



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

CARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO
MODIFICADO CON CAUCHO DE LLANTAS
TRITURADAS

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL

PRESENTAN:
FUENTES RUIZ CLAUDIO
ROMERO TORRES SERGIO DANIEL

DIRECTOR DE TESIS:
DR. JAIME RETAMA VELASCO



CIUDAD NEZAHUALÓYOTL, ESTADO DE MÉXICO,
MAYO, 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Índice general

Resumen	xI
Resumen	1
1. Introducción	3
1.1. Objetivo.	6
1.2. Justificación	6
1.3. Organización de la tesis.	6
2. Caucho de llantas trituradas.	7
2.1. Impacto ambiental.	8
2.2. Disposición de llantas trituradas.	10
2.3. Caucho granulado.	11
2.4. Granulometría del caucho triturado.	13
3. Caracterización del concreto.	15
3.1. Pruebas de los materiales.	15
3.1.1. Granulometría.	15
3.1.2. Porcentaje de absorción.	18
3.1.3. Porcentaje de humedad.	19
3.1.4. Peso volumétrico.	20
3.2. Diseño de mezclas de concreto.	20
3.2.1. Concreto simple.	21
3.2.2. Concreto con caucho fino.	24
3.2.3. Concreto con caucho grueso.	25

3.3. Elaboración y curado del concreto en laboratorio.	26
4. Pruebas de laboratorio.	33
4.1. Resistencia a la compresión.	33
4.1.1. Concreto simple.	35
4.1.2. Concreto con caucho fino.	40
4.1.3. Concreto con caucho grueso.	43
4.2. Resistencia a la flexión.	46
4.2.1. Concreto simple.	48
4.2.2. Concreto con caucho fino.	50
4.2.3. Concreto con caucho grueso.	51
4.3. Resistencia a la tensión.	53
4.3.1. Concreto simple.	55
4.3.2. Concreto con caucho fino.	59
4.3.3. Concreto con caucho grueso.	62
4.4. Comparación de resultados.	65
4.4.1. Compresión.	65
4.4.2. Flexión.	69
4.4.3. Tensión.	71
4.4.4. Relación esfuerzo compresión-tensión.	73
5. Conclusiones y trabajos futuros.	75
5.1. Trabajos futuros.	76

Índice de tablas

3.1. Granulometría para una muestra de 1000 g. de arena.	16
3.2. Granulometría para una muestra de 1000 g. de grava.	17
3.3. Contenido de agua y aire aproximados para diferentes tamaños máximos nominales de los agregados (Tabla 6.3.3 ACI) [1].	21
3.4. Relación agua cemento y resistencia a la compresión del concreto [1]. . . .	22
3.5. Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto [1].	23
3.6. Conversión de materiales de metros cúbicos a litros o kilogramos.	23
3.7. Material necesario por m ³	24
3.8. Material necesario para especímenes de CS.	24
3.9. Material necesario para un m ³ de CCF.	25
3.10. Material necesario para especímenes de CCF.	25
3.11. Material necesario para un m ³ de CCG.	25
3.12. Material necesario para especímenes de CCG.	26
4.1. Diámetros promedio de los especímenes de CS.	36
4.2. Longitudes promedio de los especímenes de CS.	36
4.3. Peso de los especímenes de CS.	37
4.4. Carga máxima registrada por espécimen de CS.	37
4.5. Resistencias a la compresión para los especímenes de CS.	38
4.6. Reporte de prueba a compresión para los especímenes de CS, norma ASTM C39/C39M-15 [9].	38
4.7. Diámetros promedio de los especímenes de CCF.	40
4.8. Longitudes promedio de los especímenes de CCF.	40
4.9. Peso de los especímenes de CCF.	40
4.10. Carga máxima registrada por espécimen de CCF.	41

4.11. Resistencias a la compresión para los especímenes de CCF.	41
4.12. Reporte de prueba a compresión para los especímenes de CCF bajo la norma ASTM C39/C39M-15 [9].	41
4.13. Diámetros promedio de los especímenes de CCG.	43
4.14. Longitudes promedio de los especímenes de CCG.	43
4.15. Peso de los especímenes de CCG.	43
4.16. Carga máxima registrada por espécimen de CCG.	44
4.17. Resistencias a la compresión para los especímenes de CCG.	44
4.18. Reporte de prueba a compresión para los especímenes de CCG bajo la norma ASTM C39/C39M-15 [9].	44
4.19. Anchos y peraltes promedio en los especímenes de CS.	48
4.20. Longitudes promedio en los especímenes de CS.	48
4.21. Reporte de prueba a flexión para las vigas de CS, conforme a la norma C293 [6].	49
4.22. Anchos y peraltes promedio en los especímenes de de CCF.	50
4.23. Longitudes promedio en los especímenes de CCF.	50
4.24. Reporte de prueba a flexión para las vigas de CCF, conforme a la norma C293 [6].	50
4.25. Anchos y peraltes promedio en los especímenes de CCG.	51
4.26. Longitudes promedio en los especímenes de CCG.	52
4.27. Reporte de prueba a flexión para las vigas de CCG, conforme a la norma C293 [7].	52
4.28. Diámetros promedio de los especímenes de CS.	56
4.29. Longitudes promedio de los especímenes de CS.	56
4.30. Carga máxima registrada por espécimen de CS.	56
4.31. Reporte de resistencia a la tensión para los especímenes de CS, conforme a la norma C496 [11].	57
4.32. Diámetros promedio de los especímenes de CCF.	59
4.33. Longitudes promedio de los especímenes de CCF.	59
4.34. Carga máxima registrada por espécimen de CCF.	59
4.35. Reporte de resistencia a la tensión para los especímenes de CCF, conforme a la norma C496 [11].	60
4.36. Diámetros promedio de los especímenes de CCG.	62
4.37. Longitudes promedio de los especímenes de CCG.	62

4.38. Carga máxima registrada por espécimen de CCG.	62
4.39. Reporte de resistencia a la tensión para los especímenes de CCG, conforme a la norma C496 [11].	63
4.40. Comparación de pruebas a compresión.	66
4.41. Comparación de pruebas a flexión.	70
4.42. Comparación de pruebas a tensión.	72

Índice de figuras

1.1. Uso en relleno.	5
1.2. Uso en drenajes.	5
2.1. Disposición final de neumáticos en México [14].	9
2.2. Distribución del caucho grueso, malla 1/4".	12
2.3. Distribución del caucho fino, malla #8.	13
2.4. Cribado del caucho.	14
3.1. Curva granulométrica para arena.	17
3.2. Curva granulométrica para grava.	18
3.3. Preparación de moldes.	27
3.4. Revolvedora.	27
3.5. Interior de la revolvedora con grava.	28
3.6. Mezclado de concreto.	28
3.7. Incorporación del caucho a la mezcla de concreto.	29
3.8. Proceso de mezclado del caucho en el concreto.	29
3.9. Colado de especímenes.	30
3.10. Apisonamiento y golpes con el mazo de goma [6].	30
3.11. Colocación de la última capa de concreto.	31
3.12. Enrasado del concreto.	31
3.13. Almacenamiento de los especímenes.	32
3.14. Curado de los especímenes.	32
3.15. Botes con agua para curado.	32
4.1. Esquema para prueba de compresión.	34
4.2. Tipos de fallas en cilindros, norma ASTM C39/C39M-15 [9].	35

4.3. Medición de diámetros y longitudes.	36
4.4. Peso de los especímenes de CS.	37
4.5. Fracturas visibles en los especímenes de CS.	39
4.6. Fracturas visibles en los especímenes de CCF.	42
4.7. Fracturas visibles en los especímenes de CCG.	45
4.8. Esquema de la prueba de flexión, viga de 3 puntos.	46
4.9. Medición de longitudes.	47
4.10. Medición de ancho y peralte.	47
4.11. Vigas de CS.	49
4.12. Fracturas en vigas de CCF.	51
4.13. Fracturas en vigas de CCG.	53
4.14. Esquema de la prueba de tensión o brasileña en cilindros de concreto.	54
4.15. Medición de diámetros.	54
4.16. Medición de longitudes.	55
4.17. Fracturas visibles después de la prueba de resistencia a la tensión en los especímenes de CS.	58
4.18. Fracturas visibles después de la prueba de resistencia a la tensión en los especímenes de CCF.	61
4.19. Fracturas visibles después de la prueba de resistencia a la tensión en los especímenes de CCG.	64
4.20. Historia de carga para los especímenes de CS.	66
4.21. Historia de carga para los especímenes de CCF.	67
4.22. Historia de carga para los especímenes de CCG.	67
4.23. Densidad para cada mezcla de concreto.	68
4.24. Esfuerzo de compresión para cada mezcla de concreto.	69
4.25. Carga máxima para cada mezcla de concreto.	70
4.26. Módulo de ruptura para cada mezcla de concreto.	71
4.27. Carga máxima para cada mezcla de concreto.	72
4.28. Esfuerzo de tensión para cada mezcla de concreto.	73

Resumen

En el presente trabajo de tesis se realiza el estudio de concreto con cemento Portland modificado con caucho de llantas trituradas, para ello se realizaron 3 diferentes tipos de pruebas destructivas en laboratorio, siendo: resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y resistencia a la tensión. Utilizando probetas cilíndricas y prismáticas con base en las normas ASTM (American Society of Testing and Materials) de dimensiones de 0.15 x 30 m y 0.15 x 0.15 x 0.60 m respectivamente. Los agregados pétreos utilizados en las mezclas de concreto se someten a las pruebas correspondientes de igual forma con base en la normativa ASTM siendo estas: granulometría, porcentaje de absorción, porcentaje de humedad y peso volumétrico, en donde el caucho solo es sometido a la prueba de granulometría para su poder sustituirlo en la mezcla de concreto con un tamaño igual de agregado pétreo fino y grueso. Las pruebas tienen la finalidad de conocer la calidad de los materiales en banco.

Se diseñan tres mezclas de concreto por medio del método de diseño de mezclas ACI 211.1-91 (American Concrete Institute), la primer mezcla es de concreto simple, dicha mezcla cuenta con un diseño convencional puesto que no cuenta con alteraciones contando con una resistencia $f'c$ de 200 kg/cm², siendo esta la mezcla de control para el estudio del presente trabajo; posteriormente se realiza el diseño de una segunda mezcla en la que se sustituye un 10 % del agregado fino en peso por caucho fino y el diseño de una tercer mezcla donde se le sustituye un 10 % del agregado grueso en peso por caucho grueso, ambas con respecto a su peso obtenido del diseño de mezcla por el ACI. Obtenido el diseño pertinente de cada mezcla, se procedió al colado en moldes cilíndricos y prismáticos correspondientes para cada prueba y se dejaron curar durante 28 días.

Las mezclas son sometidas a pruebas destructivas en laboratorio pasados los 28 días de curado, a través de la normativa ASTM con una maquina universal, ensayando las probetas hasta obtener la falla total de los especímenes. Con las pruebas de laboratorio se obtienen: la resistencia a la compresión ($f'c$), resistencia a la flexión (MR) y resistencia a la tensión (T) de las tres mezclas de concreto para comprar cada una y ver cual presenta mejores características.

Las mezclas modificadas con caucho, destinadas a las pruebas de compresión y tensión, muestran una disminución considerable en su resistencia con respecto a la mezcla de concreto simple; Los especímenes en las pruebas de compresión demostraron una reducción del 24.37 % para el caucho fino y una reducción del 41 % para el caucho grueso. Para el

caso de la resistencia a la tensión demostró tener una reducción del 10.96 % para el caucho fino y del 25.44 % para el caucho grueso. Por otra parte, los concretos modificados con caucho al llegar a su carga máxima poseen la propiedad de resistir una fracción de dicha carga antes de fracturarse por completo.

Para el caso de las pruebas a flexión, los especímenes de concreto con caucho demostraron una reducción del 1.61 % para el caucho fino y una reducción mayor para el concreto con caucho grueso, siendo esta del 27.33 %, cabe destacar el comportamiento de los especímenes de concreto con caucho puesto que, a pesar de encontrarse completamente fracturados no se dividían por la mitad, esto provocado por la adherencia y elasticidad que posee el caucho.

El caucho como agregado dentro de la mezcla de concreto resulta ser desfavorable, a pesar de proporcionar propiedades inusuales en el concreto como las anteriores mencionadas su uso podría ser destinado en pavimentos debido al comportamiento mostrado durante las pruebas realizadas con respecto a la falla en los especímenes.

Abstract

In this thesis work, the study of concrete with Portland cement modified with rubber from crushed tires was carried out. The tests are: compressive strength, flexural strength and tensile strength. Using cylindrical and prismatic specimens based on ASTM (American Society of Testing and Materials) standards with dimensions of 0.15 x 30 m and 0.15 x 0.15 x 0.15 x 0.60 m respectively. The stone aggregates used in the concrete mixes are also subjected to the corresponding tests based on ASTM standards: particle size, absorption percentage, moisture percentage, and volumetric weight, where rubber is only subjected to the particle size test so that it can be substituted in the concrete mix with an equal size of fine and coarse stone aggregate. The purpose of the tests is to know the quality of the materials on the bench.

Three concrete mixes are designed by means of the ACI 211. 1-91 (American Concrete Institute), the first mix is simple concrete, this mix has a conventional design since it does not have any alterations and has a resistance $f'c$ of 200 kg/cm², being this the control mix for the study of the present work; Subsequently, the design of a second mix is carried out in which 10 % of the fine aggregate by weight is replaced by fine rubber and the design of a third mix in which 10 % of the coarse aggregate by weight is replaced by coarse rubber, both with respect to the weight obtained from the mix design by the ACI. Once the pertinent design of each mix was obtained, it was cast in cylindrical and prismatic molds corresponding to each test and left to cure for 28 days.

The mixtures are subjected to destructive tests in the laboratory after 28 days of curing, using ASTM standards with a universal machine, testing the specimens until total failure of the specimens is obtained. With the laboratory tests, the compressive strength ($f'c$), flexural strength (MR) and tensile strength (T) of the three concrete mixes are obtained to compare each one and see which one has the best characteristics.

The rubber-modified mixes, intended for compression and tension tests, show a considerable decrease in strength with respect to the plain concrete mix; the specimens in the compression tests showed a reduction of 24.37 % for the fine rubber and a reduction of 41 % for the coarse rubber. In the case of tensile strength, it showed a reduction of 10.96 % for the fine rubber and 25.44 % for the thick rubber. On the other hand, the rubber-modified concretes, when reaching their maximum load, have the property of resisting a fraction of such load before fracturing completely.

In the case of the flexural tests, the concrete specimens with rubber showed a reduction

of 1.61 % for the fine rubber and a greater reduction for the concrete with thick rubber, being 27.33 %. It is worth mentioning the behavior of the concrete specimens with rubber since, in spite of being completely fractured, they did not divide in half, this was caused by the adherence and elasticity of the rubber.

Rubber as an aggregate in the concrete mix turns out to be unfavorable, in spite of providing unusual properties in concrete such as those mentioned above, its use could be used in pavements due to the behavior shown during the tests carried out with respect to the failure of the specimens.

Capítulo 1

Introducción

El concreto es por excelencia el material más utilizado dentro de la ingeniería civil debido a las propiedades que este posee, por su sencilla colocación y fácil manejo. Si bien es cierto, el concreto consume una gran cantidad de recursos, tanto materiales como económicos dentro del ámbito de la construcción; actualmente se encuentran implementando innovaciones tecnológicas, como también procesos de elaboración de concretos con el fin de disminuir estos factores.

Dentro de las innovaciones, se tiene el uso de materiales reciclados, los cuales se incorporan a la mezcla de concreto proporcionando ventajas tanto físicas y químicas, así como mejorando las propiedades mecánicas, esto se logra de acuerdo con el tipo de material reciclado, no se descarta que al adicionar este material se vean afectadas las propiedades mecánicas de la mezcla de concreto.

Debido a la población que actualmente hay en el mundo, se requiere de un mayor número de vehículos de transporte a nuestra disposición, los cuales dejan como consecuencia una inmensa cantidad de desechos; el principal contaminante a destacar, son llantas en desuso. Actualmente algunos usos que se le ha dado al cucho proveniente de estas llantas que no necesariamente corresponden al ámbito de la construcción son: relleno en campos de fútbol, campos de juego, gimnasia, pistas de atletismo, pistas ecuestres y relleno de césped artificial. Este material ha tomando protagonismo en el campo de la ingeniería civil, principalmente en proyectos de investigación los cuales buscan las mejores aplicaciones y usos para este [17].

En el ámbito de la construcción, el caucho granulado y reciclado es utilizado para la fabricación de pisos antideslizantes, compuestos impermeables, elementos de aislamiento de sonido y en recubrimientos. El caucho puede ser un componente en pavimentos y concretos, aplicados en la construcción de vías terrestres, así como en la construcción de edificaciones; estas aplicaciones suelen ser benéficas para para contra restar el impacto ambiental que el proceso constructivo produce. La implementación del caucho en los procesos constructivos implica una serie de retos ecológicos, técnicos y económicos [17].

Una investigación previa [2] en el que se aplico concreto modificado con caucho mostró resultados un tanto interesantes, el caucho proporciona una ayuda en las propiedades de consistencia. Una de las ventajas al utilizar caucho triturado consta en el aumento de la ductilidad en el concreto, de la misma forma aumenta la resistencia al agrietamiento, disminuye su densidad, genera una menor absorción de agua, aumenta su resistencia al impacto y proporciona un aislamiento acústico. Algunas otras investigaciones han demostrado una reducción en algunas propiedades mecánicas, por mencionar algunas, se redujo la resistencia a la compresión, flexión y tensión [23].

Entre las posibles aplicaciones del caucho en la construcción, resulta de gran interés implementarlo en mezclas asfálticas, puesto que el caucho de los neumáticos aporta mejoras en el comportamiento, resulta ser mas económico que otros modificadores alternativos y permite consumir una considerable cantidad de residuo [19].

Una de las investigaciones realizada por AMAAC (Asociación Mexicana del Asfalto A.C.) denominada 'Evaluación de pavimentos asfálticos modificados con hule de neumático, mediante diseño volumétrico, TSR y deformación permanente' [19] demuestra que la aplicación del caucho reciclado de llantas puede dar beneficios a la mezcla asfáltica y darle una aplicación que sea de beneficio, como pudiera ser su implementación en el tratamiento de superficies y bacheo en caminos.

México ha intentado aplicar esta técnica, tal es el caso de la calzada Tlalpán en la ciudad de México durante la década de los 70's, CAPUFE implemento en autopistas de altas especificaciones en 1996 en las Autopistas: México-Puebla, México-Querétaro, México-Córdoba, México - Cuernavaca y Pátzcuaro-Uruapan [19].

Otras aplicaciones que el caucho granulado puede llegar a tener varían desde los concretos y vías terrestres, así como en suelos, hidráulica y sistemas de aislamiento teniendo las siguientes aplicaciones.

Rellenos ligeros (figura 1.1), como sustituto de suelos convencionales en terraplenes que se encuentran en suelos blandos o en suelos donde sea preciso una reducción del peso, tener una buena permeabilidad y resistencia elevada. Para este caso se utiliza una partícula granulada de 75 mm a 350 mm [15].



Figura 1.1: Uso en relleno.

En sistemas de drenaje (figura 1.2), el material se adecua puesto que su consistencia es porosa y permeable lo que permite la circulación del líquido entre las partículas de caucho, esto se logra gracias al tamaño de granulado que va desde los 80 mm a los 350 mm [15].



Figura 1.2: Uso en drenajes.

Sistemas de absorción de vibraciones en estructuras ferroviarias, el caucho logra disminuir en gran medida las vibraciones que el paso de los vagones genera, incluyendo la contaminación acústica, su principal ventaja es la alta atenuación de vibraciones en un rango amplio de frecuencias, su montaje es sencillo y rápido con un bajo coste de mantenimiento sin fijaciones mecánicas [15].

Cabe resaltar que el uso del caucho no solo se limita a las partículas granuladas o en polvo puesto que también el neumático sin triturar y sus componentes tienen un amplio uso el cual no causa la misma relevancia como los mencionados anteriormente.

1.1. Objetivo.

Determinar las propiedades mecánicas de una mezcla de concreto con cemento Portland, el cual es modificado agregando caucho de llantas trituradas por medio de pruebas destructivas de laboratorio, son realizadas conforme a la normativa ASTM correspondiente al análisis de concreto en laboratorio, con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas del concreto respecto a compresión, flexión y tensión.

1.2. Justificación

La disposición de llantas se considera un problema severo debido a que su degradación natural es limitada, en la contaminación que puede producir, o al foco de infección que representa para la salud pública. El INEGI estima que se generan un total de 28.5 millones de llantas al año las cuales terminan dispersas en tiraderos, basureros, ríos y lagos. Este material de desperdicio puede ser reciclado e implementado en la ingeniería civil. El caucho de llanta se puede utilizar en una mezcla de concreto con el fin de mejorar el rendimiento de la mezcla, sustituyendo en porciones o de manera completa parte de los agregados pétreos. La finalidad de agregar caucho de llanta a la mezcla es la búsqueda de mejorar las propiedades mecánicas del concreto y con ello poder ofrecer mejores alternativas en los materiales o procesos constructivos dentro de la ingeniería civil.

1.3. Organización de la tesis.

Capitulado:

- Capítulo 2: Se menciona brevemente la historia del caucho y su proceso de elaboración, el impacto ambiental que representa, así como las normativas que lo rigen, sin dejar de lado la granulometría y cribado del material, así como los posibles usos dentro de la ingeniería civil.
- Capítulo 3: Se describen las pruebas de laboratorio para los agregados pétreos con base en las normativas ASTM; de la misma forma, se describe el diseño de la mezcla de concreto simple la cual es utilizada como mezcla de control.
- Capítulo 4: Se aplican las pruebas de compresión, flexión y tensión en los especímenes de concreto simple, concreto modificado con caucho fino y los de concreto modificado con caucho grueso; así como también, se muestran los resultados obtenidos en cada ensaye y una comparativa de los resultados.
- Capítulo 5: Se presentan las conclusiones que las que las mezclas de concreto presentan, así como los cambios mostrados en sus propiedades mecánicas.

Capítulo 2

Caucho de llantas trituradas.

Para dar apertura al concreto modificado con caucho, es preciso mencionar ¿qué es el caucho?, siendo este el elemento característico del presente trabajo. En este capítulo se describen brevemente las propiedades de dicho material, destacando las que resultan de provecho al momento de incorporarlo al concreto.

El caucho es fundamentalmente un polímero, una especie de macro-molécula, se encuentra formada por la confluencia de otras moléculas mucho más pequeñas, a las cuales se las conoce como monómeros [3]. Actualmente existen 2 variantes de caucho, los cuales se denominan de acuerdo a su origen, caucho natural y caucho sintético [3].

El caucho natural, se obtiene a base de una variante de polímero, el cual es obtenido a partir de plantas tropicales de entre las cuales destaca la “*hevea brasiliensis*” originaria del amazonas, a partir de ella se obtiene una sustancia de consistencia lechosa denominada látex [3]. El látex se obtiene realizando un corte en el árbol y de forma natural a este proceso se le denomina exudación; el material es recolectado en recipientes, se coagula se lava, repara y se tritura para posteriormente dejarlo secar en la planta procesadora[3].

Al encontrarse el material seco, en este punto se le denomina caucho, este presenta una consistencia pegajosa, la cual se deforma con facilidad al estar presente en temperaturas altas, se torna frágil al encontrarse en temperaturas bajas, por lo cual, es necesario que el material sea “vulcanizado” [3]; el proceso consiste en agregarle azufre u otros equivalentes, los cuales modifican las propiedades del caucho, provocando enlaces cruzados en las cadenas de polímeros, esto logra que la consistencia del material sea menos pegajosa y le proporciona propiedades mecánicas superiores[3].

Durante el siglo XX se presentó un considerable desabasto de este material debido a la gran demanda que presentó, la compañía alemana Bayer & Co. acompañada del químico Friedrich Hoffmann se dieron a la tarea de desarrollar un caucho fabricado de forma sintética [21]. Esta variante de caucho se fabricada a partir de hidrocarburos insaturados provenientes de los excedentes del petróleo, los compuestos básicos del caucho sintético también son llamados monómeros, los cuales forman polímeros, estos al igual que el caucho natural, son vulcanizados con el objetivo de lograr una consistencia menos pegajosa y

pueda alcanzar las propiedades mecánicas pertinentes, como también las requiere el caucho natural[21].

El material tiende a ser de alta demanda, puesto que es la materia prima para la producción de un sin fin de productos, principalmente para la fabricación de neumáticos, llantas y artículos impermeables debido a que este material presenta una gran elasticidad y resistencia a los ácidos y sustancias alcalinas[21]. El caucho utilizado en los neumáticos está compuesto de una banda de rodamiento elástica, una cinta prácticamente inextensible y una estructura de arcos radialmente orientada, sobre una membrana inflada y aros inextensibles que sirven de enganche a otro elemento rígido, que es el neumático; teniendo cada uno una densidad aparente de 100 kg/m^3 [15].

2.1. Impacto ambiental.

El impacto ambiental generado por las llantas en desuso es un problema serio para la sociedad, puesto que el INEGI [18] registró un aproximado de 48 millones de vehículos automotores registrados en 2018, lo cual generó un aproximado de 28.5 millones de llantas desechadas al año, cerca del 91 % de la cantidad desechada terminó en baldíos, ríos y/o carreteras, lo cual produce efectos en el medio ambiente como contaminación visual, así como generan ecosistemas óptimos para la proliferación de insectos como los mosquitos [18].

México cuenta con una nula actividad de reciclado de caucho, material que, a pesar de contar con una plan de manejo de neumáticos usados de desecho (NOM-161-SEMARNAT-2011) [22] llega a ser insuficiente, esto se puede explicar de una manera simple; México es un país con poca conciencia ambiental, esto provoca que no exista un sistema de control, así como los mecanismos necesarios para el correcto reciclado de este[22]. Bandang, una filial de filial de Bridgestone, plantea una alternativa para combatir esta problemática, el renovado de llantas. La empresa se encarga del renovado de llantas de camión dentro del país, que, para 2016, reportó una renovación de 1,281 toneladas de llantas de camión renovadas, lo cual representa un 33.58 % del total de la disposición de llantas de camión en el país.

La renovación de llantas representa un fuerte impacto en la población, principalmente en el impacto ambiental, puesto que para la producción de un llanta se requiere un total de 83 litros de crudo, que, comparado con los 26 litros de crudo necesario para renovar una llanta, representa un ahorro de 68.67 % de crudo, lo cual implica una reducción en los costos de producción, así como una disminución en el impacto ambiental[22].

Es bien sabido que el caucho de llanta puede liberar moléculas de CO_2 , las cuales provocan que rebote la luz y calor en todas direcciones, provocando un aumento en el efecto invernadero, el cual es el principal factor causante del calentamiento global; cuando el CO_2 es combinado con el exceso de asfalto provoca el aumento en la temperatura llegando a ser hasta 8°C , esto puede variar entre ciudades y lugares rurales; dejando de lado los problemas ambientales, las partículas en sí mismas pueden provocar problemas respiratorios

tales como asma, enfermedades bronquiales y pulmonares, cáncer así como contaminación en los mantos freáticos[22].

Las llantas en desuso resultan ser un grave problema, no solo por el hecho de encontrarse dispersas y que no sean reguladas por el plan de desecho de la SEMARNAT [14]; existe una problemática aún más grave que las anteriormente mencionadas, la quema incontrolada de llantas, a pesar de que el caucho de las llantas es un material que presenta dificultades para incendiarse, cuando se logra su combustión resulta complicado apagarlo, esto puede llegar a ser beneficioso para algunas industrias puesto que representa una fuente de combustible barato, pero si el caucho de llanta se quema de manera desmedida representa un grave problema en la población.

En la figura 2.1 se muestra el destino que llevan las llantas fuera de uso en México de acuerdo al “PLAN ESTATAL DE MANEJO Y RECICLAJE -360- DE LLANTAS USADAS EN COAHUILA” [14] correspondiente al año 2012:

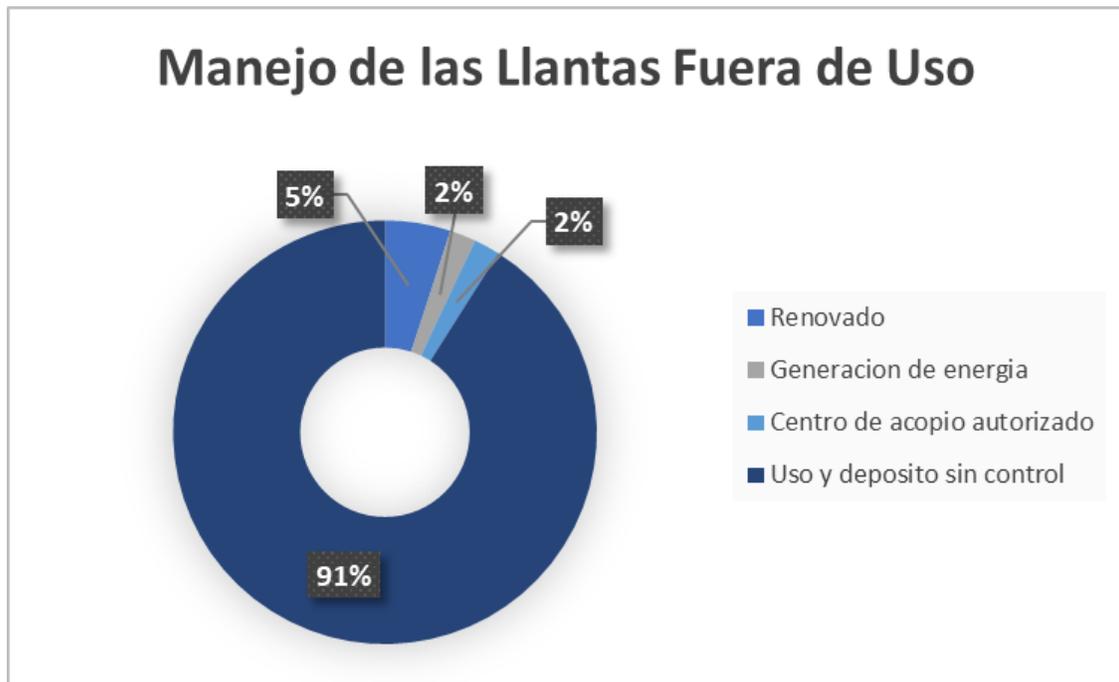


Figura 2.1: Disposición final de neumáticos en México [14].

2.2. Disposición de llantas trituradas.

La industria del caucho se compone de 3 sectores productivos [14]:

- 1) Caucho natural y sintético.
- 2) Neumáticos o llantas.
- 3) Productos derivados del caucho.

La industria del neumático es una de las más importantes en México puesto que su producción representa alrededor de tres cuartas partes del uso total que se le da al caucho[14] considerando que la composición se basa en entre un 50 % o 60 % de caucho ya sea natural o sintético, la industria cuenta con importantes asociaciones nacionales encargadas de la importación y distribución de dichas llantas.

Con este antecedente la SEMARNAT [22] elaboró un plan de manejo de neumáticos el cual consiste en el principio de las 3R's (Re-usar, Reciclar y Reducir):

- Re-usar: Acción de dar un nuevo uso al residuo.
- Reciclar: Acción de procesar el residuo, para servir de materia prima para un producto fabricado.
- Reducir: Acción de usar la menor cantidad de un producto y extender su vida útil.

Existen algunas fundaciones y empresas privadas que se encargan de recolectar llantas usadas, por mencionar alguna asociación sin fines de lucro, podemos nombrar a Recicllantas A.C. [20] la cual es una asociación civil que intenta combatir el problema que representa el uso en desmedido, la asociación lo enfrenta a través de campañas de concientización, actividades para el involucramiento social, firma de acuerdos de coordinación, recolección de llantas y recuperación de áreas verdes, entre otras acciones.

El reciclaje de llantas requiere de un proceso sencillo el cual es el siguiente[20]:

- Destalonamiento: La llanta no es únicamente caucho, puesto que también se compone de finos alambres de acero y nailon, en este paso se elimina todos los alambres contenidos dentro de la llanta.
- Trituración: En este punto la llanta reduce su tamaño considerablemente, esto se realiza con el objetivo de que pueda pasar a la siguientes fases de trituración.
- Granulación primaria: Se toman los trozos generados en el proceso anterior para pasar a ser triturados, esto se realiza con el objetivo de poder tener el caucho en fragmentos pequeños.
- Granulación secundaria: De la misma forma se toman los fragmentos de caucho generados del proceso anterior, los cuales se trituran nuevamente con el fin de obtener partículas aún más pequeñas y puedan ser clasificados con base a su tamaño.
- Desmetalizado: Puesto que el caucho se encuentra granulado gracias a su trituración, los alambres contenidos en ellos pueden separarse mediante diferentes métodos, por mencionar alguno podemos nombrar la separación magnética.

- Aspiración de polvos: Este es el paso final, el cual consiste en la limpieza, esto se logra a través de la aspiración de polvos de la tela y goma.

2.3. Caucho granulado.

También conocido como caucho molido, se deriva comúnmente de los neumáticos reciclados de automóviles y camiones. Durante el proceso se tiene que retirar en material que no sea caucho, como pueden ser la suciedad y alambres que son elementos complementarios de una llanta; los residuos restantes se reducen a un tamaño más manejable[13].

Existen diferentes tipos de moliendas o granulados en el caucho con los cuales se obtienen diferentes tamaños de partículas, este material se puede reutilizar para diferentes aplicaciones y en el mejor de los casos este se puede volver a vulcanizar. Teniendo dos formas distintas de granular el caucho; granulado mecánico a temperatura ambiente y granulado criogénico[13].

En el granulado mecánico se muele la llanta y se separa del metal para posteriormente reducirlo en tamaño [13].

El granulado criogénico consiste en enfriar el material con nitrógeno líquido a -200°C , es pasado por un molino de impacto el cual reduce de tamaño a las partículas de caucho[13]; El proceso de granulado mecánico resulta ser el más adecuado y menos costoso para obtener el caucho granulado [13].

Los distintos tamaños de caucho granulado se pueden dividir en tres distintos tipos como lo son:

- Caucho astillado: Las partículas tienen dimensiones entre los 25 mm y 30 mm y es usado para reemplazar el agregado grueso en mezclas de concreto.
- Caucho desmenuzado: Sus partículas tienen dimensiones entre los 3 mm y 10 mm y es usado para reemplazar el agregado fino en la mezcla de concreto.
- Caucho en polvo: Sus partículas son más pequeñas que 1 mm y es el polvo obtenido durante el proceso de trituración del caucho y es recomendable su uso para relleno en el concreto.

Este material poco a poco va abarcando terreno en el sector de la construcción, gracias a las propiedades que posee en su estado granulado, comenzando por las que se aprecian a simple vista como su tamaño y forma. El caucho granulado se puede presentar en formas irregulares o regulares esto dependiendo del uso que se le dé, tiene una densidad que depende del tamaño de partícula. Con respecto al caucho suministrado para este trabajo se presenta en un estado irregular, con una densidad de entre los 390 kg/m^3 a 535 kg/m^3 [15].

Conjunto a ello el caucho cuenta las siguientes propiedades [15]:

Químicas.

- Baja reactividad frente a los gases y líquidos.
- Baja biodegradabilidad.
- Resistencia a la intemperie.

Mecánicas.

- Absorbente de vibraciones.
- Flexible.

Físicas.

- Permeabilidad.
- Baja capacidad de compactación.

El caucho granulado empleado en el presente trabajo se obtuvo de un proveedor local, el material viene cribado en un número indeterminado de mallas, en otras palabras no se presenta en un intervalo de estas.

La distribución del caucho granulado se muestra en las figuras 2.2 y 2.3, presenta formas irregulares. Se criba con el uso de mallas estandarizadas bajo la norma ASTM C136 [5] con el apoyo de Ro-Tap bajo la norma ASTM E11 [16] los cuales son indispensables para poder realizar el cribado adecuado del material y tenerlo separado de acuerdo a sus dimensiones, este proceso se explica más a detalle en el apartado de la granulometría (subcapítulo 2.4). Clasificando este material como caucho desmenuzado, conforme al tipo de granulado que este presenta.



Figura 2.2: Distribución del caucho grueso, malla 1/4".



Figura 2.3: Distribución del caucho fino, malla #8.

2.4. Granulometría del caucho triturado.

Para determinar el tamaño del caucho triturado a sustituir en la mezcla de concreto, se necesita el apoyo de los tamices utilizados en la prueba de granulometría de arenas y gravas [5], y con ello clasificar el caucho grueso y fino correspondiente. Para el cribado del caucho es necesario el uso desde la mallas 3/4" hasta la malla #4 para gravas, así como de la malla #4 hasta la malla #100 para arenas, este proceso se realiza con la finalidad de determinar entre que aberturas se encuentra el caucho y las mallas que retienen al material.

El material es cribado con ayuda del Ro-Tap (ver figura 2.4.), con el cual se pueden cribar aproximadamente 500 g de material por cada ciclo de uso, tomando 10 minutos en el aparato conforme a la norma ASTM E-11 Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves [16], con ello se pretende que el material se disgregue dentro de las mallas y asegure el adecuado cribado.

Dentro del primer intervalo de prueba, el caucho se retuvo solo en 3 mallas y el fondo de estas, siendo las mallas de 1/4", #4 y #8, al realizar la siguiente prueba el resultado fue similar, dejando en claro que el material estaría retenido en dichas mallas y el caucho se encuentra dentro de un rango de cribado.

Con el material ya cribado, se preparan las proporciones necesarias para elaborar la mezcla de concreto.



Figura 2.4: Cribado del caucho.

Capítulo 3

Caracterización del concreto.

3.1. Pruebas de los materiales.

La dosificación para el diseño de la mezcla de concreto se realiza con base en el método ACI [1], el método cuenta con excelentes referentes de aproximación a la resistencia diseñada. En el estado endurecido la mezcla debe tener una resistencia a la compresión satisfactoria y una durabilidad adecuada. Estas características son requerimientos primarios que se deben tener en un concreto.

Para el diseño de una mezcla de concreto es necesario un previo análisis con el cual se determina la calidad de los materiales, el tamaño de los agregados pétreos, el porcentaje de humedad, las propiedades índice, el porcentaje de absorción, así como su peso volumétrico.

Con el fin de diseñar adecuadamente la mezcla de concreto, con respecto a la resistencia deseada, es indispensable conocer el porcentaje de material necesario para cada tipo de mezcla, ya sea para concreto simple (CS), concreto modificado con caucho fino (CCF) o concreto modificado con caucho grueso (CCG).

Las pruebas de laboratorio requeridas para determinar la calidad de los materiales, el procedimiento a seguir y sus propiedades índice se muestran en el presente capítulo.

3.1.1. Granulometría.

El método cubre la determinación de la partícula con respecto a la distribución de tamaño de agregados finos y gruesos por medio de un tamizado preestablecido, cada malla cuenta con aberturas progresivamente más pequeñas, las cuales varían desde los 125 milímetros hasta los 20 micrómetros. Con respecto a las aperturas de malla para tamices destinados al agregado grueso van desde la malla 5" hasta la malla número 4, los destinados para el agregado fino van de la malla número 4 hasta la malla número 635, destacando que el material que atraviesa la malla número 4 es considerado como arena y donde el número de malla de arenas especifica el número de hilos en el tamiz por pulgada cuadrada.

La determinación de la granulometría se realiza para determinar la clasificación de los materiales propuestos para su uso en mezclas de concreto y el diseño de estas. Estos resultados se utilizan para determinar el cumplimiento de la distribución del tamaño de partícula, con los requisitos de especificación aplicables y para proporcionar los datos necesarios para el control de la producción de mezclas.

La granulometría se realiza conforme a la normativa ASTM C136/C136M-14. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates [5].

Esta especificación define los requisitos para la clasificación y calidad de los agregados fino y grueso, que serán empleados en una mezcla de concreto. Es utilizado en para definir la calidad de los agregados, el tamaño máximo nominal del agregado, su tamaño máximo y el módulo de finura en arenas y otros requisitos específicos para su clasificación.

Para la granulometría del agregado fino se cuenta con una muestra de 1000 g. se consideran las mallas #4, #8, #16, #30, #50, #100 y #200, de las cuales se obtuvo la distribución mostrada en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Granulometría para una muestra de 1000 g. de arena.

Malla	Abertura	Peso	% Retenido	% Acumulado	% Pasa
No.	(mm.)	(g.)			
3/4"	19.1	0	0	0	100
3/8"	9.5	0	0	0	100
#4	4.75	70.75	7.13	7.13	100
#8	2.36	180.25	18.17	25.30	74.70
#16	1.18	178.45	17.99	43.29	56.71
#30	0.6	174.05	17.55	60.84	39.16
#50	0.355	178.15	17.96	78.80	21.20
#100	0.15	95.15	9.59	88.39	11.61
#200	0.074	79.15	7.98	96.37	3.63
Fondo		36.05	3.63	100	0
Total		992	100		

Con los datos anteriores se procede a obtener el módulo de finura conforme a la fórmula 3.1, la cual nos proporciona un valor de 3.04.

$$MF = \frac{\sum \%Acumulado (1/4", 3/8" \#4, \#8, \#16, \#30, \#50, \#100)}{100} \quad (3.1)$$

De acuerdo a los datos proporcionados por tabla 3.1 se construye la gráfica 3.1.

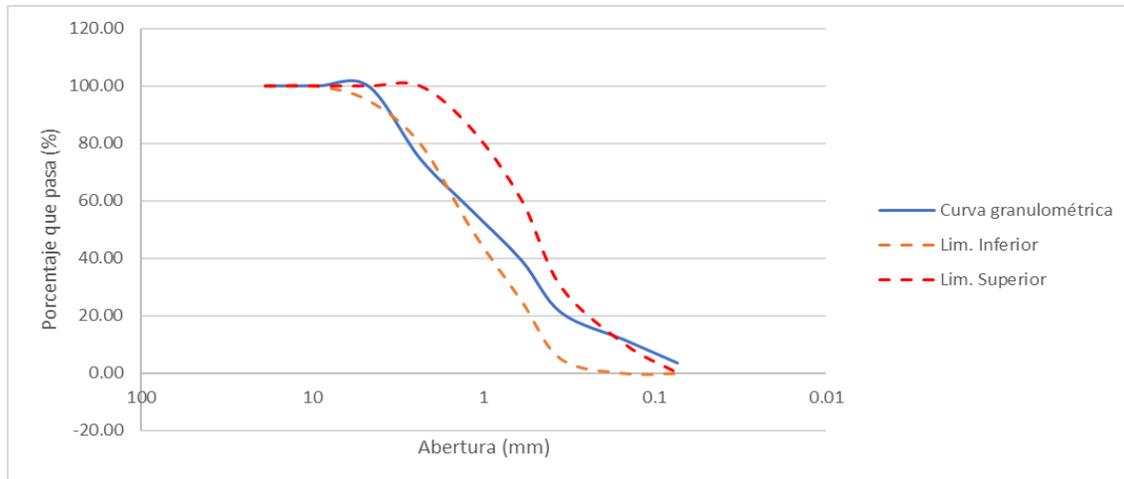


Figura 3.1: Curva granulométrica para arena.

Para la granulometría del agregado grueso se requiere de una muestra de 1000 g. y se consideran únicamente las mallas de #4, 1/4", 3/8", 1/2", 3/4" y 1" de las cuales se obtuvo la distribución mostrada en la tabla 3.2

Tabla 3.2: Granulometría para una muestra de 1000 g. de grava.

Malla	Abertura	Peso	% Retenido	% Acumulado	% Pasa
No.	(mm)	(g)	-	-	-
3/4	19.1	134	13.50	13.50	100
1/2	12.7	424.7	42.77	56.27	43.73
3/8	9.52	244.3	24.60	80.87	19.13
1/4	6.35	126.2	12.71	93.58	6.42
#4	4.75	42.2	4.25	97.83	2.17
Fondo	-	21.5	2.17	100	0
Total	-	992.9	100	-	-

Para determinar los porcentajes retenidos en los tamices, es necesaria la fórmula 3.2

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Peso retenido} \cdot 100}{\text{Peso total}} \quad (3.2)$$

De acuerdo a los datos proporcionados por la tabla 3.2 se construye la gráfica 3.2.

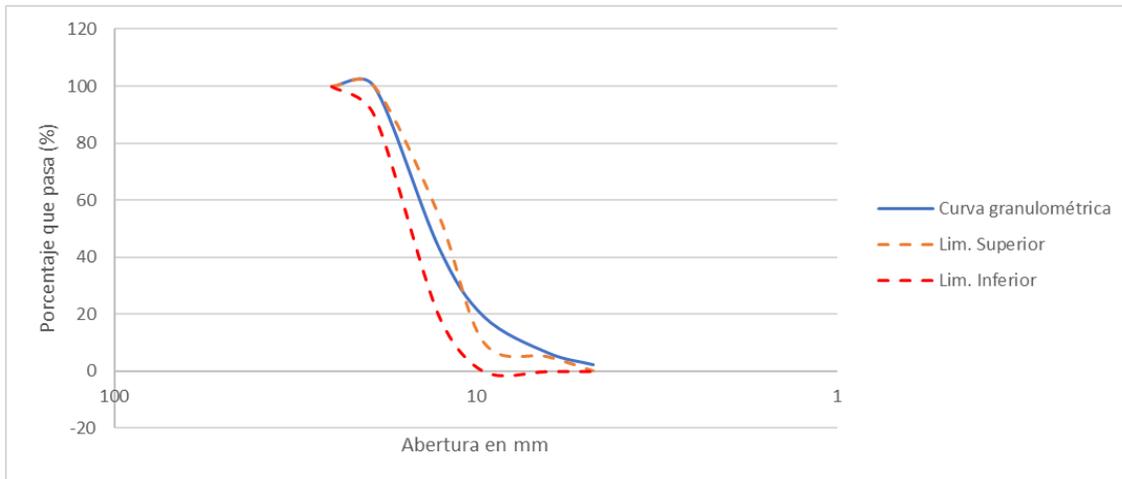


Figura 3.2: Curva granulométrica para grava.

Contando con los valores anteriores se define un TMA (Tamaño máximo del agregado) de 3/4", ya que es la malla anterior inmediata a la del tamaño máximo nominal y se define un TMN (Tamaño Máximo Nominal del Agregado) de 1/2", esto se debe a que la mayor parte de la muestra se retiene dentro de la malla 1/2". Teniendo los valores del TMN y el módulo de finura se procede a adecuarlos a la mezcla de concreto.

3.1.2. Porcentaje de absorción.

La absorción de los agregados se determina con la medición del aumento en masa de una muestra secada en horno y sumergida en agua después de 24 horas, el método de ensayo cubre la determinación de la relación de densidad y la absorción de agregados gruesos. La densidad relativa es una cantidad sin dimensiones y se expresa como secado en horno o como densidad relativa aparente de la superficie seca saturada del agregado. Esto conforme a la norma ASTM C127-15. Standard test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate [4].

La densidad relativa se determina después de secar el agregado por completo en un horno de convección a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, la absorción se determina después de remojar el agregado durante un periodo prescrito de 24 horas y posteriormente es secado de forma superficial, obteniendo el estado "triple s" (SSS), por sus siglas, es el material saturado y superficialmente seco. Ya que se tiene el material en el estado triple SSS, se vuelve a secar la muestra en un horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

El método se compone de 2 muestras, una muestra de grava de 500 g, así como una muestra de arena de 300 g, las cuales se depositan durante 24 horas en el horno de convección a 100°C , arrojando como resultado una pérdida de 1.1 g de agua para la grava, así como una pérdida de 35.2 g para la arena, lo cual representa un 0.21 % de absorción de la grava, y un 8.79 % de absorción para la arena.

Para poder determinar el porcentaje de absorción, es necesario recurrir a la formula 3.3 mostrada a continuación.

$$\% \text{ Absorción} = \frac{Wb - Ws}{Ws} \quad (3.3)$$

donde:

Wb = Peso del material en estado SSS,

Ws = peso del material seco.

3.1.3. Porcentaje de humedad.

El método de ensayo cubre la determinación del porcentaje de humedad evaporable en una muestra de agregado por secado, como es la humedad de la superficie y de la humedad en los poros del agregado, conforme a la norma ASTM C566-13 Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying [12].

El método se caracteriza por tomar una muestra de material obtenida del banco de materiales expuestos al ambiente y dejarlo secar durante un periodo de 24 horas en un horno de convección y con ello obtener el valor de la humedad presente en el material a temperatura ambiente para saber el ajuste necesario en la mezcla de concreto.

Para realizar el método se requieren 2 muestras de 500 g, una para el caso de arena y otra para el de grava, las cuales se saturan durante un periodo de 24 horas; posteriormente se realiza el procedimiento para que ambos materiales se encuentren en estado SSS y se procede a su pesado. Cuando el material se encuentre en dicho estado se procede a dejarlos reposar en el horno de convección durante 24 horas a una temperatura de $100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$.

Al terminar este periodo se pesa el material nuevamente, donde se obtiene una pérdida de 27.1 g para la muestra grava, así como una pérdida de 3.4 g para la muestra de arena, lo cual representa una pérdida de 0.0573 % para grava, así como una pérdida de 0.0068 % para arena.

Para poder determinar el porcentaje de humedad, es necesario recurrir a la formula 3.4.

$$W \% = \frac{Wh - Ws}{Ws} \quad (3.4)$$

donde:

$W \%$ = Porcentaje de humedad,

Wh = peso del material húmedo,

Ws = peso del material seco.

3.1.4. Peso volumétrico.

El método cubre la determinación de la mayor densidad de agregado en una condición compactada o suelta y los vacíos presentes entre las partículas, ya sea en agregados finos, gruesos o mixtos. El método es aplicable a los agregados no superiores a los 125 mm (5 in), en tamaño máximo nominal y se rige bajo la norma ASTM C29/C29M-09 denominada Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate [8].

Otra terminología tradicional usada para describir esta propiedad se puede denotar como el peso por unidad de volumen, en otras palabras, la masa por unidad de volumen o densidad.

El método consiste en llenar el recipiente de peso volumétrico y pesarlo, posterior a ello se compacta el material con la varilla punta de bala, se llena nuevamente y se enrasa, posterior a ello se vuelve a pesar, esto se realiza con el fin de obtener los valores necesarios.

Para poder determinar el peso volumétrico, es necesario recurrir a la formula 3.5.

$$Pv = \frac{Pr}{Vr} \quad (3.5)$$

donde:

Pv = Peso volumétrico,

Pr = peso de recipiente con material compactado,

Vr = volumen del recipiente.

3.2. Diseño de mezclas de concreto.

Esta práctica estándar describe métodos para seleccionar proporciones para el correcto diseño de concreto a base de cemento hidráulico con y sin otros materiales cementantes y/o aditivos químicos.

El método arroja una primera aproximación de proporciones destinadas a ser verificadas por lotes de prueba en el laboratorio o en el campo y ajustadas, según sea necesario, para producir las características deseadas en el concreto, la mezcla diseñada se realiza con base en un metro cubico de concreto, por lo cual el método muestra valores de los volúmenes necesarios para cada agregado.

El concreto está compuesto principalmente de agregados finos y gruesos, cemento portland, agua, y puede contener otros materiales cementantes y/o aditivos químicos, también contendrá cierta cantidad de aire atrapado.

3.2.1. Concreto simple.

El diseño de la mezcla de concreto se encuentra bajo el método ACI 211.1-91 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete [1]. Para el diseño de la mezcla de concreto, y tomando a consideración los datos arrojados anteriormente contamos con:

- Módulo de finura 3.04
- Densidad de cemento 3.15 kg/m³
- Densidad de arena 2.37 kg/m³
- Densidad de grava 2.33 kg/m³
- Absorción de arena 8.792 %
- Absorción de grava 0.21 %
- Humedad de grava 0.06 %
- Humedad arena 0.01 %
- TMA 3/4- 19 mm
- TMN 1/2- 9.5 mm

De acuerdo a los datos anteriores se procede a determinar la cantidad de agua necesaria para un f'c de 250 kg/cm² la cual se obtiene de acuerdo a la tabla 3.3, correspondiente al método de ACI [1].

Tabla 3.3: Contenido de agua y aire aproximados para diferentes tamaños máximos nominales de los agregados (Tabla 6.3.3 ACI) [1].

Revenimiento (asentamiento) (mm)	Agua, kilogramos por metro cúbico de concreto, para los tamaños de agregados indicados.							
	9.5 mm	12.5 mm	19 mm	25 mm	37.5 mm	50 mm	75 mm	150 mm
Concreto sin aire incluido								
25 a 50	207.470	198.748	186.882	177.983	163.151	154.252	130.521	112.723
75 a 100	228.411	216.546	201.714	192.815	177.983	169.084	145.353	124.588
150 a 175	243.243	228.411	213.58	201.714	186.882	177.930	160.185	
Mas de 175								
Cantidad aproximada de aire atrapado en un concreto sin aire incluido, porcentaje.	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2

Con base en la tabla antes citada se obtiene un total de 201.7 litros los cuales son necesarios para un revenimiento de 75 a 100 mm y son tomadas a partir del TMN el cual es de 3/4" (19 mm).

Obtenidos los valores anteriores se procede a determinar la relación agua cemento de acuerdo a la tabla 3.4.

Tabla 3.4: Relación agua cemento y resistencia a la compresión del concreto [1].

Resistencia a compresión a los 28 días, kg/cm ²	Relación agua-material cementante en masa	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
450	0.38	0.31
400	0.43	0.34
350	0.48	0.40
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.70	0.61
150	0.80	0.72

Con respecto a la tabla 3.4, para un $f'c$ de 250 kg/cm² es necesaria una relación agua cemento a 0.62, con la cual se obtiene la cantidad de cemento necesaria para 1 m³ de concreto, para obtener el valor de la relación agua cemento es requerida la siguiente fórmula:

$$C = \frac{A}{Rac} \quad (3.6)$$

donde:

C = Cemento,

A = agua,

Rac = relación agua cemento.

De acuerdo a la ecuación anterior, se procede a la sustitución de los datos antes obtenidos en la formula 3.6.

$$\text{Cemento} = 201.7/0.62 = 325.3 \text{ kg}$$

Para determinar la cantidad necesaria de agregado grueso es necesario el módulo de finura el cual es de 3.04 y el peso volumétrico de la grava el cual es 1513 kg/m³, de acuerdo a los datos anteriores en necesaria la tabla 3.5.

Tabla 3.5: Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto [1].

Tamaño máximo nominal del agregado en mm (pulg.)	Volumen de agregado seco por unidad de volumen de concreto para diferentes módulos de finura.			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3.5 (3/8)	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2)	0.59	0.57	0.55	0.53
19 (3/4)	0.66	0.64	0.62	0.60
25 (1)	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 (1 1/2)	0.75	0.73	0.71	0.69
50 (2)	0.78	0.76	0.74	0.72
75 (3)	0.82	0.80	0.78	0.76
150 (6)	0.87	0.85	0.83	0.81

Con base en la tabla 3.5, se cuenta con un valor de 0.60 correspondiente al módulo de finura de 3.04. Para obtener la cantidad necesaria se requiere multiplicar el factor 0.60 por el peso volumétrico del material el cual arroja de resultado:

$$\text{Determinación de agregado grueso} = (0.60) * (1513 \text{ kg}) = 907.8 \text{ kg}$$

Es necesario determinar la cantidad de arena por peso volumétrico, la cual requiere convertir los valores antes mencionados de un metro cúbico, esto se obtiene multiplicando el peso del material por su densidad, la conversión se muestra en la tabla 3.6.

Tabla 3.6: Conversión de materiales de metros cúbicos a litros o kilogramos.

	m ³	conversión
Agua	0.2017	201.7 L
Cemento	0.1030	325.30 kg
Grava	0.3900	907.80 kg

Teniendo los valores absolutos se requiere la sumatoria de los materiales en m³ y se le resta un metro cúbico, el cual arroja el valor necesario de agregado fino por metro cúbico.

$$\text{Arena} = 0.305 \text{ m}^3 = 723.8 \text{ kg}$$

Contando con los datos anteriores se procede a realizar la corrección por absorción, para ello es utilizada la fórmula 3.7.

$$\text{Corrección de agua} = (\% \text{humedad} - \% \text{absorción}) \quad (3.7)$$

$$\text{Corrección para grava} = 0.06 - 0.021 = 0.15$$

$$\text{Corrección para arena} = 0.01 - 8.792 = 8.791$$

De acuerdo a los valores anteriores, se procede a obtener la corrección de agua necesaria para la mezcla de acuerdo con la ecuación 3.8.

$$\text{Corrección} = \text{Agua total} - \left[\text{peso de grava} \cdot \left(\frac{\text{corrección para grava}}{100} \right) - \left(\frac{\text{corrección para arena}}{100} \right) \right] \quad (3.8)$$

$$\text{Corrección de agua} = 201,7 - \left(907,8 \cdot \left(\frac{0,15}{100} \right) \right) - \left(723,8 \cdot \left(\frac{8,791}{100} \right) \right) = 266.64 \text{ L.}$$

En resumen, los datos obtenidos en las pruebas anteriores se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7: Material necesario por m³.

Material	Material necesario
Arena	723.80 kg
Grava	907.80 kg
Cemento	325.30 kg
Agua	266.64 L

Para realizar las pruebas se requiere un volumen de 0.1386 m³ de concreto tomando a consideración un desperdicio del 15% para un total de 5 vigas de dimensiones 0.15 x 0.15 x 0.60 m, además de 10 cilindros de 0.15 x 0.30 m. El número de especímenes antes mencionado se toma para cada tipo de concreto, concreto simple, concreto modificado con caucho grueso, así como concreto modificado con caucho fino.

Teniendo el volumen necesario se multiplica por las dimensiones de los especímenes, se muestran en la tabla 3.8.

Tabla 3.8: Material necesario para especímenes de CS.

Material	Material necesario
Arena	100.32 kg
Grava	125.81 kg
Cemento	45.09 kg
Agua	36.95 L

3.2.2. Concreto con caucho fino.

Para la mezcla de concreto modificado con caucho fino se toma como base el diseño del concreto simple por metro cubico, con la diferencia que le fue restado un 10% del peso del agregado fino el cual es sustituido por caucho fino. Con respecto a lo antes mencionado, se

tiene como resultado la siguiente dosificación para un metro cubico de concreto ubicado en la tabla 3.9.

Tabla 3.9: Material necesario para un m³ de CCF.

Material	Material necesario
Arena	654.10 kg
Grava	907.80 kg
Cemento	325.30 kg
Agua	260.28 L

Para realizar las pruebas necesarias se requiere un volumen de 0.1386 m³ de concreto tomando a consideración un desperdicio del 15 % para un total de 5 vigas de dimensiones 0.15x0.15x0.60 m, ademas de 10 cilindros de 0.15x0.30 m; de acuerdo al volumen necesario se multiplica por los valores anteriores dando como resultado la tabla 3.10.

Tabla 3.10: Material necesario para especímenes de CCF.

Material	Material necesario
Arena	90.28 kg
Grava	125.81 kg
Cemento	45.09 kg
Agua	36.07 L

3.2.3. Concreto con caucho grueso.

De la misma forma que el diseño de la mezcla de concreto con caucho fino, se toma la dosificación de concreto simple y se le resta el 10 % del agregado grueso. Como resultado se cuenta con una dosificación mostrada en la tabla 3.11.

Tabla 3.11: Material necesario para un m³ de CCG.

Material	Material necesario
Arena	723.80 kg
Grava	817.02 kg
Cemento	325.30 kg
Agua	266.51 L

Para realizar las pruebas necesarias se requiere un volumen de 0.1386 m³ de concreto tomando a consideración un desperdicio del 15 % para un total de 5 vigas de dimensiones 0.15x0.15x0.60 m, ademas de 10 cilindros de 0.15x0.30 m; de acuerdo al volumen necesario se multiplica por los valores anteriores dando como resultado la tabla 3.12.

Tabla 3.12: Material necesario para especímenes de CCG.

Material	Material necesario
Arena	100.32 kg
Grava	113.23 kg
Cemento	45.09 kg
Agua	36.94 L

3.3. Elaboración y curado del concreto en laboratorio.

Conforme a la norma C192/C192M – 15 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory [6] la cual indica el procedimiento de elaboración para una mezcla de concreto, la norma especifica el material requerido y el uso adecuado para poder colar el producto en los distintos moldes.

El material requerido para la elaboración de concreto en el laboratorio es el siguiente:

- Moldes cilíndricos conforme a la norma ASTM C470/C470M [10], de dimensiones 0.15 x 0.30 m.
- Moldes de viga o prismáticos conforme a la norma C192/C192M-15 [6], de dimensiones 0.15 x 0.15 x 0.60 m.
- Desmoldante (aceite o grasa).
- Varilla de apisonamiento o punta de bala.
- Maso de goma o caucho con un peso 0.6 ± 0.2 kg.
- Pala.
- Cucharón rectangular.
- Cuchara de albañil.
- Enrasador.
- Probeta de 1000 ml.
- Cubetas.
- Mezcladora o revolvedora.
- Balanza de 20 kilogramos.

Como paso inicial se preparan los moldes, cilíndricos o rectangulares (ver figura 3.3) ajustados con tornillos y tuercas, posteriormente se procede al engrasado con desmoldante, con el propósito de facilitar el retiro del molde.



Figura 3.3: Preparación de moldes.

Con los moldes preparados para verter la mezcla de concreto, se toman los materiales de la mezcla diseñada conforme a la norma ACI 211.1-91 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete [1].

Teniendo las cantidades pertinentes para la elaboración del concreto es necesario preparar una superficie lisa en donde realizar la mezcla, en caso de no contar con revolvedora. Para este caso, debido a la cantidad de materiales el uso de la revolvedora es necesario (ver figura 3.4).



Figura 3.4: Revolvedora.

Se procede a introducir los materiales a la revolvedora, colocando primeramente la grava, posterior a ello se coloca la arena (ver figura 3.5).



Figura 3.5: Interior de la revolvedora con grava.

Dejando pasar unos minutos para que los materiales se mezclen bien, se coloca el cemento, cuidando de verterlo poco a poco evitando que se libere material a través del aire. Dejando pasar unos minutos para que los materiales dentro de la revolvedora se mezclen bien se incorpora el agua (ver figura 3.6).



Figura 3.6: Mezclado de concreto.

Para el caso de las mezclas de concreto modificadas se incorporan las cantidades necesarias para la mezcla dejando al final el verter el caucho granulado (ver figura 3.7).



Figura 3.7: Incorporación del caucho a la mezcla de concreto.

Esto se realiza para poder garantizar que la mezcla de concreto se mezclare de forma adecuada y sus componentes principales se homogeneizaran y así evitar afectar la resistencia del concreto, logrando a su vez que el caucho se integre por completo a la mezcla (ver figura 3.8).



Figura 3.8: Proceso de mezclado del caucho en el concreto.

Conforme se va mezclando el material se forma una pasta mientras se integran los materiales. A esta pasta se le denomina pasta cementante, se denota al presentarse la consistencia de la figura 3.6, con la cual se deberá realizar el vaciado en los moldes correspondientes previamente preparados.

El procedimiento del llenado de dichos moldes es por medio de capas, en el caso de los

cilindros, para los moldes de las vigas deben ser 3 capas antes de llenarlos por completo, esto conforme a la norma que rige este procedimiento [6]. Cada que se incorpora una capa es necesario hacer una serie de pasos con el fin de garantizar la inexistencia de espacios o burbujas de aire dentro del molde y la mezcla de concreto (ver figura 3.9).



Figura 3.9: Colado de especímenes.

Una vez colocada la primer capa, con la varilla de apisonamiento o punta de bala se dan una serie de 25 a 30 golpes verticales concéntricos con el lado de la varilla que tiene la semi-esfera con el fin de acomodar el material adecuadamente dentro del molde y evitando golpear el fondo. Una vez completada la serie de golpes con la varilla se toma el maso de goma o caucho, con el cual se darán 3 golpes en cuatro lados distintos del molde teniendo cuidado de no dar golpes de más para así evitar la disgregación de los materiales en la mezcla de concreto (ver figuras 3.10 3.11).



Figura 3.10: Apisonamiento y golpes con el mazo de goma [6].



Figura 3.11: Colocación de la última capa de concreto.

Este procedimiento se repite con las capas restantes de material por verter en los moldes, cuando se llega a la ultima capa hay que asegurar que todo el molde este a su máxima capacidad de mezcla. Por último, con el enrasador se deja la superficie superior de forma uniforme, quitando el exceso de mezcla provocando que la cara superior quede lo mas uniforme posible para poder utilizarlos en las pruebas de laboratorio (ver figura 3.12).



Figura 3.12: Enrasado del concreto.

Una vez el molde se encuentre enrasado, es momento de colocarlo en un lugar seco y no a la intemperie. En donde se quedará almacenado durante 24 horas como mínimo (ver

figura 3.13). Posteriormente se retira el molde y se coloca dentro de una pileta de curado o botes, como se muestra en las figuras(3.14 y 3.15), donde las muestras permanecerán 28 días (como mínimo), con el fin de alcanzar la resistencia máxima de diseño prevista en los cálculos mencionados al inicio del subcapítulo.



Figura 3.13: Almacenamiento de los especímenes.



Figura 3.14: Curado de los especímenes.



Figura 3.15: Botes con agua para curado.

Capítulo 4

Pruebas de laboratorio.

El presente capítulo explica el procedimiento a seguir con respecto a las pruebas realizadas al concreto simple, al concreto con caucho fino y al concreto con caucho grueso. Las pruebas se realizan con el fin de obtener datos estadísticos y determinar sus propiedades mecánicas, contando con esto datos se realiza una comparativa con un concreto convencional que cuenta con un $f'c$ de 250 kg/cm^2 establecido en el capítulo correspondiente al diseño de mezclas 3.2.

El proceso esta regido bajo las normas ASTM pertinentes para cada prueba realizada en cada espécimen de concreto, la normativa rige el análisis de los resultados obtenidos en laboratorio, con ello se obtienen a las características de las mezclas de concreto modificado, ademas de hacer el análisis con el cual determinar la factibilidad del uso este concreto a futuro en algún campo específico de la ingeniería civil.

4.1. Resistencia a la compresión.

Para el ensayo de compresión simple en cilindros de concreto se parte de la norma C39/39M-15a Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens [9] el cual cubre la determinación de la compresión simple de probetas de concreto cilíndricos como son cilindros moldeados y núcleos perforados.

Este método de prueba consiste en aplicar una compresión (carga axial) a los cilindros o núcleos moldeados a una velocidad que está dentro de un intervalo prescrito hasta que se produce la falla. La resistencia a la compresión de la muestra se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante la prueba por el área de la sección transversal de la probeta, lo anteriormente mencionado se puede apreciar en la figura 4.1.

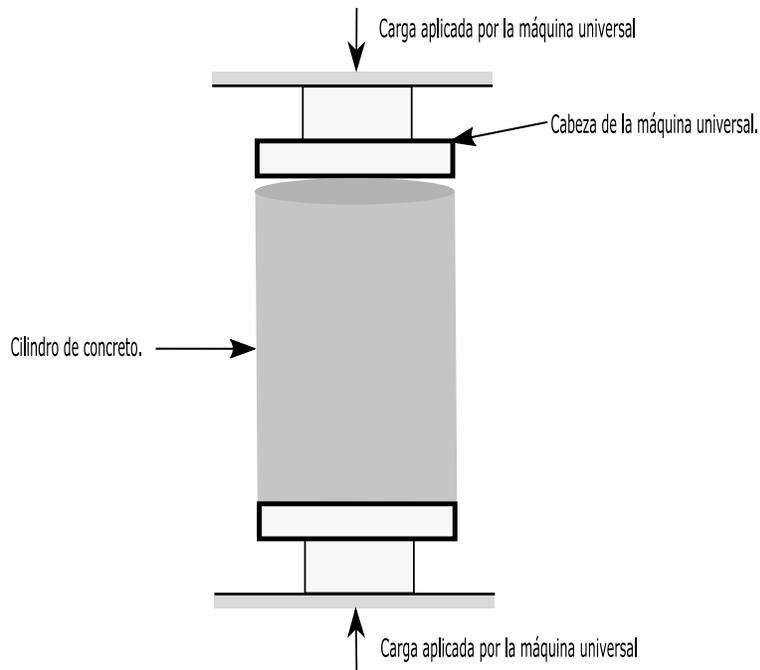


Figura 4.1: Esquema para prueba de compresión.

Los resultados de este método de ensayo se utilizan como base para control de calidad en dosificaciones de concreto, mezcla y operaciones de colocación y para este caso, asegurar la resistencia del concreto f'_c preestablecida en el diseño de la mezcla.

Para poder determinar la resistencia a la compresión del concreto simple, se requiere dividir la carga máxima alcanzada durante la prueba por el área de sección transversal de la probeta; la expresión se encuentra representada en la formula 4.1.

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (4.1)$$

donde:

P : Carga máxima,

A : área de la sección transversal.

Al aplicarse una carga en los especímenes de concreto se aprecian diferentes tipos de falla los cuales se muestran en la figura 4.2.

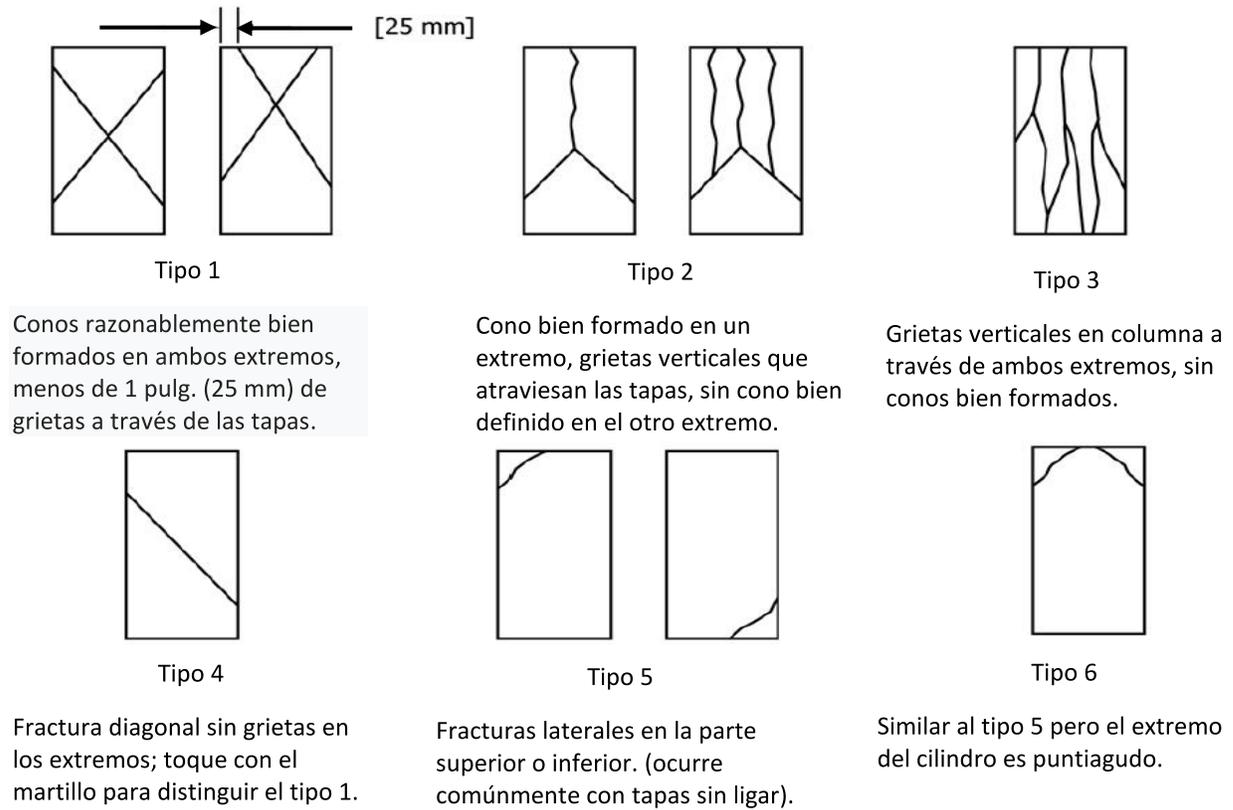


Figura 4.2: Tipos de fallas en cilindros, norma ASTM C39/C39M-15 [9].

4.1.1. Concreto simple.

Para esta prueba fueron necesarias 5 probetas de concreto simple, previo a la prueba de compresión la máquina universal requiere los datos geométricos de los cilindros a fallar, que también es especificado en la norma. Se tiene que sacar un promedio de los diámetros de cada uno de los especímenes para poder trabajar los cálculos correspondientes, conjunto a ello se tiene que sacar una longitud promedio del cilindro.

Para obtener el diámetro promedio se toman dos medidas en la cara superior y otras dos en la cara inferior del cilindro. Con respecto a la longitud se toman dos medidas una en cada extremo de la probeta como se muestra en la figura. 4.3.

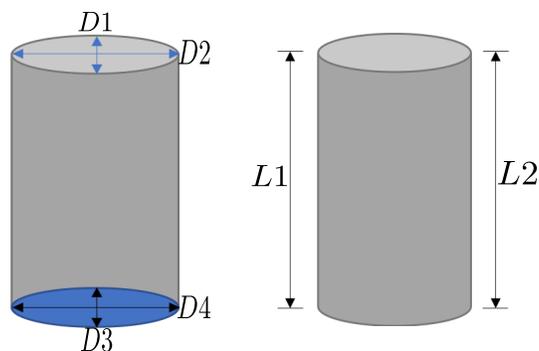


Figura 4.3: Medición de diámetros y longitudes.

Realizada la medición de diámetros en ambas caras, así como la medición de las longitudes, se realiza un promedio de ambas, el cual es necesario para calcular el $f'c$, dichos resultados se aprecian en las tablas 4.1 y 4.2.

Tabla 4.1: Diámetros promedio de los especímenes de CS.

Cilindro	D1(mm)	D2(mm)	D3(mm)	D4(mm)	Diámetro promedio(mm)
1	148.44	150.05	149.50	150.29	149.57
2	155.88	145.66	149.12	151.14	150.45
3	147.16	151.16	152.62	145.45	149.10
4	150.51	147.52	148.49	149.58	149.03
5	146.72	151.45	150.61	147.71	149.12

Tabla 4.2: Longitudes promedio de los especímenes de CS.

Cilindro	L1 (mm)	L2 (mm)	Longitud promedio(mm)
1	299	299	299.00
2	298	297	298.00
3	298	298	298.00
4	298	298	298.00
5	299	300	299.50

Adicionado a lo anterior, se requiere el peso de cada uno de los especímenes, puesto que es necesario saber el peso volumétrico de cada uno (ver figura 4.4).



Figura 4.4: Peso de los especímenes de CS.

De acuerdo a los pesos registrados de los especímenes de concreto simple, se cuenta con la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Peso de los especímenes de CS.

Cilindro	Peso (kg)
1	11.74
2	11.89
3	11.81
4	11.73
5	11.83

Con el peso y las medidas promedio obtenidas, se realizan las pruebas de compresión en la máquina universal. El gradiente de velocidad necesario en las pruebas de compresión es de 0.250 MPa/s dando una carga inicial de 0.500 kN. Obteniendo los resultados mostrados en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Carga máxima registrada por espécimen de CS.

Cilindro	Carga máxima (kN)
1	332.99
2	322.76
3	334.07
4	340.04
5	347.43

Contando con los datos geométricos se procede a calcular el $f'c$ del concreto simple aplicando la fórmula ya antes mencionada en kg/cm^2 con la cual se determina si la mezcla es adecuada para un concreto con un $f'c$ de $250 \text{ kg}/\text{cm}^2$ y con ello realizar una comparación con las demás muestras de concreto modificado con caucho, ya realizada la prueba se cuenta con los datos mostrados en la tabla 4.5.

Tabla 4.5: Resistencias a la compresión para los especímenes de CS.

Cilindro	Área (cm^2)	Área (mm^2)	Carga máxima(kg)	$f'c$ (MPa)	$f'c$ (kg/cm^2)
1	175.70	17570.28	33954.99	18.95	193.25
2	177.78	17777.65	32912.14	18.15	185.13
3	174.60	17460.04	34065.22	19.13	195.10
4	174.44	17443.65	34674.29	19.49	198.77
5	174.65	17464.72	35428.05	19.89	202.85

Realizadas las pruebas de compresión a los especímenes de concreto simple, se lleva a cabo el llenado del reporte, el cual se muestra en la tabla 4.6.

Tabla 4.6: Reporte de prueba a compresión para los especímenes de CS, norma ASTM C39/C39M-15 [9].

Concreto Simple.					
Número de identificación.	1	2	3	4	5
Diámetro.	149.57	149.1	150.45	149.03	149.12
Área de la sección transversal (mm).	17570	17460	17778	17444	17465
Carga máxima(kN).	332.99	322.76	334.07	340.04	347.43
Resistencia a la compresión (MPa).	19.0	18.5	18.8	19.5	19.9
Tipo de fractura.	Tipo 3	Tipo 6	Tipo 4	Tipo 1	Tipo 2
Defectos.	Superficie superior irregular				
Edad del espécimen.	28 Días				
Peso volumétrico (kg / m^3)	0.002236	0.002287	0.002233	0.002258	0.002263

En la figura 4.5, se muestran los especímenes después de la prueba a compresión para la mezcla de concreto simple.



Figura 4.5: Fracturas visibles en los especímenes de CS.

4.1.2. Concreto con caucho fino.

Esta mezcla de concreto, de igual forma que el concreto simple, requiere de 5 probetas de concreto con caucho fino, así como la toma de los datos geométricos de los cilindros a fallar tanto de longitudes como de diámetros; las dimensiones de los cilindros se obtuvieron como se muestra en la figuras anterior. 4.3

Realizada la medición de diámetros en ambas caras, así como la medición de las longitudes, se realiza un promedio de ambas, el cual es necesario para calcular el $f'c$, dichos resultados se aprecian en las tablas 4.7 y 4.8.

Tabla 4.7: Diámetros promedio de los especímenes de CCF.

Cilindro	D1(mm)	D2(mm)	D3(mm)	D4(mm)	Diámetro promedio(mm)
2	150.81	147.26	149.04	150.67	149.45
3	151.25	148.96	149.41	151.33	150.24
5	151.73	148.43	151.21	149.40	150.19
6	151.66	147.99	149.21	151.10	149.99
7	151.73	146.80	149.92	149.77	149.56

Tabla 4.8: Longitudes promedio de los especímenes de CCF.

Cilindro	L1 (mm)	L2 (mm)	Longitud promedio(mm)
2	300	301	300.50
3	298	296	297.00
5	295	300	297.50
6	299	300	299.50
7	302	302	302.00

DE la misma forma que con el concreto simple, es necesario tomar los pesos de los especímenes, con lo cual se obtiene la tabla 4.9 en la cual se muestran los pesos obtenidos de los especímenes concreto con caucho fino.

Tabla 4.9: Peso de los especímenes de CCF.

Cilindro	Peso (kg)
2	11.54
3	11.62
5	11.56
6	11.60
7	11.60

Contando con los datos geométricos, se realizan las pruebas de compresión en la máquina universal. El gradiente de velocidad necesario en las pruebas de compresión es de 0.250

MPa/s dando una carga inicial de 0.500 kN. Obteniendo los resultados mostrados en la tabla 4.10.

Tabla 4.10: Carga máxima registrada por espécimen de CCF.

Cilindro	Carga máxima (kN)
2	253.56
3	249.16
5	255.39
6	261.16
7	255.54

Se procede a calcular el $f'c$ del concreto con caucho fino, aplicando la fórmula ya antes mencionada 4.1 en kg/cm^2 con la cual se determina si esta mezcla de concreto cuenta con una resistencia a la compresión superior o por contrario, se presente una disminución en la resistencia. Los resultados obtenidos están contenidos en la tabla 4.11:

Tabla 4.11: Resistencias a la compresión para los especímenes de CCF.

Cilindro	Área (cm^2)	Área (mm^2)	Carga máxima(kg)	$f'c$ (MPa)	$f'c$ (kg/cm^2)
2	175.42	17542.11	25856.53	14.45	147.40
3	177.28	17728.05	25408.06	14.05	143.32
5	177.16	17716.25	26043.04	14.42	147.00
6	176.69	17669.10	26631.72	14.78	150.73
7	175.68	17567.94	26058.13	14.55	148.33

Realizadas las pruebas a compresión de los especímenes de concreto con caucho fino, se lleva a cabo el llenado del reporte, el cual se muestra en la tabla 4.12.

Tabla 4.12: Reporte de prueba a compresión para los especímenes de CCF bajo la norma ASTM C39/C39M-15 [9].

Concreto Con Caucho Fino.					
Número de identificación.	2	3	5	6	7
Diámetro.	149.45	150.24	150.19	149.99	149.56
Área de la sección transversal (mm).	17542	17728	17716	17669	17568
Carga máxima (kN).	253.56	249.16	255.39	261.16	255.54
Resistencia a la compresión (MPa).	14.5	14.1	14.4	14.8	14.5
Tipo de fractura.	Tipo 5	Tipo 5	Tipo 4	Tipo 2	Tipo 5
Defectos.	Superficie superior irregular				
Edad del espécimen.	28 Días				
Peso volumétrico (kg / m^3)	0.002190	0.002207	0.002195	0.002192	0.002187

A continuación se muestran los especímenes después de la prueba a compresión para el concreto con caucho fino.



Figura 4.6: Fracturas visibles en los especímenes de CCF.

4.1.3. Concreto con caucho grueso.

De la misma forma que con el concreto simple y el concreto con caucho fino se requiere de 5 probetas de concreto con caucho grueso. Así como en la pruebas anteriores, también se requiere la toma de longitudes y diámetros, las dimensiones de los cilindros nuevamente se obtuvieron como se muestra en la figura anterior 4.3.

Realizada la medición de diámetros en ambas caras, así como la medición de las longitudes, se realiza un promedio de ambas, el cual es necesario para calcular el $f'c$, dichos resultados se muestran en las tablas 4.13 y 4.14

Tabla 4.13: Diámetros promedio de los especímenes de CCG.

Cilindro	D1(mm)	D2(mm)	D3(mm)	D4(mm)	Diámetro promedio(mm)
3	147.03	151.62	151.37	148.54	149.64
5	148.35	151.56	151.51	148.79	150.05
7	150.68	147.36	151.09	147.43	149.14
8	151.04	148.06	145.91	152.81	149.46
11	152.10	146.54	151.43	147.88	149.49

Tabla 4.14: Longitudes promedio de los especímenes de CCG.

Cilindro	L1 (mm)	L2 (mm)	Longitud promedio(mm)
3	297	298	297.50
5	299	297	298.00
7	299	297	298.00
8	297	297	297.00
11	301	302	301.50

De la misma forma que con los especímenes de concreto simple, así como los especímenes de concreto con caucho fino, se procede a tomar los pesos de los especímenes de concreto con caucho grueso, los cuales se encuentran contenidos en la tabla 4.15.

Tabla 4.15: Peso de los especímenes de CCG.

Cilindro	Peso (kg)
3	11.40
5	11.28
7	11.31
8	11.28
11	11.39

Con el peso y las medidas promedio obtenidas, se realizan las pruebas de compresión en la máquina universal. El gradiente de velocidad ocupado en las pruebas de compresión es de

0.250 MPa/s dando una carga inicial de 0.500 kN. Obteniendo los resultados mostrados en la tabla 4.16

Tabla 4.16: Carga máxima registrada por espécimen de CCG.

Cilindro	Carga máxima (kN)
3	195.70
5	192.16
7	191.79
8	226.47
11	183.93

Se procede a calcular el f'_c del concreto con caucho grueso, aplicando la fórmula ya antes mencionada 4.1 en kg/cm^2 con la cual se determina si esta mezcla de concreto cuenta con una resistencia a la compresión superior o por contrario, se presente una disminución en la resistencia. De acuerdo a los datos obtenidos, se cuenta con la tabla 4.17

Tabla 4.17: Resistencias a la compresión para los especímenes de CCG.

Cilindro	Área (cm^2)	Área (mm^2)	Carga máxima(kg)	f'_c (MPa)	f'_c (kg/cm^2)
3	175.87	17586.74	19956.35	10.13	113.47
5	176.83	17683.24	19595.17	10.87	110.81
7	174.69	17469.41	19557.13	10.98	111.95
8	175.44	17544.45	23094.43	12.91	131.64
11	175.52	17551.50	18755.84	10.48	106.86

Realizadas las pruebas a compresión de los especímenes de concreto con caucho grueso, se lleva a cabo el llenado del reporte, el cual se muestra en la tabla 4.18.

Tabla 4.18: Reporte de prueba a compresión para los especímenes de CCG bajo la norma ASTM C39/C39M-15 [9].

Concreto Con Caucho Grueso.					
Número de identificación.	3	5	7	8	11
Diámetro.	149.64	150.05	149.14	149.46	149.49
Área de la sección transversal (mm).	17587	17683	17469	17544	17552
Carga máxima en (kN).	195.70	192.16	191.79	226.47	183.93
Resistencia a la compresión (Mpa).	11.1	10.9	11.0	12.9	10.5
Tipo de fractura.	Tipo 6	Tipo 5	Tipo 5	Tipo 3	Tipo 6
Defectos.	Superficie superior irregular				
Edad del espécimen.	28 días				
Peso volumétrico (kg / m^3)	0.002178	0.002140	0.002172	0.002164	0.002152

En la figura 4.7 se muestran los especímenes después de la prueba a compresión para el concreto con caucho grueso.



Figura 4.7: Fracturas visibles en los especímenes de CCG.

4.2. Resistencia a la flexión.

La prueba de flexión se realiza en base a la norma ASTM C293/293M-10 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading) [7]. Para este conjunto de pruebas las vigas de concreto fueron coladas conforme a la norma ASTM C192M [6] la cual cubre la determinación de la flexión en probetas de concreto con el uso de una viga simple con carga en punto medio como se aprecia en la figura 4.8. La resistencia a la flexión se expresa como el módulo de ruptura (MR), siendo este cerca del 10 % al 20 % de la resistencia a la compresión.

La prueba a flexión es muy poco utilizada para el concreto estructural, siendo su mayor campo de aplicación en el control de campo de los pavimentos.

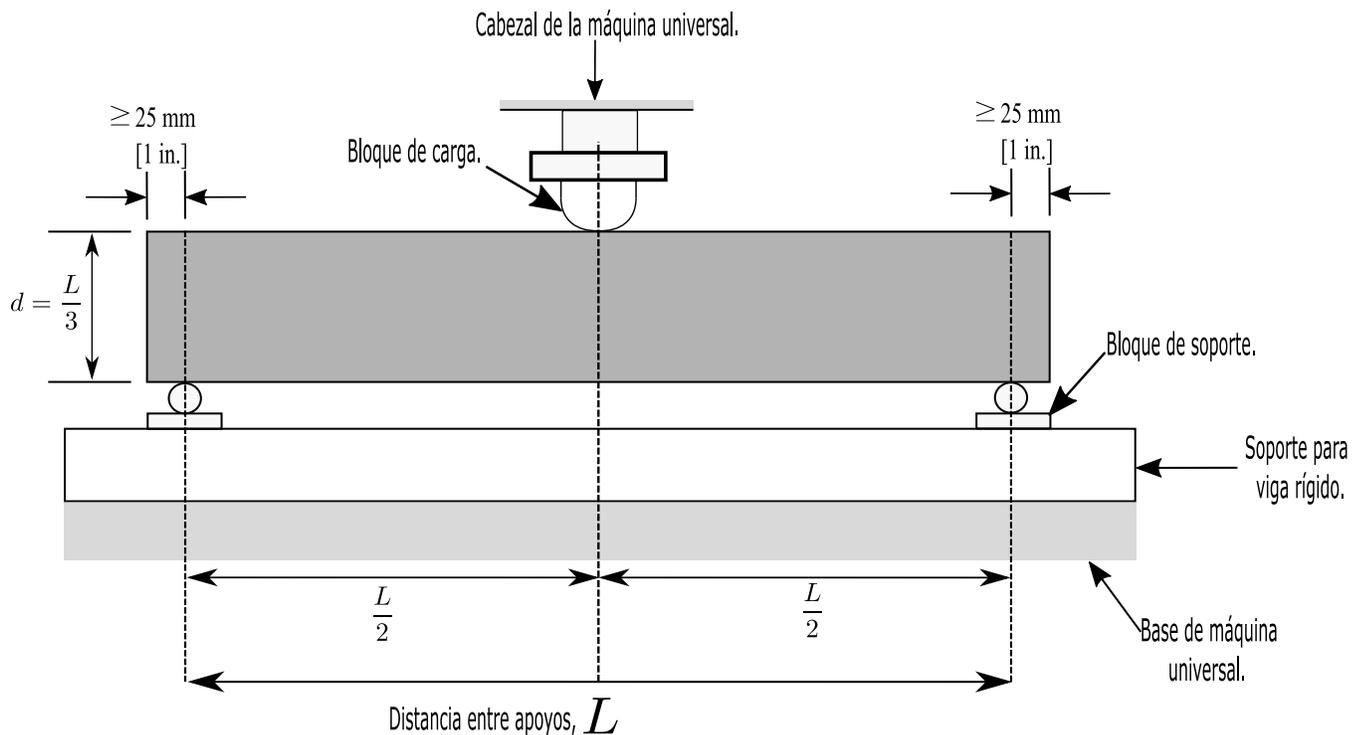


Figura 4.8: Esquema de la prueba de flexión, viga de 3 puntos.

Para determinar las dimensiones de la viga de concreto, se toman las medidas del ancho (b), longitud (L) y peralte (d); correspondientes a cada viga conforme a lo establecido en la norma, se toman 3 medidas longitudinales y con ello se obtiene un promedio, como se muestra en las figuras 4.9 y 4.10.

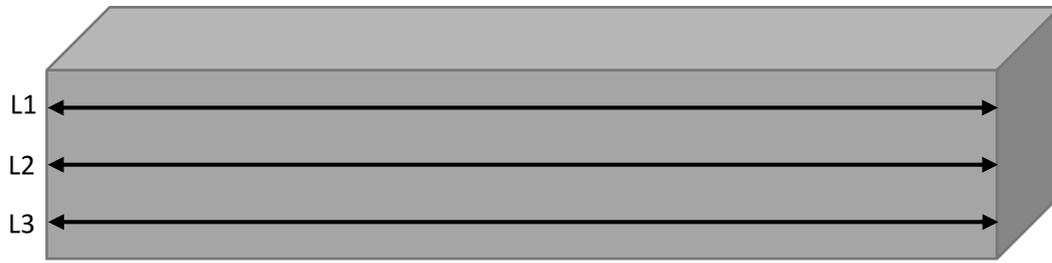


Figura 4.9: Medición de longitudes.

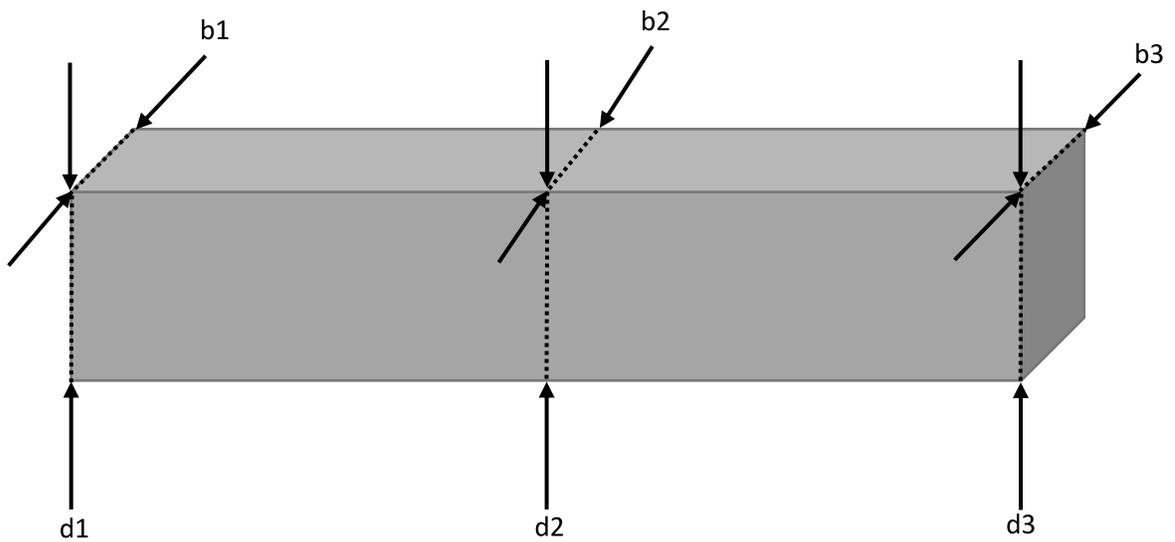


Figura 4.10: Medición de ancho y peralte.

Para obtener el módulo de ruptura es necesaria la formula 4.2.

$$MR = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (4.2)$$

donde:

MR = Módulo de ruptura,
P = carga máxima registrada,
L = longitud entre apoyos,
b = ancho de la sección,
d = peralte de la sección.

4.2.1. Concreto simple.

Esta prueba requiere de vigas con las medidas 0.15x0.15x030 m. Previo a la prueba es necesario obtener los datos geométricos para poder realizar los cálculos correspondientes y obtener el módulo de ruptura.

Estos datos geométricos fueron tomados como se muestra en las figuras 4.9 y 4.10; siendo necesarias 3 medidas por cada dato requerido y posteriormente obtener un promedio con el cual realizar los cálculos oportunos. En las pruebas de flexión realizadas a los distintos tipos de concreto se aplicó un gradiente de velocidad de 0.068 kN/s conforme a la norma antes mencionada.

De acuerdo a lo anterior, es necesaria la toma de las medidas de los anchos del espécimen, así como la toma de las medidas de los peraltes y de las longitudes, esto se realiza con el objetivo de obtener medidas promedio. Las medidas se encuentran dentro de la tablas 4.19 y 4.20, la cuales se muestran a continuación:

Tabla 4.19: Anchos y peraltes promedio en los especímenes de CS.

Viga	b1(mm)	b2(mm)	b3(mm)	d1(mm)	d2(mm)	d3(mm)	b prom.(mm)	d prom.(mm)
1	149.71	150.06	149.39	150.72	150.73	150.46	149.72	150.64
2	150.49	150.43	150.68	150.67	150.99	151.06	150.53	150.57
3	151.01	150.98	151.45	150.75	150.59	151.24	151.15	150.86
4	150.64	150.56	151.11	150.94	150.65	151.11	150.77	150.90
5	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00

Tabla 4.20: Longitudes promedio en los especímenes de CS.

Viga	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Longitud promedio(mm)
1	599	600	600	599.67
2	597	597	598	597.33
3	599	598	598	598.33
4	598	598	598	598.00
5	595	595	595	595.00

Realizadas las pruebas de flexión correspondientes a los especímenes de concreto simple, se lleva a cabo el reporte según la norma ASTM C293/293M-10, la información se encuentra contenida en la tabla 4.21.

Tabla 4.21: Reporte de prueba a flexión para las vigas de CS, conforme a la norma C293 [6].

Concreto simple.					
Número de identificación.	1	2	3	4	5
Ancho promedio (mm).	149.72	150.53	151.15	150.77	150
Peralte promedio (mm).	150.64	150.57	150.86	150.90	150
Distancia entre apoyos (mm).	550	550	550	550	550
Carga máxima. (kN)	11706	12647	13438	12271	14228
Modulo de ruptura (Mpa)	2.84	3.06	3.22	2.95	3.48
Registro de la condición de curado y humedad aparente de la muestra al momento de la prueba.	Curado de 28 días, al momento de la prueba se encontraba superficialmente seca.				
Muestras tapadas.	NO				
Uso de cuñas de cuero.	NO				
Defectos de la muestra.	Aparente desgaste en los bordes.	Desgaste en los bordes.	Desgaste en las esquinas.	Desgaste en los bordes y esquinas.	Sección transversal mayor al molde.
Edad del espécimen	29 Días.				

En la figura 4.11, se muestran los especímenes de concreto simple después de la prueba de flexión.



Figura 4.11: Vigas de CS.

4.2.2. Concreto con caucho fino.

De igual forma que el concreto simple, se requieren 5 vigas de concreto con caucho fino, así como la toma de las medidas de peraltes, anchos y longitudes promedio, las cuales se muestran en las tablas 4.22 y 4.23.

Tabla 4.22: Anchos y peraltes promedio en los especímenes de de CCF.

Viga	b1(mm)	b2(mm)	b3(mm)	d1(mm)	d2(mm)	d3(mm)	b prom.(mm)	d prom.(mm)
1	151.78	151.24	151.34	151.42	151.32	151.41	151.45	151.38
2	150.68	150.57	150.58	150.04	151.34	151.36	150.61	151.25
3	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
4	150.81	150.32	150.89	151.36	150.58	150.57	150.67	150.84
5	151.16	151.05	151.47	151.73	150.84	151.25	151.23	151.27

Tabla 4.23: Longitudes promedio en los especímenes de CCF.

Viga	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Longitud promedio(mm)
1	602	600	600	600.67
2	598	599	600	599.00
3	595	595	595	595.00
4	598	596	598	597.33
5	602	602	603	602.33

Realizadas las pruebas de flexión correspondientes a los especímenes de concreto con caucho fino, se lleva a cabo el reporte según la norma C293, la información se encuentra contenida en la tabla 4.24.

Tabla 4.24: Reporte de prueba a flexión para las vigas de CCF, conforme a la norma C293 [6].

Concreto modificado con caucho fino.					
Número de identificación.	1	2	3	4	5
Ancho promedio (mm).	151.45	150.61	150	150.67	151.23
Peralte promedio (mm).	151.38	151.25	150	150.84	151.27
Distancia entre apoyos (mm).	550	550	550	550	550
Carga máxima. (kN)	13287	12158	12233	12535	13476
Modulo de ruptura (Mpa)	3.16	2.91	2.99	3.02	3.21
Registro de la condición de curado y humedad aparente de la muestra al momento de la prueba.	Curado de 28 días, al momento de la prueba se encontraba superficialmente seca.				
Muestras tapadas.	NO				
Uso de cuñas de cuero.	NO				
Defectos de la muestra.	Desgaste en las esquinas y caucho expuesto.	Desgaste en las esquinas.	Sección transversal mayor al molde	Desgaste en las esquinas y caucho expuesto.	Desgaste en las esquinas.
Edad del espécimen	28 Días.				

A continuación se muestran los especímenes de concreto con caucho fino después de la prueba de flexión. Ver figura 4.12.



Figura 4.12: Fracturas en vigas de CCF.

4.2.3. Concreto con caucho grueso.

Como ocurre con los especímenes necesarios para las pruebas anteriores, son necesarias 5 vigas de concreto con caucho grueso; es indispensable la toma de las medidas de peraltes, anchos y longitudes promedio, las cuales se muestran en las tablas 4.25 y 4.26.

Tabla 4.25: Anchos y peraltes promedio en los especímenes de CCG.

Viga	b1(mm)	b2(mm)	b3(mm)	d1(mm)	d2(mm)	d3(mm)	b prom.(mm)	d prom.(mm)
1	151.41	151.07	151.38	151.21	150.97	151.37	151.29	151.18
2	150.81	150.43	150.23	151.21	150.81	150.83	150.49	150.95
3	150.66	150.66	151.45	151.50	150.95	151.42	150.92	151.29
4	151.38	151.13	151.23	150.73	150.70	150.59	151.25	150.67
5	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00

Tabla 4.26: Longitudes promedio en los especímenes de CCG.

Viga	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Longitud promedio(mm)
1	600	598	600	599.33
2	601	601	601	601.00
3	600	600	600	600.00
4	598	598	599	598.33
5	598	598	598	598.00

Realizadas las pruebas de flexión correspondientes a los especímenes de concreto con caucho grueso, se lleva a cabo el reporte según la norma C293, la información se encuentra contenida en la tabla 4.27.

Tabla 4.27: Reporte de prueba a flexión para las vigas de CCG, conforme a la norma C293 [7].

Concreto modificado con caucho grueso.					
Número de identificación.	1	2	3	4	5
Ancho promedio (mm).	151.29	150.49	150.92	151.25	150
Peralte promedio (mm).	151.18	150.95	151.29	150.67	150
Distancia entre apoyos (mm).	550	550	550	550	550
Carga máxima. (kN)	8733	9109	8921	9787	10351
Modulo de ruptura(MPa)	2.08	2.19	2.13	2.35	2.53
Registro de la condición de curado y humedad aparente de la muestra al momento de la prueba.	Curado de 28 días, al momento de la prueba se encontraba superficialmente seca.				
Muestras tapadas.	NO				
Uso de cuñas de cuero.	NO				
Defectos de la muestra.	Desgaste en los bordes y esquinas.	Caucho expuesto en la superficie.	Desgaste en las esquinas y caucho expuesto.	Desgaste en las esquinas y caucho expuesto.	Sección transversal mayor al molde.
Edad del espécimen	29 Días.				

A continuación, en la figura 4.13, se muestran los especímenes de concreto con caucho grueso después de la prueba de flexión.



Figura 4.13: Fracturas en vigas de CCG.

4.3. Resistencia a la tensión.

El ensayo de la prueba brasileña o de tensión se realiza con base en la norma C496/496M Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens [11], la cual cubre la determinación de la tensión en probetas de concreto cilíndricos como son cilindros moldeados y núcleos perforados, el método de ensayo consiste en aplicar una fuerza de compresión a lo largo de la longitud de una muestra de concreto cilíndrico a una velocidad que está dentro de un intervalo prescrito hasta que se produzca la falla.

Esta carga induce tensiones en el plano que contiene la carga aplicada y relativamente altas tensiones de compresión en la zona que está inmediatamente alrededor de la carga aplicada, la falla por tensión se produce en el lugar de falla en la compresión debido a que las áreas de aplicación de la carga están en un estado de compresión triaxial, lo que permite soportar tensiones de compresión mucho más altas de lo que sería indicado por un resultado de la prueba resistencia a la compresión uniaxial [11].

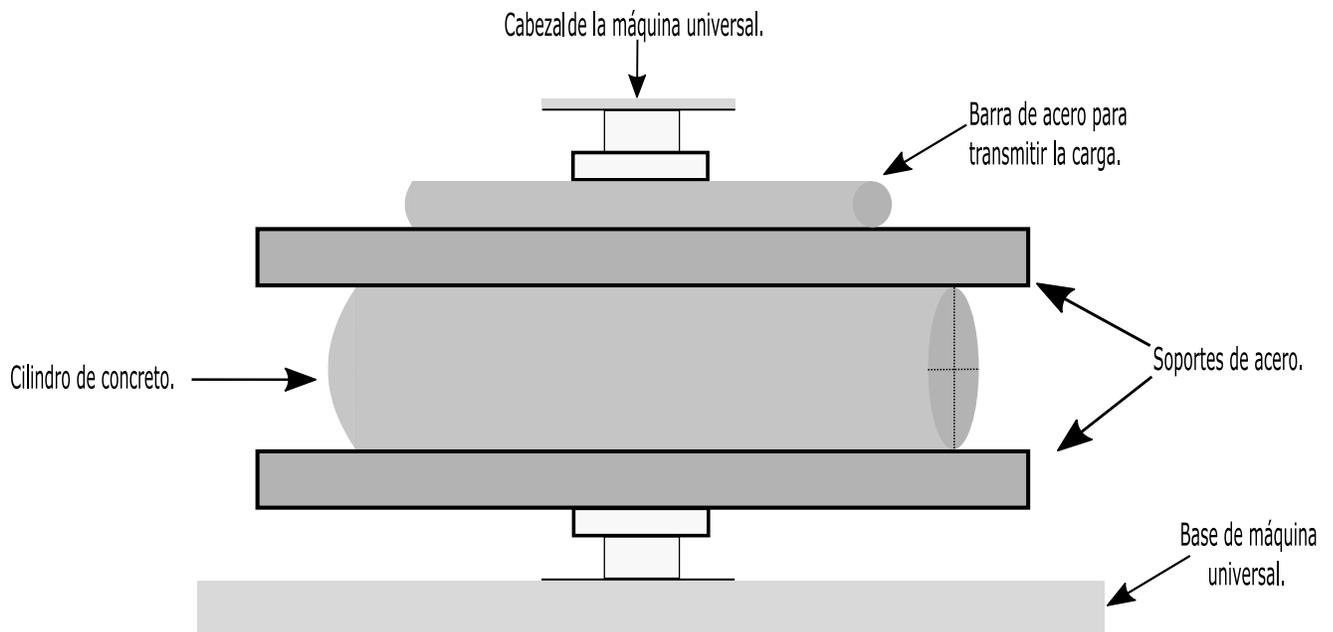


Figura 4.14: Esquema de la prueba de tensión o brasileña en cilindros de concreto.

En el caso mostrado (figura 4.14), se debe aclarar que la probeta no estuvo sometida a un estado triaxial, puesto que la carga fue aplicada únicamente en la longitud del espécimen ya que no se encontraba totalmente confinada, la norma permite el ensaye de las probetas sin el aditamento especial para que esté sometida al estado triaxial.

Para esta prueba se requieren 5 cilindros de dimensiones de 0.15x0.30m, tanto en la prueba de concreto simple, como en las pruebas de concreto con caucho fino y concreto con caucho grueso, elaborados conforme a la norma C192M-15 [6].

Para obtener las dimensiones de cada cilindro de concreto conforme a la norma antes citada, se tomaron tres diámetros a lo largo de cada cilindro y dos longitudes para así obtener los promedios de acuerdo a las figuras 4.15 y 4.16.

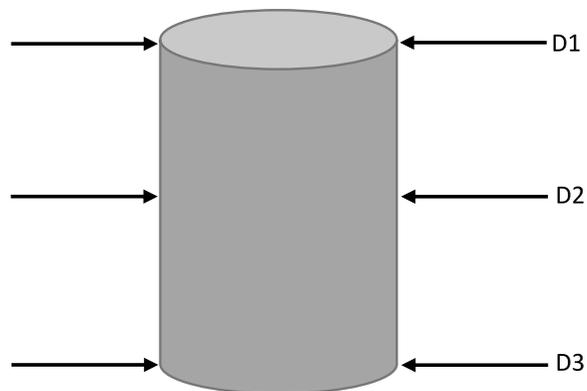


Figura 4.15: Medición de diámetros.

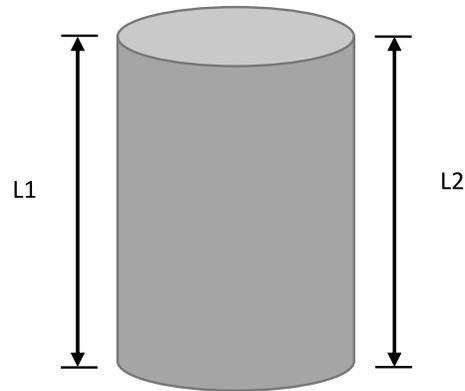


Figura 4.16: Medición de longitudes.

Para determinar el la resistencia a la tensión del concreto es necesaria la siguiente formula, donde se divide la carga máxima alcanzada durante la prueba por el área de sección transversal de la probeta. La expresión es la siguiente (Ecuación 4.3):

$$T = \frac{2P}{\pi \cdot Lp \cdot Dp} \quad (4.3)$$

donde:

P = Carga máxima,

Lp = longitud promedio,

Dp = diámetro promedio.

4.3.1. Concreto simple.

La prueba se realiza conforme a la Norma ASTM C496/C496M-11 [11], para la prueba son necesarias 5 probetas de concreto simple cilíndricas, previo a la prueba de tensión se ingresaron en la máquina universal los datos geométricos de los cilindros a fallar. Se obtuvo un promedio de los diámetros de cada uno de los cilindros para poder trabajar los cálculos correspondientes, de forma paralela se obtuvo una longitud promedio de los cilindros. Dichas mediciones se encuentra a continuación en las tablas 4.28 y 4.29.

Tabla 4.28: Diámetros promedio de los especímenes de CS.

Concreto simple				
Cilindro.	D1 (mm).	D2 (mm).	D3 (mm).	Diámetro promedio (mm).
1	150.78	150.84	152.17	151.26
2	150.23	150.36	151.45	150.68
3	149.58	150.41	151.23	150.41
4	150.96	152.47	153.11	152.18
5	150.65	150.50	151.86	151.00

Tabla 4.29: Longitudes promedio de los especímenes de CS.

Concreto simple			
Cilindro.	L1 (mm).	L2 (mm).	Longitud promedio (mm).
1	298	298	298.00
2	302	301	301.50
3	298	301	299.50
4	198	299	298.50
5	300	300	300.00

Contando los datos geométricos de los especímenes de concreto simple, se procede a realizar las pruebas de tensión en la máquina universal. El gradiente de velocidad ocupado en las pruebas de tensión fue de 0.250 MPa/s dando una carga inicial de 0.500 kN. Los resultados obtenidos se muestran contenidos en la tabla 4.30.

Tabla 4.30: Carga máxima registrada por espécimen de CS.

Cilindro :	Carga máxima (kN).
1	138.25
2	155.95
3	166.24
4	169.59
5	178.46

Realizadas las pruebas de tensión en los especímenes de concreto simple, se lleva a cabo el llenado del reporte, cual se muestra en la tabla 4.31.

Tabla 4.31: Reporte de resistencia a la tensión para los especímenes de CS, conforme a la norma C496 [11].

Tipo de concreto	Concreto simple				
Cilindro	1	2	3	4	5
Diámetro promedio (mm)	151.26	150.28	150.41	152.18	151
Longitud promedio (mm)	298.00	301.50	299.50	298.50	300.00
Carga máxima (N)	138256	155958	166243	169598	178469
Resistencia a la tracción (MPa)	1.9527	2.1855	2.3494	2.3926	2.5082
Proporción estimada de agregado grueso fracturado	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Edad del espécimen	34 Días.				
Historial de curado	Fecha de colado: 10/10/2019 Curado: 28 Días.				
Defectos de la muestra	Superficie Superior Irregular.				
Tipo de fractura	Frágil.	Frágil.	Frágil.	Frágil.	Frágil.
Tipo de muestra	Cilíndrica.	Cilíndrica.	Cilíndrica.	Cilíndrica.	Cilíndrica.

A continuación se muestran los especímenes de concreto simple después de la prueba de resistencia a la tensión (ver figura 4.17).

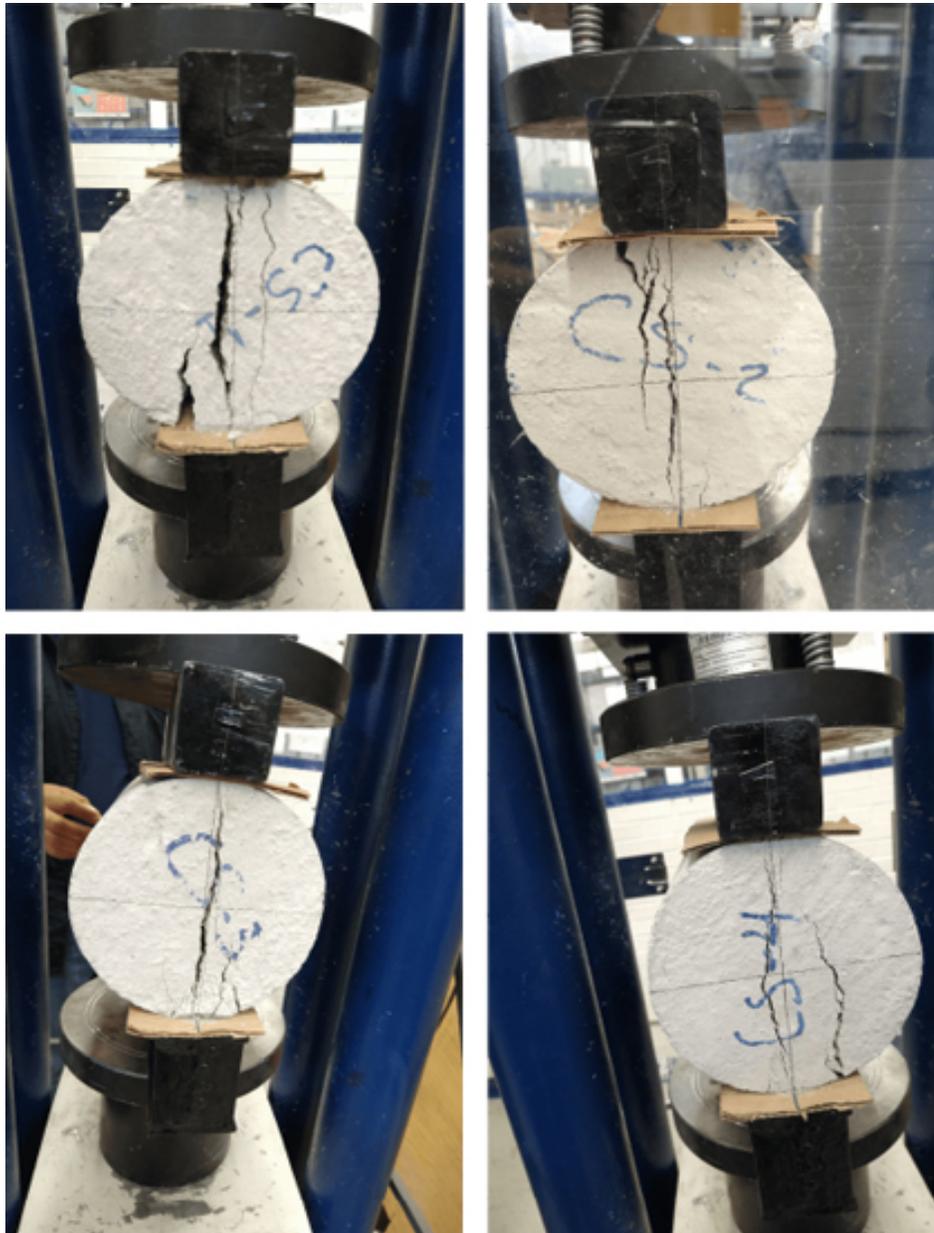


Figura 4.17: Fracturas visibles después de la prueba de resistencia a la tensión en los especímenes de CS.

4.3.2. Concreto con caucho fino.

Para este tipo de concreto modificado, de igual forma que el concreto simple, se requieren de 5 probetas de concreto con caucho fino, así como también es necesaria la toma de las dimensiones de los cilindros, las cuales se obtienen como se muestra en las figuras 4.15 y 4.16 y se muestran en las tablas 4.32 y 4.33.

Tabla 4.32: Diámetros promedio de los especímenes de CCF.

Concreto modificado con caucho fino.				
Cilindro.	D1 (mm).	D2 (mm).	D3 (mm).	Diámetro promedio (mm).
1	150.30	149.04	151.54	150.29
4	150.99	150.86	148.61	150.15
8	149.95	150.06	150.67	150.23
9	149.75	147.86	150.13	149.25
10	149.04	150.20	150.76	150.00
11	149.15	151.94	150.70	150.60

Tabla 4.33: Longitudes promedio de los especímenes de CCF.

Concreto modificado con caucho fino.			
Cilindro.	L1 (mm).	L2 (mm).	Longitud promedio (mm).
1	294	301	297.50
4	300	296	298.00
8	299	298	298.50
9	300	297	298.50
10	301	299	300.00
11	297	301	299.00

Contando con los datos geométricos de los especímenes de concreto con caucho fino, se procede a realizar las pruebas de tensión en la máquina universal. El gradiente de velocidad ocupado en las pruebas de tracción fue de 0.250 MPa/s dando una carga inicial de 0.500 kN. Los resultados obtenidos se muestran contenidos en la tabla 4.34.

Tabla 4.34: Carga máxima registrada por espécimen de CCF.

Cilindro	Carga máxima (kN).
1	121.39
4	123.35
8	131.89
9	127.75
10	125.23
11	122.07

Realizadas las pruebas de tensión en los especímenes de concreto con caucho fino, se lleva a cabo el llenado del reporte, el cual se muestra en la tabla 4.35.

Tabla 4.35: Reporte de resistencia a la tensión para los especímenes de CCF, conforme a la norma C496 [11].

Tipo de concreto	Concreto modificado con caucho fino					
Cilindro	1	4	8	9	10	11
Diámetro promedio (mm)	150.29	150.15	150.23	149.58	150	150.6
Longitud promedio (mm)	297.5	298	298.5	298.5	299	299
Carga máxima (N)	121393	131895	131895	127754	125232	122070
Resistencia a la tracción (MPa)	1.7285	2.3158	2.8158	1.8216	1.7776	1.7259
Proporción estimada de agregado grueso fracturado	20 %	20 %	25 %	20 %	30 %	25 %
Edad del espécimen	32 días					
Historial de curado	Fecha de colado: 21/10/2019 Curado: 28 Días.					
Defectos de la muestra	Superficie superior irregular.	20/10/2019				
Tipo de fractura	Frágil, en una cara del cilindro, a contra cara fractura casi imperceptible.	Frágil, en una cara del cilindro, a contra cara fractura casi imperceptible.	Frágil, en una cara del cilindro, a contra cara fractura casi imperceptible.	Frágil, en una cara del cilindro, a contra cara fractura casi imperceptible.	Frágil, en una cara del cilindro, a contra cara fractura casi imperceptible.	Frágil, en una cara del cilindro, a contra cara fractura casi imperceptible.
Tipo de muestra	Cilíndrica.	Cilíndrica.	Cilíndrica.	Cilíndrica.	Cilíndrica.	Cilíndrica.

A continuación se muestran los especímenes de concreto con caucho fino después de la prueba de resistencia a la tensión (ver figura 4.18).

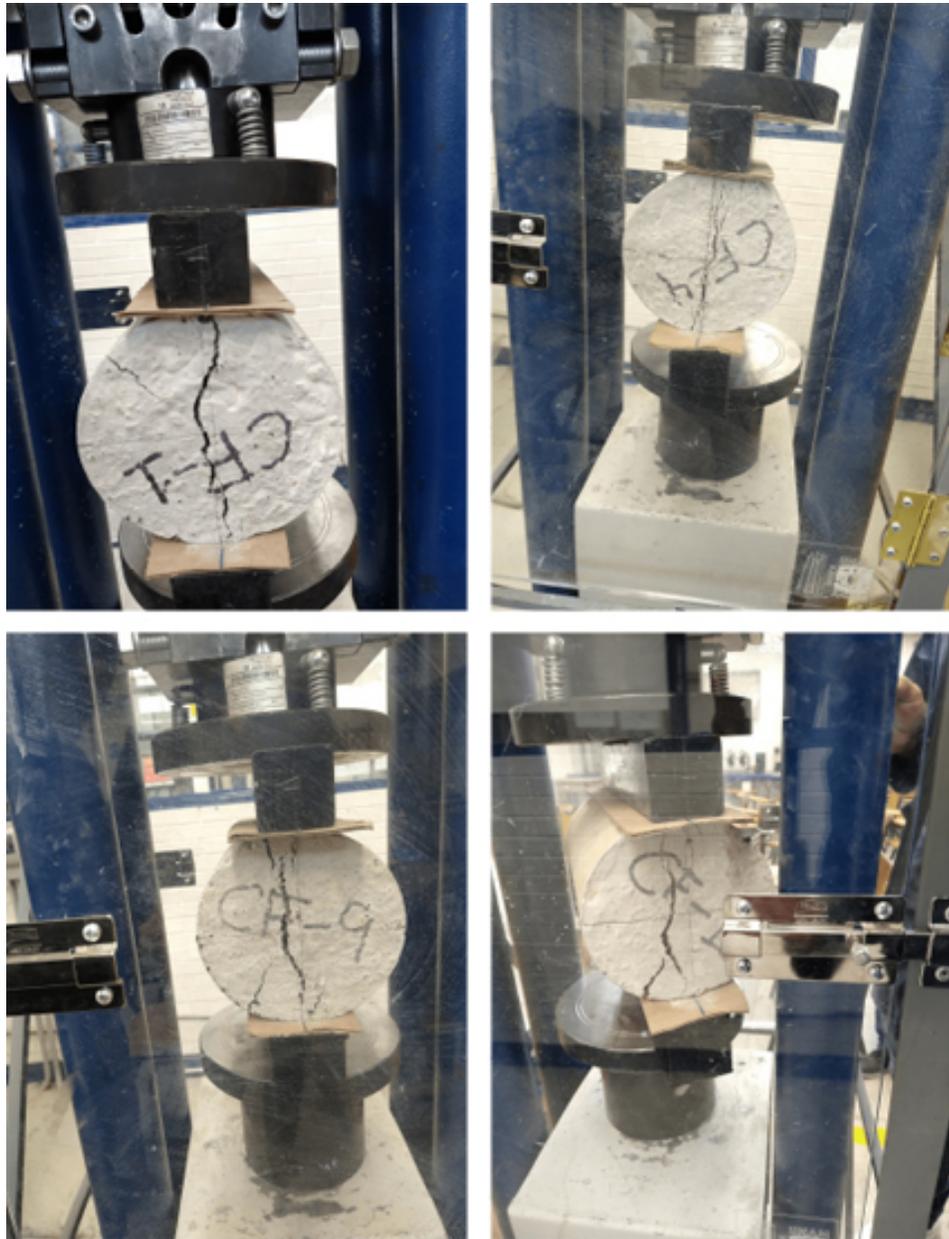


Figura 4.18: Fracturas visibles después de la prueba de resistencia a la tensión en los especímenes de CCF.

4.3.3. Concreto con caucho grueso.

Para este tipo de concreto modificado, de igual forma que el concreto simple y el concreto con caucho fino, se requieren de 5 probetas de concreto con caucho grueso, así como la toma de los diámetros y longitudes de los cilindros, los cuales se obtienen como se muestra en las figuras 4.15 y 4.16 y se muestran en las tablas 4.36 y 4.37.

Tabla 4.36: Diámetros promedio de los especímenes de CCG.

Concreto modificado con caucho grueso.				
Cilindro.	D1 (mm).	D2 (mm).	D3 (mm).	Diámetro promedio (mm).
1	147.04	149.93	149.20	148.72
2	148.60	149.36	150.12	149.36
4	150.61	147.93	148.81	149.12
9	149.94	148.57	152.06	150.19
10	151.61	148.84	151.44	150.63
12	147.08	148.06	151.12	148.75

Tabla 4.37: Longitudes promedio de los especímenes de CCG.

Concreto modificado con caucho grueso			
Cilindro.	L1 (mm).	L2 (mm).	Longitud promedio (mm).
1	300	297	298.50
2	300	298	299.00
4	297	300	298.50
9	296	298	297.00
10	298	296	297.00
12	298	301	299.50

Contando con los datos geométricos de los especímenes de concreto con caucho grueso, se procede a realizar las pruebas de tensión en la máquina universal. El gradiente de velocidad ocupado en las pruebas de tensión fue de 0.250 MPa/s dando una carga inicial de 0.500 kN. Los resultados obtenidos se muestran contenidos en la tabla 4.38.

Tabla 4.38: Carga máxima registrada por espécimen de CCG.

Cilindro	Carga máxima (kN).
1	114.42
2	134.71
4	120.18
9	122.44
10	104.56
12	119.13

Realizadas las pruebas de tensión en los especímenes de concreto con caucho grueso, se lleva a cabo el llenado del reporte, el cual se muestra en la tabla 4.39.

Tabla 4.39: Reporte de resistencia a la tensión para los especímenes de CCG, conforme a la norma C496 [11].

Tipo de concreto	Concreto con caucho grueso					
Cilindro	1	2	4	9	10	12
Diámetro promedio (mm)	148.72	149.36	149.12	150.19	150.63	148.75
Longitud promedio (mm)	298.5	299	298.5	297	297	299.5
Carga máxima (N)	114429	134718	120188	122447	104567	119134
Resistencia a la tracción (MPa)	1.641	1.9205	1.719	1.7476	1.488	1.7024
Proporción estimada de agregado grueso fracturado	30 %	20 %	20 %	25 %	15 %	35 %
Edad del espécimen	33 días					
Historial de curado	Fecha de colado: 20/10/2019 Curado: 28 Días.					
Defectos de la muestra	Superficie superior irregular.	20/10/2019				
Tipo de fractura	Frágil, en una cara del cilindro, a contra cara fractura casi imperceptible.	Frágil, en una cara del cilindro, a contra cara fractura casi imperceptible.	Frágil, en una cara del cilindro, a contra cara fractura casi imperceptible.	Frágil, en una cara del cilindro, a contra cara fractura casi imperceptible.	Frágil, en una cara del cilindro, a contra cara fractura casi imperceptible.	Frágil, en una cara del cilindro, a contra cara fractura casi imperceptible.
Tipo de muestra	Cilíndrica.	Cilíndrica.	Cilíndrica.	Cilíndrica.	Cilíndrica.	Cilíndrica.

A continuación se muestran los especímenes de concreto con caucho grueso después de la prueba de resistencia a la tensión (ver figura 4.19).



Figura 4.19: Fracturas visibles después de la prueba de resistencia a la tensión en los especímenes de CCG.

4.4. Comparación de resultados.

Con los datos recabados en las pruebas de laboratorio y su debida interpretación se hace una comparativa de las mezclas de concreto simple con respecto a las mezclas modificadas con caucho fino y grueso.

4.4.1. Compresión.

La comparación de los parámetros en los especímenes se realizó con base en la media del esfuerzo y densidad de cada espécimen, los resultados arrojados por la prueba de compresión muestran una diferencia significativa en la resistencia a la compresión para las mezclas de concreto las cuales se muestran a detalle en la tabla 4.40. Para entender estas diferencias entre cada mezcla en la prueba de compresión la obtención de la desviación estándar y un coeficiente de variación por cada mezcla y con ello obtener un porcentaje de reducción.

Para el cálculo de la desviación estándar, y porcentaje de reducción se utilizaron las ecuaciones 4.4 y 4.5.

$$D.E = \sqrt{\frac{\sum|x - \mu|^2}{N - 1}} \quad (4.4)$$

donde:

$D.E$ = Desviación estándar,

μ = media,

N = número de datos.

$$C.V = \frac{\sigma}{\mu} \cdot 100 \% \quad (4.5)$$

donde:

$C.V$ = Coeficiente de variación,

σ = desviación estándar,

μ = media.

Con respecto al porcentaje de reducción se utilizo la ecuación 4.6.

$$\% \text{ Reducción} = \frac{f_{CS} - f_{CX}}{f_{CS}} \cdot 100 \quad (4.6)$$

donde:

f_{CS} = Media del esfuerzo concreto simple,
 f_{CX} = media del esfuerzo del concreto con caucho.

De acuerdo a la tabla 4.40 se deduce que la resistencia a la compresión fue mayor en los especímenes de concreto simple con una resistencia media de 19.12 MPa, para los especímenes de concreto con caucho fino se tiene una reducción en la resistencia a la compresión de un 24.37% con una resistencia media de 14.45 MPa, para al caso del concreto con caucho grueso se tiene una reducción del 41% en la resistencia a la compresión con una media de 11.27 MPa.

Tabla 4.40: Comparación de pruebas a compresión.

Concreto simple			Concreto con caucho fino			Concreto con caucho grueso		
Espécimen	Esfuerzo (MPa)	Densidad (kg/cm ³)	Espécimen	Esfuerzo (MPa)	Densidad (kg/cm ³)	Espécimen	Esfuerzo (MPa)	Densidad (kg/cm ³)
1	18.95	2234.73	2	14.45	2189.17	3	11.13	2178.87
2	18.15	2244.31	3	14.05	2206.93	5	10.87	2140.57
3	19.13	2269.81	5	14.42	2193.30	7	10.98	2172.54
4	19.49	2256.50	6	14.78	2192.03	8	12.91	2164.77
5	19.89	2261.62	7	14.55	2186.40	11	10.48	2152.39
Media	19.12	2253.39	Media	14.45	2193.56	Media	11.27	2161.83
D.E	0.65	13.94	D.E	0.26	7.93	D.E	0.95	15.45
C.V (%)	3.41	0.62	C.V (%)	1.82	0.36	C.V (%)	8.39	0.71
			% Reducción a compresión	24.37	2.67	% Reducción a compresión	41	4.06

En la figura 4.20 se aprecia a detalle el comportamiento de los especímenes de concreto al momento de la falla.

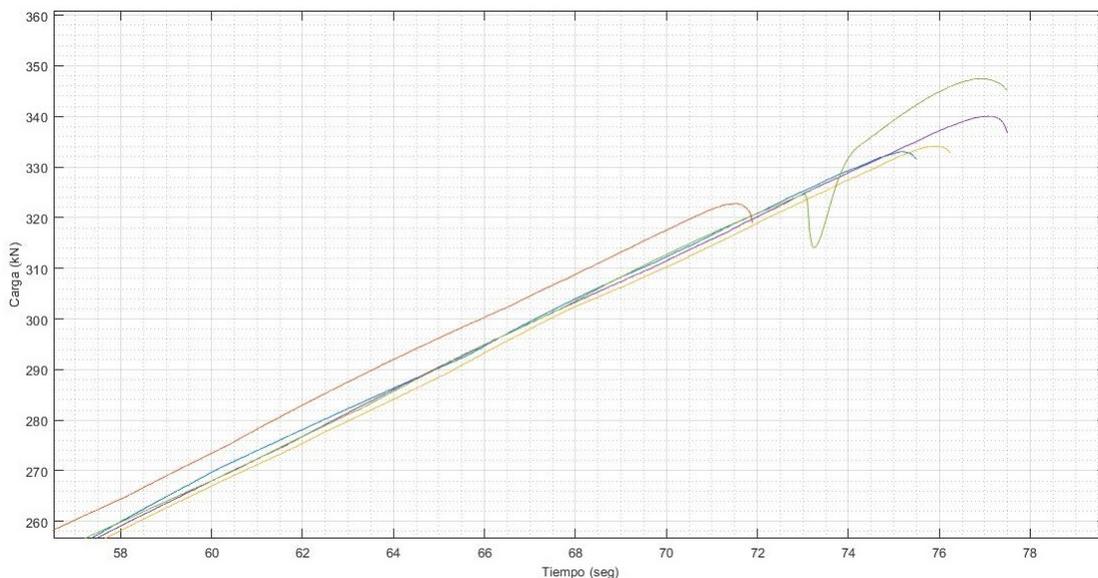


Figura 4.20: Historia de carga para los especímenes de CS.

Las figuras 4.21 y 4.22 son el resultado de un acercamiento a las gráficas originales mostradas anteriormente, esto se realiza con el fin resaltar el comportamiento que presenta

la mezcla de concreto modificada con caucho, en dichos gráficos se aprecia la perdida de carga por unos momentos, posteriormente el espécimen vuelve a retomar carga, este comportamiento lo vuelve a mostrar nuevamente durante la prueba.

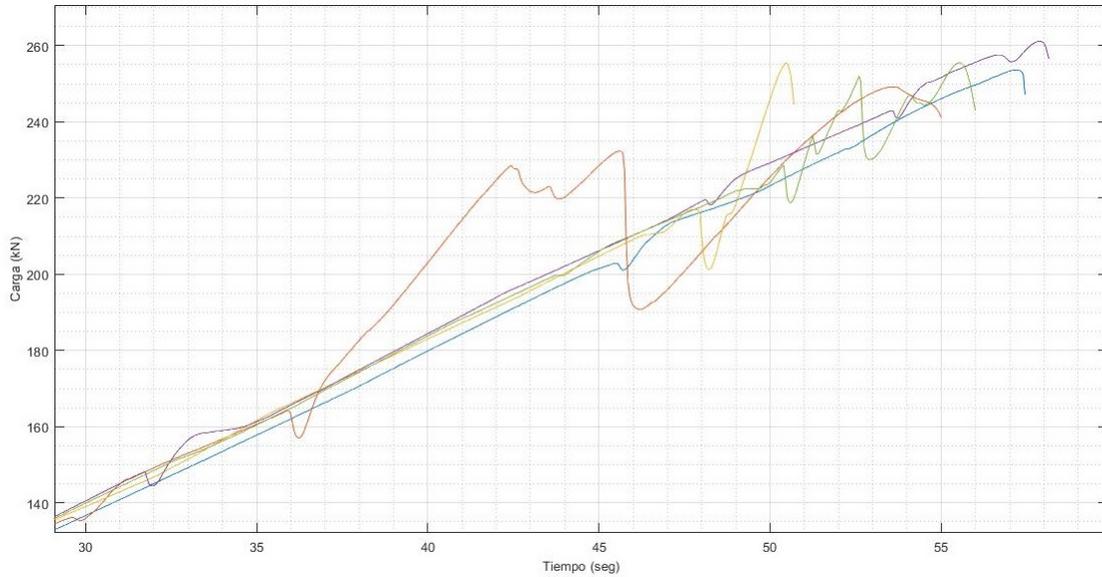


Figura 4.21: Historia de carga para los especímenes de CCF.

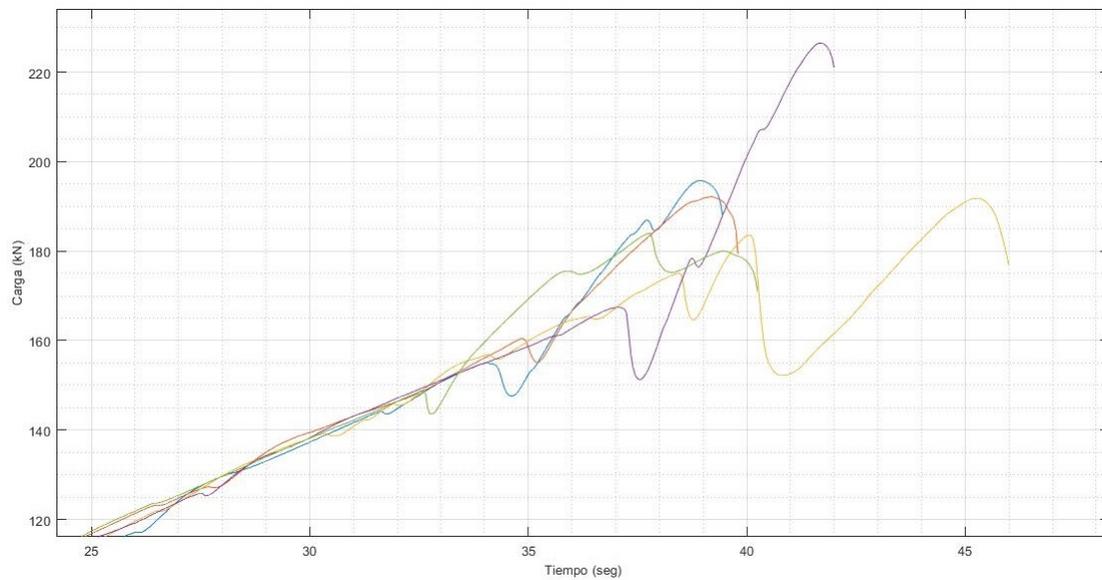


Figura 4.22: Historia de carga para los especímenes de CCG.

El comportamiento de los especímenes al finalizar la prueba resultó ser similar en ambas mezclas modificadas, la diferencia se aprecia en la capacidad de carga en donde el concreto con caucho fino mostró mejores resultados a compresión que el concreto con caucho grueso,

destacando que el espécimen al retomar la carga no supera o regresa a la carga máxima registrada. Esto significa que el concreto modificado a pesar de llegar a una carga máxima puede retomar cierta capacidad de carga, a comparación del comportamiento observado en la mezcla de concreto convencional. Cabe destacar el comportamiento del caucho, puesto que a pesar de su forma redondeada e irregular actuó en conjunto de tal manera que se tratara fibras.

Con respecto a la comparativa de densidades 4.23, la densidad de los concretos modificados se vio reducida a comparación del concreto simple esto debido a la sustitución de agregado con caucho fino y grueso respectivamente. Teniendo para concreto simple una densidad promedio de $2,253.39 \text{ kg/m}^3$ la cual es mayor a la mezcla de concreto con caucho fino siendo de $2,193.56 \text{ kg/m}^3$ y de concreto con caucho grueso de $2,161.83 \text{ kg/m}^3$, estos resultados se debieron a que el tamaño del agregado en caucho ocupa más espacio en la mezcla de concreto y conjunto a ello el peso específico que el caucho presenta, reduciendo así su densidad.

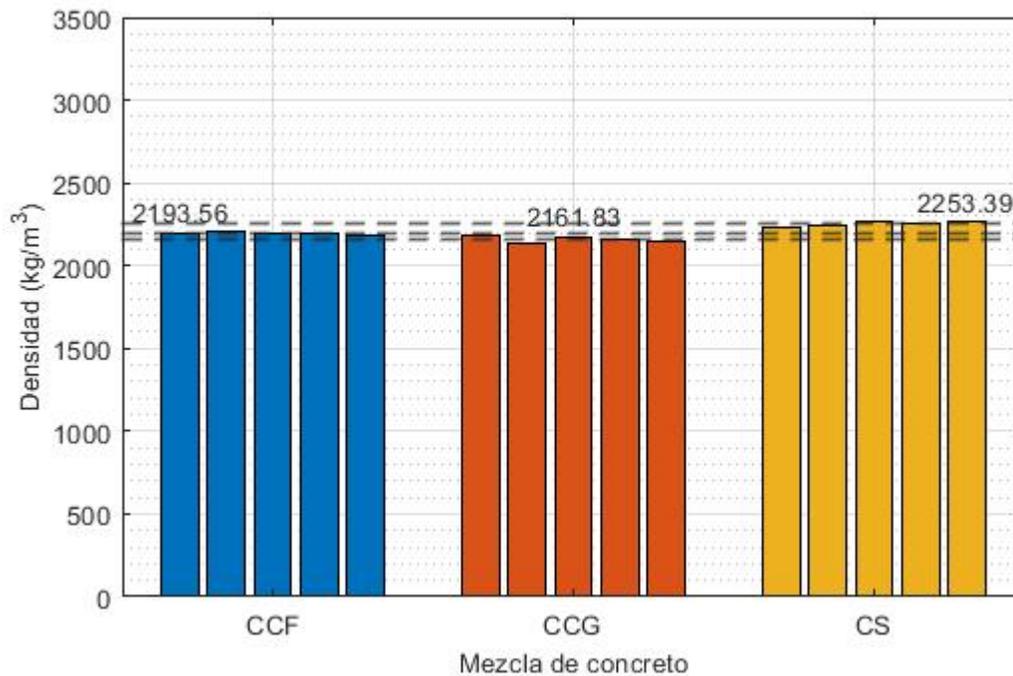


Figura 4.23: Densidad para cada mezcla de concreto.

El comportamiento de las mezclas de concreto en comparación del concreto simple como se muestra en la figura 4.24 es simple, presenta menor resistencia al esfuerzo de compresión destacando que entre las dos mezclas modificadas la de concreto con caucho fino tiene mejor resistencia que la de concreto con caucho grueso, esto evaluando un promedio de las resistencias de cada uno de los especímenes que se sometieron a las pruebas de laboratorio de cada muestra, siendo de 14.45 MPa y 11.27 MPa respectivamente. Pero perdiendo significativamente la resistencia contra el concreto simple siendo este de 19.12 MPa.

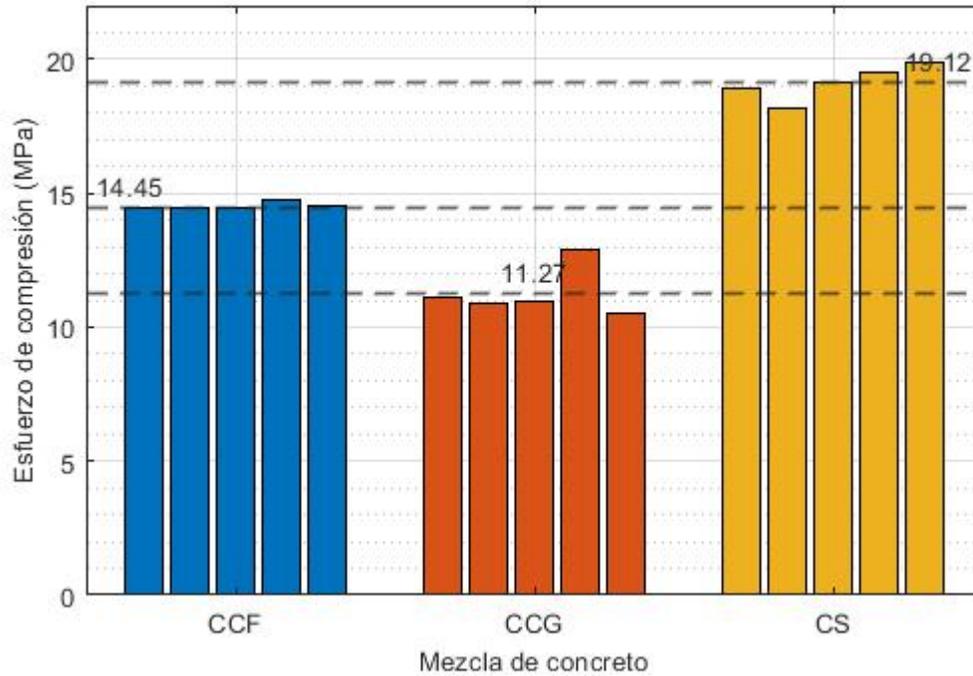


Figura 4.24: Esfuerzo de compresión para cada mezcla de concreto.

4.4.2. Flexión.

Los resultados arrojados en la prueba de flexión muestran una diferencia significativa en el módulo de ruptura y en la carga máxima para las mezclas de concreto las cuales se muestran a detalle en la tabla 4.41. De acuerdo a la tabla antes mencionada, se deduce que la resistencia a la flexión con respecto a su módulo de ruptura, nuevamente fue mayor en los especímenes de concreto simple con una resistencia media de 3.11 MPa, para los especímenes de concreto con caucho fino se tiene una reducción en la resistencia a la flexión de un 1.61 % con una resistencia media de 3.06 MPa, para al caso del concreto con caucho grueso se tiene una reducción del 27.33 % en la resistencia a la flexión con una media de 2.26 MPa.

Para realizar las comparativas en los resultados de la prueba de compresión se requiere las formulas 4.4, 4.5 y 4.6 para la evaluación y comparativa correspondiente de los especímenes de concreto sometidos a flexión con respecto a la desviación estándar, coeficiente de variación y el porcentaje de reducción.

Tabla 4.41: Comparación de pruebas a flexión.

Concreto simple			Concreto con caucho fino			Concreto con caucho grueso		
Espécimen	Carga máxima (kN)	MR (MPa)	Espécimen	Carga máxima (kN)	MR (MPa)	Espécimen	Carga máxima (kN)	MR (MPa)
1	11706	2.84	1	13287	3.16	1	8733	2.08
2	12647	3.06	2	12158	2.91	2	9109	2.19
3	13438	3.22	3	12233	2.99	3	8921	2.13
4	12271	2.95	4	12535	3.02	4	9787	2.35
5	14228	3.48	5	13476	3.21	5	10351	2.53
Media	12858	3.11	Media	12737.80	3.06	Media	9380.20	2.26
D.E	991.15	0.25	D.E	608	0.12	D.E	672.91	0.18
C.V (%)	7.71	0.08	C.V (%)	4.77	0.04	C.V (%)	7.17	8.15
			% Reducción a flexión	0.93	1.61	% Reducción a flexión	27.05	27.33

Los resultados de la prueba de flexión resultaron ser desfavorables para la mezcla de concreto con caucho fino en comparativa con la mezcla de concreto simple, presentando una pequeña reducción en cuanto al porcentaje de carga y módulo de ruptura; por otro lado el comportamiento de los especímenes de concreto con caucho grueso resultaron muy afectados por la composición de la mezcla con el caucho grueso. De acuerdo a lo anterior se deja en claro que la mezcla de concreto con caucho fino sería óptima para poder trabajar con ella como se muestra en las figuras 4.25 y 4.26 donde se puede apreciar la comparativa.

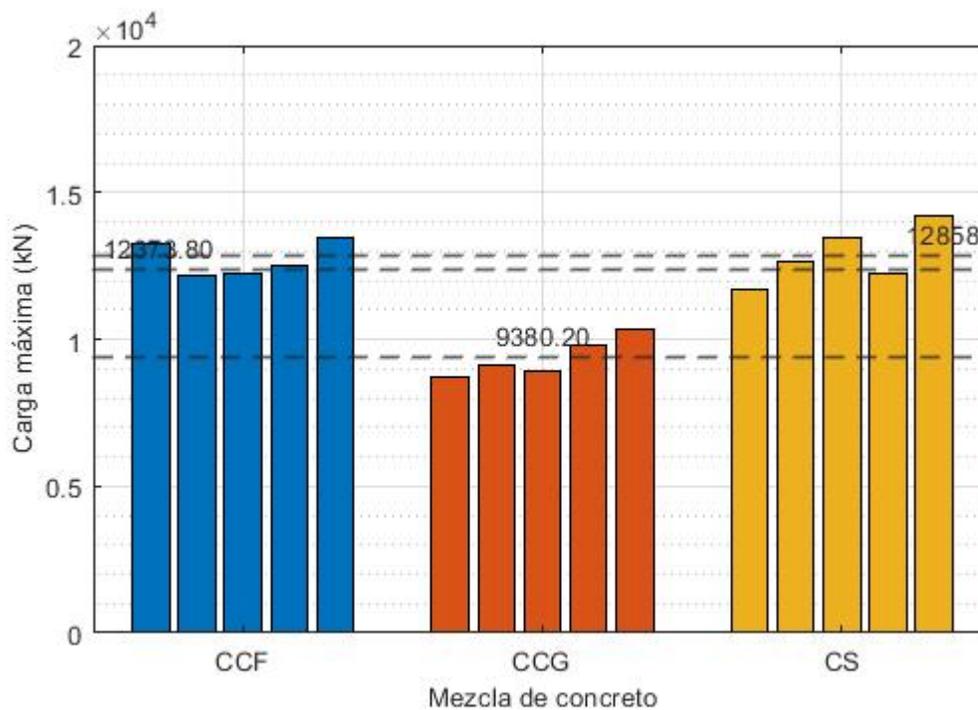


Figura 4.25: Carga máxima para cada mezcla de concreto.

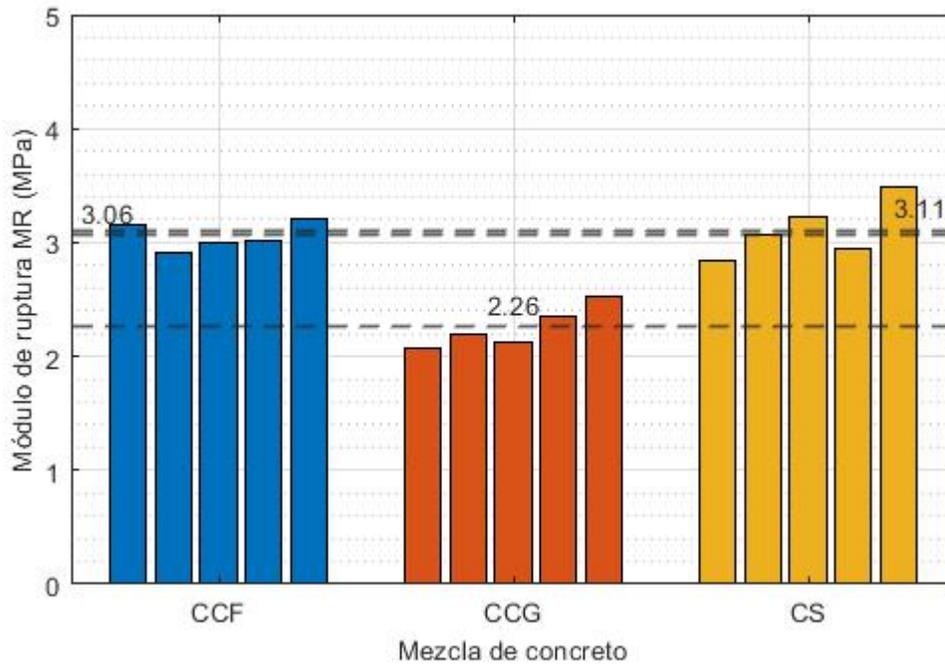


Figura 4.26: Módulo de ruptura para cada mezcla de concreto.

Cabe destacar que en el momento de las pruebas las vigas sometidas tanto de concreto con caucho fino y concreto con caucho grueso al momento de la falla, esta se presento de forma irregular como si se tratara de la mezcla de concreto simple. En donde ninguna de las vigas se separo completamente en el punto donde se aplico la carga, el agregado de caucho dentro de la mezcla se encargo de mantener unidas ambas partes de la viga a pesar de que esta ya presentaba la falla.

4.4.3. Tensión.

Los resultados arrojados por la prueba de tensión se muestran a detalle en la tabla 4.42, en la que se muestra que la resistencia a la tensión, nuevamente fue mayor en los especímenes de concreto simple con una resistencia media de 2.28 MPa, para los especímenes de concreto con caucho fino se tiene una reducción en la resistencia a la tensión de un 10.96 % con una resistencia de media de 2.03 MPa, para al caso del concreto con caucho grueso se tiene una reducción del 25.44 % en la resistencia a la tensión con una media de 1.70 MPa.

De igual forma que los resultados en la prueba de compresión y flexión se utilizaron las formulas 4.4, 4.5 y 4.6 con respecto a la desviación estándar, coeficiente de variación y el porcentaje de reducción.

Tabla 4.42: Comparación de pruebas a tensión.

Concreto simple			Concreto con caucho fino			Concreto con caucho grueso		
Espécimen	Carga máxima (kN)	T (MPa)	Espécimen	Carga máxima (kN)	T (MPa)	Espécimen	Carga máxima (kN)	T (MPa)
1	138256	1.9527	1	121393	1.7285	1	114429	1.6410
2	155958	2.1855	4	131895	2.3158	2	134718	1.9205
3	166243	2.3494	8	131895	2.8158	4	120188	1.7190
4	169598	2.3926	9	127754	1.8216	9	122447	1.7476
5	178469	2.5082	10	125232	1.7776	10	104567	1.4880
			11	122070	1.7559	12	119134	1.7024
Media	161704.80	2.28	Media	126706.50	2.03	Media	119247.17	1.70
DE	15385.12	0.22	DE	5168	0.50	DE	11059	0.16
CV	9.51	0.09	CV	4.08	0.24	CV	9.27	9.27
			% Reducción a la tracción	21.64	10.96	% Reducción a la tracción	26.26	25.44

Las figuras 4.27 y 4.28 muestran en comparativa la carga máxima registrada y el esfuerzo a la tensión por espécimen para cada mezcla de concreto. Para el caso de la carga máxima registrada en las mezclas de concreto modificado resultaron muy similares en cuanto a resultados teniendo una media en el concreto con caucho fino de 125,282.33 kN y de 119,247.17 kN para el concreto con caucho grueso, que, en comparación con la mezcla de concreto simple se vio muy reducida la carga puesto que presento una media de 161,704.80 kN.

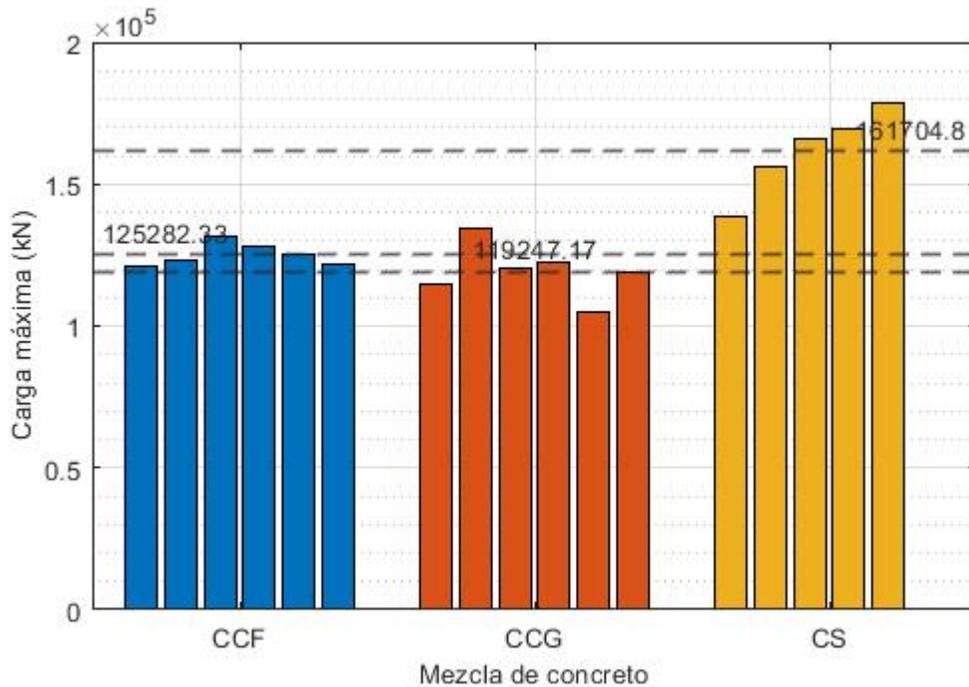


Figura 4.27: Carga máxima para cada mezcla de concreto.

Por otro lado el esfuerzo de tensión es muy similar entre las mezclas de concreto con caucho fino y concreto simple, teniendo una pequeña reducción en cuanto a esfuerzos, y de igual

forma que en las pruebas anteriores la mezcla de concreto con caucho grueso se vio muy reducida en cuanto al esfuerzo de tensión.

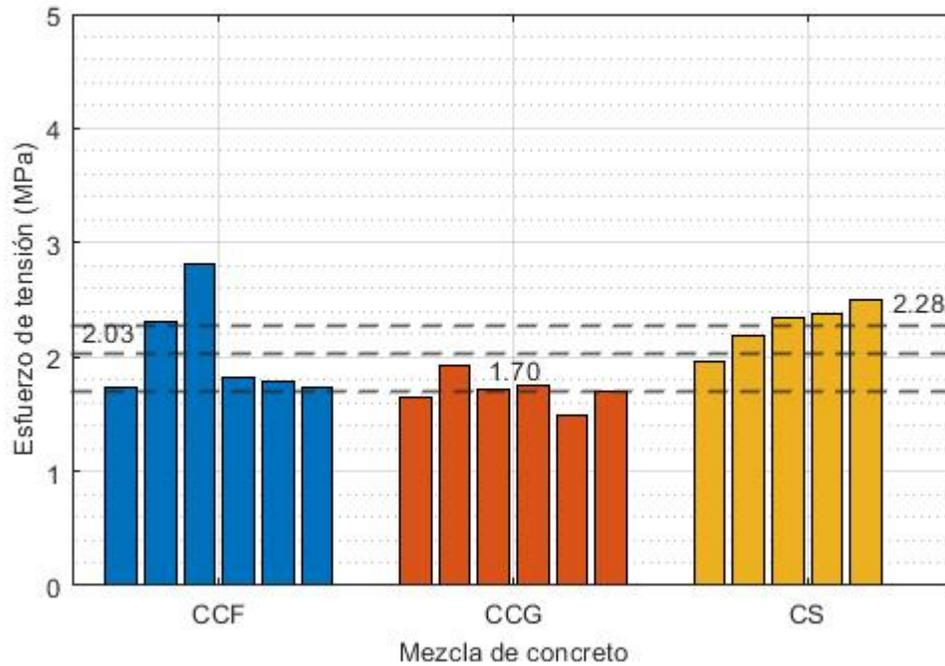


Figura 4.28: Esfuerzo de tensión para cada mezcla de concreto.

4.4.4. Relación esfuerzo compresión-tensión.

Para el cálculo de la relación se utilizó la formula 4.7.

$$f_c \cdot x = f_t \rightarrow x = \frac{f_t}{f_c} \cdot 100 \quad (4.7)$$

donde:

f_c = Esfuerzo de compresión,

f_t = esfuerzo de tensión,

x = relación del esfuerzo.

Teniendo los siguientes resultados en la relación con cada una de las mezclas de concreto.

Para concreto simple 4.8.

$$x = \frac{2,28}{19,12} \cdot 100x = 11,92\% \quad (4.8)$$

Para concreto modificado con caucho fino 4.9.

$$x = \frac{2,03}{14,45} \cdot 100x = 14,05 \% \quad (4.9)$$

Para concreto modificado con caucho grueso 4.10.

$$x = \frac{1,70}{11,27} \cdot 100x = 15,08 \% \quad (4.10)$$

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros.

Con el análisis de los resultados y tras realizar una comparativa con las tablas y gráficas del capítulo anterior, el caucho como material presente en mezclas de concreto no resulta ser benéfico con respecto a las propiedades que este presenta en una mezcla convencional, puesto que su resistencia se ve afectada.

Las pruebas demostraron que el uso de caucho en la mezcla de concreto dependiendo del tipo de agregado a sustituir, presentan deficiencias en las propiedades que un concreto simple tiene, a pesar de ello, la mezcla de concreto con caucho fino muestra ser la mezcla con menos pérdidas en cuanto a esfuerzos en comparación con la mezcla de concreto con caucho grueso, con la cual el concreto se vio completamente afectado, esto se produce debido al tamaño de su partícula la cual proporcionaba menos estabilidad a la mezcla de concreto.

Para el caso de las pruebas de flexión, el concreto modificado con caucho presentó mejores resultados en comparativa con las pruebas de compresión y tensión, esto debido al caucho, el cual se comportó como si se tratara de fibras dentro de la mezcla de concreto, evitando el desprendimiento de los fragmentos del espécimen.

Como resultado del estudio, la mezcla de concreto modificado con caucho, ya sea grueso o fino, presenta las características para poder ser implementado en pavimentos, el uso de caucho puede ser descartado en elementos estructurales debido a la reducción de las propiedades que presenta, siendo un riesgo para la seguridad de la edificación; Por otra parte, la partícula de caucho fino en la mezcla proporciona mejoras en las propiedades ya que su funcionamiento fue de fibras dentro de la mezcla.

5.1. Trabajos futuros.

El uso de caucho como agregado dentro de la mezcla de concreto tiene aún un amplio estudio, un trabajo futuro es la combinación de ambos tipos de caucho tanto fino y grueso en una sola mezcla de concreto, para así tener las propiedades que cada uno añade al concreto de forma individual.

Quedando un amplio campo de investigación para su desarrollo como material que pueda ser incluido en algún campo de la ingeniería como el uso de concreto modificado con caucho en el campo de las vías terrestres, siendo más específicos su uso en la construcción de pavimentos, un estudio del coste de la fabricación del concreto modificado para poder verificar que sea viable y poder ser utilizado en guarniciones o en algún otro proyecto de ingeniería, así como establecer normativas que incluyan su uso y una adecuada preparación de la mezcla.

Bibliografía

- [1] ACI 211.1-91. *Standar Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. American Concrete Institute, USA, 2009.
- [2] N. Degirmenci A. Yilmaz. Possibility of using waste tire rubber and fly ash with portlandcement as construction materials. *Waste Management*, 2009.
- [3] Auto Bild. ¿de dónde proviene el caucho? *Auto Bild*, 2010.
- [4] ASTM C127-15. *Standar Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. American Society for Testing and Materials, USA, 2015.
- [5] ASTM C136/C136M-14. *Standar Test Method for Sieve Analysis of Fine Coarse Aggregates*. American Society for Testing and Materials, USA, 2014.
- [6] ASTM C192/C192M-15. *Standar Test Method for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. American Society for Testing and Materials, USA, 2015.
- [7] ASTM C293/C293M-10. *Standar Test Method for Flexural Strenght of Concrete(Using Simple Beam Whit Center-Point Loading)*. American Society for Testing and Materials, USA, 2010.
- [8] ASTM C29/C29M-09. *Standar Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate*. American Society for Testing and Materials, USA, 2009.
- [9] ASTM C39/C39M-15a. *Standar Test Method for Compressive Strenght of Cylindrical Concrete Specimens*. American Society for Testing and Materials, USA, 2015.
- [10] ASTM C470/C470M-15. *Standar Test Method for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically*. American Society for Testing and Materials, USA, 2015.
- [11] ASTM C496/C496M-11. *Standar Test Method for Splitting Tensile Strenght of Cylindrical Concrete Specimens*. American Society for Testing and Materials, USA, 2011.
- [12] ASTM C566-13. *Standar Test Method for Total Evaporable Moisire Content of Aggregate by Drying*. American Society for Testing and Materials, USA, 2013.

- [13] A. Criollo. *Caacterización de caucho reciclado proveniente de scrap y de neumáticos fuera de uso para su potencial aplicación como materia prima*. PhD thesis, Cuenca, Ecuador, 2014.
- [14] Secretaría de Medio Ambiente. *Plan estatal de manejo y reciclaje -360- de llantas usadas en Coahuila*. Gobierno de Coahuila de Zaragoza, Coahuila, México, 2012.
- [15] Agència de Residuos de Catalunya. *Hacia una nueva rodadura*, 2010.
- [16] ASTM E11-15. *Standar Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves*. American Society for Testing and Materials, USA, 2015.
- [17] D. Giraldo G. Peláez, S. Velásquez. Aplicaciones de caucho reciclado: Una revisión de literatura. *Ciencia e ingeniería Neogranadina*, 27, 2017.
- [18] INEGI. *Vehículos de motor registrados en circulación*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Ciudad de México, México, 2020.
- [19] E. Márquez J. Chávez H. Delgado P. Gernica J. Murillón, M. Salazar. *Evaluación de mezclas asfálticas modificados con hule de neumático, meidante diseño volumetrico, TSR y deformación permanente*. Asosiación Mexicana del Asfalto A.C., 2013.
- [20] A.C. Manejo responsable de llantas usadas. *Plan de manejo de neumáticos usados de desecho*. Reciclallantas, A.C, Ciudad de México, México, 2015.
- [21] Sergio santiago Rodríguez. *Reutilización de Neumáticos Fuera De Uso*. Departamento de ingeniería química y tecnología farmacéutica, México, 2017.
- [22] SEMARNAT. *Criterios para clasificar a los residuos de manejer especial y determinar cuáles están sujetos a plan de manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ciudad de México, México, 2011.
- [23] M. Fasfán y E. Leonardo. Caucho reciclado en la resistencia a la compresión y flexión de concreto modificado con aditivo pastificante. *Ingeniería de Construcción RIC*, 2018.

Agradecimientos.

A la *Dirección General de Asuntos del personal Académico* de la UNAM, por el apoyo otorgado para el desarrollo de este trabajo de tesis, a través del proyecto de investigación **PAPIIT: Estudio del Agrietamiento Termomecánico de Estructuras Masivas de Concreto**, clave IN116419.

Sinceramente...

Dedicatoria.

Dedicada con todo mi amor, cariño, respeto y admiración a *Dayana Ivonne Quintanar Pacheco* †. Por todos los momentos que pasamos juntos, quien siempre estuvo a mi lado dándome apoyo para culminar este camino y más que nada por todo tu amor y cariño incondicional.

Claudio Fuentes Ruiz
Sergio Daniel Romero Torres
Estado de México, México
July, 2021