. Mater. 70 (2014) 291–308.
18. F. Liu, G. Che, L. Li, Y. Guo, Study of impact performance of rubber reinforced concrete, Constr. Build. Mater. 36 (2012) 604–616.
19. F. Liu, F. Meng, G. Ning, L. Li, Fatigue performance of rubber-modified recycled aggregate concrete (RRAC) for pavement, Constr. Build. Mater. 95 (2015) 207–217.
20. D. Louis, F. John, Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. Industria del caucho. Vol. 3, 1998.
21. Mavroulidou M. y Figueiredo J., Discarded tyre rubber as concrete aggregate: a possible outlet for used tyres, Global NEST Journal, 12 (2010) 359-367.
22. A. Mendis, S. Al-Deen, M. Ashraf, Behaviour of similar strength crumbed rubber concrete (CRC) mixes with different mix proportions, Constr. Build. Mater. 137 (2017) 354–366.
23. B.S. Mohammed, Structural behavior and m–k value of composite slab utilizing concrete containing crumb rubber, Constr. Build. Mater. 24 (2010) 1214–1221.
24. B.S. Mohammeda, K. M. Hossain, J. T. Swee, G. Wong, M. Abdullahi, Properties of crumb rubber hollow concrete block, J. Clean. Prod. 23 (2012) 57–67.
25. I. Mohammadi, H. Khabbaz, Shrinkage performance of Crumb Rubber Concrete (CRC) prepared by water-soaking treatment method for rigid pavements, Cement. Concrete Comp. 62 (2015) 106–116.
26. S. Marikunte, C. Aldea, S.P. Shah, Durability of Glass Fiber Reinforced Cement Composites. Advanced Cement Materials, 5 (1997) 100-108.
27. O. Onuaguluchi, D. K. Panesar, Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume, J. Clean. Prod. 82 (2014) 125–13.
28. T. C. Powers, A Discussion of Cement Hydration in Relation to The Curing of Concrete Research Department Bulletin RX025, Portland Cement Association.
29. M.M. Rahman, M. Usman, A. A. Ghalib, Fundamental properties of rubber modified self-compacting concrete (RMSCC), Constr. Build. Mater. 36 (2012) 630–637.

30. A. E. Richardson, K. A. Coventry, G. Ward, Freeze/thaw protection of concrete with optimum rubber crumb content, *J. Clean. Prod.* 23 (2012) 96–103.
31. A. Richardson, K. Coventry, V. Edmondson, E. Dias, Crumb rubber used in concrete to provide freeze/thaw protection (optimal particle size), *J. Clean. Prod.* 112 (2016) 599–606.
32. X. Shu, B. Huang, Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview, *Constr. Build. Mater.* 67 (2014) 217–224.
33. S. K. Son, I. Hajirasouliha, K. Pilakoutas, Strength and deformability of waste tyre rubber-filled reinforced concrete columns, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 218–226.
34. P. Sukontasukkul, Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 1084–1092.
35. B.S. Thomas, R. C. Gupta, v. j. Panicker, Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance, *J. Clean. Prod.* 112 (2016) 504–513.
36. H. A. Toutanji, The Use of Rubber Tire Particles in Concrete to Replace Mineral Aggregates, *Cement. Concrete Comp.* 18 (1996) 135–139.
37. K. Wang, Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, Center for Transportation Research and Education Iowa State University, (2004)3–347.
38. Washa, W. George, Wendt, F. Kurt, Fifty Year Properties of Concrete, *ACI Journal*, American Concrete Institute, (1975) 20 – 28.
39. W. H. Yung, L. C. Yung, L. H. Hua, A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* 41 (2013) 665–672.
40. I. Zandi, J. Lepore, H. Rostami, Particulate rubber included concrete compositions, Patent number 5, 456,751, (1995).
41. X. Zhu, C. Miao, J. Liu, J. Hong, Influence of crumb rubber on frost resistance of concrete and effect mechanism, *Procedia Engineering*, 27 (2012) 206–213.