

EVALUACIÓN DEL DAÑO POR HUMEDAD DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA
MODIFICADA CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR).

SANDRA PAOLA SANCHEZ MILLAN
CINDY CAROLINA VEGA RAMIREZ

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTA
2016

EVALUACIÓN DEL DAÑO POR HUMEDAD DE UNA MEZCLA
ASFÁLTICA MODIFICADA CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO
(GCR).

SANDRA PAOLA SANCHEZ MILLAN
CINDY CAROLINA VEGA RAMIREZ

Tesis elaborada como opción de grado

Director(es):
Ingeniero Edgar Alexander Padilla Gonzales
Magister en Ingeniería Civil
Ingeniero Hermes Ariel Vacca Gámez
Magister en Ingeniería Civil

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTA
2016

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	8
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
2. ANTECEDENTES.....	11
3. OBJETIVOS.....	17
3.1. OBJETIVO GENERAL	17
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
4. JUSTIFICACIÓN.....	18
6. MARCO REFERENCIAL	20
6.1. MARCO CONCEPTUAL	20
6.1.1. Pavimento.	20
6.1.2. Pavimento Flexible	20
6.1.3. Mezclas asfálticas modificadas	21
6.1.4. Grano de caucho reciclado (GCR).	22
6.1.5. Daño por humedad.....	22
6.1.6. Método de tensión indirecta (TSR).....	24
6.2. MARCO LEGAL	27
7. METODOLOGÍA	30
7.1. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	30
7.1.1. Variable Independiente	30
7.1.2. Variable dependiente	30
7.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN	30
7.3. FASES DE INVESTIGACIÓN	30
7.3.1. Fase 1	30
7.3.2. Fase 2	35
8. RESULTADOS	37
8.1. FASE I	37
8.1.1. Agregados gruesos	37
8.1.2. Agregados finos	39
8.1.3. Agregados combinados.....	41
8.1.4. Ligante asfáltico	41
8.1.5. Diseño de mezcla.....	46
8.1.5.2. Estabilidad y flujo	49
8.2. FASE II	52

8.2.1. Mezcla modificada.....	52
9. CONCLUSIONES.....	74
10. RECOMENDACIONES.....	75
11. BIBLIOGRAFÍA.....	76

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Contenido de GCR en ensayos	22
Tabla 2. Factores que contribuyen al daño por humedad.....	23
Tabla 3. Métodos para conocer el daño por humedad.....	23
Tabla 4. Porcentaje de éxito para cada método de ensayo.....	24
Tabla 5. Granulometrías definidas	25
Tabla 6. Requisitos del agregado grueso para mezclas asfálticas en caliente .	31
Tabla 7. Requisitos del agregado fino para mezclas asfálticas en caliente	32
Tabla 8. Especificaciones del cemento asfáltico.....	33
Tabla 9. Especificación de asfaltos modificados con GCR	35
Tabla 10. Granulometría grava triturada ¾”	37
Tabla 11. Granulometría grava triturada ½”	38
Tabla 12. Granulometría arena triturada gris de Sumapaz	39
Tabla 13. Granulometría arena triturada color amarilla.....	40
Tabla 14. Ensayos de agregados combinados	41
Tabla 15 Viscosidad para diferentes porcentajes de GCR	41
Tabla 16 Penetración para diferentes porcentajes de GCR.....	43
Tabla 17. Puntos de ablandamiento para diferentes porcentajes de GCR	44
Tabla 18. Dosificación de materiales para mezcla asfáltica.....	46
Tabla 19. Granulometría y de Diseño de mezcla	47
Tabla 20. Estabilidad y flujo de muestras no modificadas	49
Tabla 21. Estabilidad y flujo de muestras modificadas con % GCR.....	52
Tabla 22. Porcentaje de vacíos.....	55
Tabla 23. Gravedad específica máxima dependiendo del porcentaje de GCR .	57
Tabla 24. Porcentaje de vacíos con diferente número de golpes	60
Tabla 25. Número de golpes para cada % de GCR.....	61
Tabla 26. Porcentajes de vacíos corregidos	62
Tabla 27. Ensayo TSR en muestras secas	64
Tabla 28. Grado de saturación antes de 24 horas- Muestras húmedas	67
Tabla 29. TSR Muestras húmedas	68
Tabla 30. Resistencia a la tensión por % de GCR	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Capas del pavimento	21
Figura 2 Viscosidad Brookfield 10% GCR a 163 °C.....	42
Figura 3 Penetración para ligante modificado con 2% GCR.....	44
Figura 4 Punto de ablandamiento 2%, 10% y 20%.....	46
Figura 5 Ensayo Marshall Briquetas 0% GCR	49
Figura 6 Estabilidad y flujo 2% GCR.....	50
Figura 7 Estabilidad y flujo 5% GCR.....	50
Figura 8 Estabilidad y flujo 10% GCR.....	50
Figura 9 Estabilidad y flujo 15% GCR.....	50
Figura 10 Estabilidad y flujo 20% GCR.....	51
Figura 11 Briquetas 0% GCR – Gravedades y vacíos	59
Figura 12 Briquetas 2% GCR – Gravedades y vacíos	59
Figura 13 Briquetas 5% GCR - Gravedades y vacíos.....	59
Figura 14 Briquetas 10% GCR – Gravedades y vacíos	60
Figura 15 TSR muestras secas 0% GCR	65
Figura 16 TSR muestras secas 2% GCR	65
Figura 17 TSR Muestras secas 5% GCR	65
Figura 18 TSR muestras secas 20% GCR	66
Figura 19 TSR muestras húmedas 0% GCR	69
Figura 20 TSR muestras húmedas 2% GCR	69
Figura 21 TSR muestras húmedas 10% GCR	69
Figura 22 TSR muestras húmedas 15% GCR	70
Figura 23 Evaluación visual del daño por humedad	72

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Granulometría Grava $\frac{3}{4}$ "	37
Gráfica 2 Granulometría Grava $\frac{1}{2}$ "	38
Gráfica 3 Granulometría arena triturada gris de Sumapaz	39
Gráfica 4 Granulometría arena triturada color amarilla	40
Gráfica 5 Viscosidad para diferentes porcentajes de GCR	42
Gráfica 6 Penetración para diferentes porcentajes de GCR	43
Gráfica 7 Puntos de ablandamiento para diferentes porcentajes de GCR	45
Gráfica 8 Granulometría Diseño de mezcla	48
Gráfica 9 Estabilidad de muestras modificadas con GCR	53
Gráfica 10 Flujo de muestras modificadas con GCR	53
Gráfica 11 Relación estabilidad y flujo de las muestras modificadas con GCR	54
Gráfica 12 Gravedad Específica Bulk para diferentes porcentajes de GCR	57
Gráfica 13 Gravedad específica máximo con diferentes porcentajes de GCR	58
Gráfica 14 Porcentaje de vacíos con diferentes porcentajes de GCR	58
Gráfica 15 Porcentaje de vacíos a diferente número de golpes	60
Gráfica 16 Porcentaje de vacíos de muestras para TSR	61
Gráfica 17 Grado de saturación para diferentes porcentajes de GCR	66
Gráfica 18 Resistencia a la tensión	71
Gráfica 19 Coeficiente RRT Relación de la resistencia a la tensión	71

INTRODUCCIÓN

Por medio del presente trabajo de investigación se buscó evaluar el efecto que tiene el daño por humedad en las mezclas asfálticas modificadas con Grano de Caucho Reciclado (GCR), a través de la prueba establecida por la norma I.N.V.E-725-13, que tiene por título: evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta.

Partiendo de un diseño de mezcla entregado por la Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial de Bogotá, se realizaron los ensayos de caracterización correspondiente, se modificó la mezcla por vía húmeda teniendo en cuenta la especificación IDU 560-11, donde el ligante asfáltico fue variado respectivamente con 2%, 5%, 10%, 15% y 20% de GCR, de igual forma al proponer esta modificación se busca darle un enfoque ambiental al implementar los NFU- (Neumáticos Fuera de Uso) que son fuente de contaminación ambiental.

Además de evaluar el daño por humedad, donde se realizan juegos de 6 probetas, 3 secas y 3 húmedas con el fin de hallar el coeficiente RRT que determina la relación de resistencias a la tensión, parámetro por el cual se mide el daño por humedad en las mezclas asfálticas, se realizara el ensayo de estabilidad y flujo empleando el aparato Marshall parametrizado en la norma I.N.V. E-748-13 a través del cual se determina la resistencia bajo carga monótonica para encontrar finalmente la afectación que tienen estos parámetros con las diferentes variaciones de GCR

Se pudo observar que la estabilidad y flujo de las muestras modificadas con GCR descendía, su principal causa es que la adhesión entre el ligante y los agregados pétreos se ve afectada por la modificación realizada con los diferentes porcentajes de GCR, además se encontró que a medida que aumentaba el contenido de GCR el coeficiente RRT disminuía.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia se han realizado algunas investigaciones en temas medio ambientales enfocadas al aprovechamiento de las llantas inutilizadas, pues existe un alto índice de producción de contaminación generado de la quema indiscriminada de material proveniente de llantas del sector automotriz, ya que la combustión es la única forma de eliminar los NFU (Neumáticos fuera de servicio). En este punto es donde el caucho reciclado de las llantas inutilizadas y la infraestructura vial del país empieza a jugar un rol importante en el desarrollo del tópic, ya que se busca por medio de la modificación de mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado dar soluciones sostenibles a la problemática de la contaminación causada por estos residuos, además de crear nuevas opciones en la modificación de asfaltos.

La malla vial es uno de los parámetros más influyentes en el desarrollo económico, social y cultural de la ciudad de Bogotá, porque es este el medio a través del cual se crea la comunicación entre diversos lugares y se realiza la comercialización de productos y servicios. Por ello es importante tener en cuenta todos los factores causantes de la afectación de los pavimentos asfálticos pues estos hacen repercusión en todo el conjunto multicapa y a su vez inciden en la malla vial al verse reducida su capacidad a nivel de servicio.

Como señalan Chen y Huang ¹la susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas se ha convertido en tópic de algunas investigaciones durante los últimos años; principalmente se ha analizado el desempeño del ligante asfáltico, los materiales granulares, las características ambientales enfocadas a los cambios de temperatura y las cargas a que está sometida la mezcla. Además de estos existen otros parámetros que afectan el comportamiento de la infraestructura que no son tomados en cuenta a la hora de realizar el diseño y construcción de una vía, generando un aumento de los costos en las etapas de mantenimiento por la concepción de problemas prematuros, disminuyendo su vida útil. Por ello se hace necesario mejorar las características de los asfaltos mediante técnicas que permitan optimizar sus propiedades.

En Bogotá se cuenta con la especificación técnica 560-11 IDU referente a mezclas asfálticas en caliente con asfaltos modificados con caucho, en ella se aborda la metodología de estudio por vía húmeda. Sin embargo, ésta especificación no abarca el daño por humedad a través del ensayo TSR (tensile strength ratio - ensayo de tracción indirecta) en este tipo de asfaltos, por ello se hace necesario plantear el estudio en esta investigación, con el fin de determinar que comportamiento presentan las mezclas asfálticas modificadas con diferentes porcentajes de GCR.

¹ CHEN, Xingwei y HUANG, Baoshan. Evaluation of moisture damage in hot mix asphalt using simple performance and superpave indirect tensile tests. Construction and Building Materials. 2008. Volumen 22. p. 1950-1962. Disponible [En línea]. <<http://www.sciencedirect.com.ugc.elogim.com:2048/science/article/pii/S0950061807001882>>

PREGUNTA PROBLEMA

¿Cuál es el daño por humedad producido en mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado (GCR)?

2. ANTECEDENTES

El daño por humedad es, la capacidad de deterioro de una mezcla asfáltica frente a la presencia de agua en cualquier estado, sus principales consecuencias son el desprendimiento del cemento asfáltico y de los agregados, además del desprendimiento gradual de los agregados y la mezcla de la superficie por acción del tránsito vehicular².

A finales de los años 40 los estudios acerca del daño por humedad en las mezclas asfálticas modificadas se incrementaron debido a la cantidad de noticias donde se mencionaba el mal estado de las vías y los recursos invertidos en su mantenimiento por las entidades encargadas. En ese periodo las pruebas más utilizadas para determinar la susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfálticas fueron la inmersión estática, la prueba de ebullición y la prueba de inmersión-compresión.

En los años de 1950 el método AASHTO T283 fue incorporado para determinar la susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfálticas en caliente, en reemplazo de la inmersión-compresión, ya que no proporcionaba una predicción acerca del parámetro de estudio, a pesar de ser una de las primeras en convertirse en una prueba estándar (ASTM). Cabe resaltar que tiempo después el programa de Investigación Estratégico de Carretera (SHRP- Strategic Highway Research Program) realizó varios proyectos de investigación, con el fin de mejorar y perfeccionar las especificaciones para mezclas asfálticas en caliente identificando las causas del daño por humedad.³

Posteriormente en 1960, se empezaron a generar las primeras ideas con respecto al desarrollo del asfalto-caucho, Charles McDonald comenzó a buscar un método para la conservación de aceras que presentaban fallos como resultado de la formación de grietas, este primer impulso dio como resultado la utilización del asfalto caucho en la industria de la pavimentación de carreteras, principalmente en Norteamérica en los estados de Arizona, California, Texas y Florida, con el fin de sellar grietas y juntas, sin embargo el parámetro de daño por humedad aún no había sido tenido en cuenta en las mezclas modificadas.⁴

² CARO, Silvia, GARCÍA, Cristina y CAICEDO, Bernardo. Modelo numérico para el estudio del clima en pavimentos flexibles". XIII Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos. Universidad de los Andes. Bogotá. 2001. Disponible [En línea]: <https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwik6qWP7aTLAhXEHR4KHWaHD9IQFgguMAI&url=https%3A%2F%2Ffojsrevistaing.uniandes.edu.co%2Ffojs%2Findex.php%2Frevista%2Farticle%2Fdownload%2F521%2F702&usg=AFQjCNHxKu2NzFIWvubVqjrXNcWy4zn14w&sig2=k9bSuVLXgz0BesndorhMnw>.

³ PLAZA, Sara y RINCON, Gina. Estudio de la susceptibilidad al daño por humedad de una mezcla asfáltica para rodadura utilizando asfalto 80-100 y su relación con el desempeño de campo. Pontificia Universidad Javeriana. Tesis de Maestría. Bogotá. 2014. p 15. Disponible [En línea]:

<http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/12696/1/PlazaTorrvalhoSaraCatherine2014.pdf>

⁴ CARREÑO, Ricardo y REYES, Jesus. Estudio del efecto de aditivos reductores de temperaturas de trabajo, en el desempeño de mezclas bituminosas Gap-Graded elaboradas con asfaltos modificados con grano de caucho reciclado. Universidad Católica de Colombia. Bogotá D.C. 2015. p. 17-18. Disponible [En línea]:

Las mezclas asfálticas tienen parámetros o variables que determinan su comportamiento aumentando el riesgo a la susceptibilidad por humedad, entre los más comunes se encuentran la condición del sistema de drenaje, la propia estructura del pavimento, el diseño de la mezcla, el uso de aditivos, el servicio que va a prestar y el sitio de colocación, que involucra principalmente el clima y la acción de congelación y descongelación; finalmente, se debe tener en cuenta la variabilidad de construcción.

Aunque se conocen los parámetros que determinan el comportamiento de la mezcla asfáltica aún no se cuenta con suficientes bases de datos que incluyan las variables requeridas y un número suficiente de sustentos para poder generar una prueba definitiva.

Teniendo en cuenta lo anterior se han desarrollado varias investigaciones que refuerzan el conocimiento que se tiene acerca del daño de la humedad en pavimentos asfálticos. Entre las que se encuentran:

Kanitpong & Bahia⁵, evaluaron la relación del comportamiento entre los pavimentos asfálticos en campo y los valores de TSR hallados en las muestras de laboratorio, además decidieron evaluar el efecto de los aditivos anti stripping en el desempeño en campo de las muestras asfálticas.

A partir de los ensayos se determinó que no existía relación entre los resultados de TSR y el comportamiento del pavimento en campo, el cual fue medido por el índice de deterioro de pavimento y que tampoco existía relación entre el TSR y el agotamiento específico del pavimento (desmoronamiento).

Al evaluar el efecto que tienen los aditivos anti stripping en los pavimentos asfálticos, se encontró que en campo muestran un efecto en el comportamiento y en el agotamiento del pavimento relacionado con los daños por humedad a diferencia de lo encontrado con los resultados en el laboratorio, en donde los aditivos anti stripping no cambiaron las propiedades reológicas de los aglutinantes del asfalto, sin embargo se encontró que aumentan la adhesión del aglutinante a la superficie de los agregados, especialmente cuando el enlace del aglutinante se expone al agua.

Buchanan y Moore⁶, estudiaron las mezclas asfálticas en caliente (HMA- Hot mix asphalt) utilizando dos tipos de ligantes (asfalto puro y asfalto modificado con

<http://repository.ucatolica.edu.co/jspui/bitstream/10983/2580/1/Efecto-aditivos-reductores-temperaturas-de-trabajo.pdf>

⁵ KANITPONG, Kunawee y BAHIA, Hussain. Evaluation of HMA moisture damage in Wisconsin as it relates to pavement performance. International Journal of Pavement Engineering. Vol. 9. Washington D.C. 2008. p. 9-17. Disponible [En línea] <https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjvkvL8KTLAhWD9x4KHYYQeBcoQFggrMAI&url=http%3A%2F%2Fdocs.trb.org%2Fprp%2F06-1605.pdf&usg=AFQjCNEdtGepczwb3Ajn0dNyRK-KFbsnlw&sig2=3caZHbKSBO07JuRHQNvcew>.

⁶ BUCHANAN, Shane y MOORE, Vernon. Laboratory Accelerated Stripping Simulator for Hot Mix Asphalt. Mississippi Transportation Research Center. Mississippi. James Worth Bagley College

polímero) sometidos a tres condiciones (ninguno, cal hidratada y cal hidratada con agente antistripping líquido). Las probetas fueron compactadas en el compactador giratorio y posteriormente colocadas en el equipo MIST con el fin de determinar la resistencia a la tracción de las muestras húmedas y secas para compararlas; en este estudio se ve expresado el efecto del parámetro de estudio en la resistencia de la mezcla asfáltica. Algunas tendencias fueron evidentes en las pruebas realizadas, entre ellas se encuentran que la adición del polímero al asfalto aumenta el coeficiente TSR (Tensile Strength Ratio) y en la condición de antistripping la adición de cal hidratada y cal hidratada con aditivo líquido aumenta más el coeficiente TSR en mezclas con asfalto puro.

En la investigación realizada por Airey⁷, se implementó la prueba de laboratorio combinando, esta ha sido usada para cuantificar el daño de humedad en mezclas de asfaltos británicos, esta consiste en evaluar los efectos combinados del envejecimiento y el daño por humedad en las mezclas asfálticas, mediante el envejecimiento de los especímenes de mezcla compactas de asfalto con presencia de humedad, presión y temperaturas elevadas. Dicha prueba ha sido capaz de reproducir la pérdida del módulo de rigidez por el daño por humedad. Adicionalmente discrimina la resistencia al daño por humedad para diferentes combinaciones de mezclas de asfalto.

Rondón y Moreno evaluaron la susceptibilidad al daño por humedad, en mezclas asfálticas con dos (2) tipos de ligantes (CA 80-100 y CA 60-70) concluyendo que la adhesión que existe entre el ligante asfáltico y el agregado pétreo, se ve afectado por el cambio en la consistencia que experimenta el ligante asfáltico en presencia del agua.

Aunque el cemento asfáltico es un material impermeable y de muy baja reacción química, en la presencia de agua modifica su consistencia y aumenta su rigidez. Lo anterior demuestra que la interfase ligante asfáltico-agregado pétreo se afecta por tal cambio de consistencia. El aumento en la rigidez causa contracción del ligante asfáltico sin cambio de volumen, lo cual podría ser una de las causas que generen el desprendimiento del cemento asfáltico con el agregado.⁸

Chen y Huang⁹, evaluaron el daño por humedad en mezclas asfálticas en caliente para ello realizaron pruebas de rendimiento simple y tensión indirecta.

of engineering Mississippi States of university. 2005, p. 90-92. Disponible [En línea]: http://ntl.bts.gov/lib/25000/25000/25098/FINAL_REPORT_SS_167.pdf

⁷ AIREY, Gordon; COLLOP, Andrew; ZOOROB, Salah y ELLIOTT R. The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage. Construction and building materials. Vol. 22. Nottingham. 2008. p. 2014-2020. Disponible [En línea]: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061807001808>

⁸ RONDÓN, Hugo y MORENO, LUIS. Influencia del agua en el fenómeno de stripping en mezclas asfálticas: estudio sobre el ligante. Universidad Católica de Colombia y Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá. 2010. p. 7 Disponible [En línea]: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-21262010000200005

⁹ CHEN, Xingwei y HUANG, Baoshan. Evaluation of moisture damage in hot mix asphalt using simple performance and superpave indirect tensile tests. Construction and Building Materials. The University of Tennessee. Knoxville. Vol 22. 2008. p. 1957-1961. Disponible [En línea]: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061807001882>

El principal aporte de la investigación fue evaluar las gravas o material grueso con diferentes tipos angularidad y acondicionamientos FT (Freeze Thaw) Y MIST (Moisture Induced Susceptibility Test), en algunas de estas muestras se utilizaron aditivos anti-stripping y en otras no, encontrando que el incremento de los ciclos en FT o MIST aumentaba la susceptibilidad al daño por humedad y el incremento de la angularidad de los agregados gruesos podría aumentar el módulo dinámico además encontraron que los aditivos anti-stripping son efectivos para disminuir la susceptibilidad al daño por humedad.

Reyes realizó una investigación sobre el desempeño mecánico de las mezclas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80-100), encontrando que a medida que el porcentaje de caucho y plástico aumenta, el porcentaje de vacíos en la mezcla también lo hace, lo que indica que al aumentar las proporciones de los modificantes en la mezcla, se dificulta la unión entre el agregado y el asfalto, además encontró que el comportamiento de la mezcla asfáltica modificada con plástico presentó mejora en ahuellamiento, las deformaciones en esta disminuyeron en un 59 % comparada con la mezcla sin modificar. La mezcla asfáltica modificada con caucho y plástico, presenta un mejor comportamiento que la mezcla sin modificar (sólo asfalto), lo cual muestra que el plástico logra excelentes resultados en cuanto a la deformación permanente. Esta mezcla presentó un 8% de reducción de ahuellamiento¹⁰.

Sotelo y Gutiérrez¹¹, abordan los principales métodos de evaluación del daño por humedad, entre los más comúnmente utilizados en la mayoría de los países encontramos:

Método de ebullición: (ASTM D-3625) Permite determinar la pérdida de la película asfáltica en los materiales pétreos, informada como un porcentaje de cubrimiento. Mediante este ensayo observamos el incremento o la falta de la adhesión al utilizar algunas dosis de aditivos químicos, así como el incremento de los agregados recubiertos con asfalto caliente no compacto, debido a la acción del agua en ebullición.

Método de tensión indirecta: (AASHTO T-283 Y ASTM D-4867) Es el más utilizado alrededor del mundo, en este se preparan seis especímenes compactados hasta tener entre 6 y 8% de vacíos de aire, se clasifican en dos grupos uno para someterse a condiciones secas, solo durante dos horas sumergidos y el otro a condiciones húmedas sujeto a variaciones de la condición de humedad durante determinado periodo de tiempo para finalmente someterlos a la prueba de tensión indirecta en la prensa Marshall. También se obtiene el

¹⁰ REYES, Fredy; MADRID, María y SALAS, Sandra. Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80-100). Pontificia Universidad Javeriana. Infraestructura Vial. Bogotá. 2007. p 33-34. Disponible [En línea]: <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/2063/2026>

¹¹ SOTELO, Victor y GUTIERREZ, Alvaro. Métodos prácticos para determinar la sensibilidad al agua en las mezclas asfálticas. Revista vías terrestres. Edición No 17. México D.F. 2012. p. 10 - 14. Disponible [En línea]: http://www.amivtac.org/assets/files/magazine/9992_VT17.pdf

coeficiente TSR dividiendo el valor promedio de ambos especímenes, este valor debe ser mayor al 80% para que sea resistente a los daños causados por la humedad.

Método inmersión-compresión: (AASHTO T-165 y ASTM D-10758). Se preparan 6 especímenes hasta obtener 69% de vacíos, se dividen en dos subgrupos uno se somete a condiciones húmedas sumergidos a 60°C durante 24 horas y el otro a condiciones secas sumergidos dos horas a 25 °C. Al final se obtiene un valor promedio de la fuerza por compresión axial de los especímenes sujetos a condiciones secas y otros a condiciones húmedas, además del índice de estabilidad retenida.

Método de la rueda de Hamburgo: Utiliza un equipo formado por dos ruedas de acero que se mueven axialmente a una velocidad de 30 cm por segundo sobre una muestra asfáltica previamente compactada y sumergida completamente en un baño de agua a 50 °C. El criterio general de falla en la especificación es definido a 4 mm de deformación máxima en autopistas y 2.5 mm en zonas industriales

En este estudio se determinó que el daño que causa la humedad en las mezclas asfálticas puede ser generado por diversos mecanismos físico-químicos, por ello es necesario utilizar uno o varios métodos que puedan indicar este daño, teniendo en cuenta que algunos de estos métodos son utilizados en la etapa de diseño y otros en la etapa de construcción de la carpeta asfáltica.

Munera y Ossa¹² realizaron el estudio del efecto de la modificación de un asfalto colombiano con polímeros, evaluando principalmente las características morfológicas, reológicas y térmicas con el objeto de identificar diferentes niveles de modificación. Los polímeros utilizados fueron: cera de polietileno (CPE), copolímero de estireno butadieno estireno (SBS) y caucho molido de llanta (CR), fueron adicionados al asfalto en proporciones de 3 al 15 %. Las características térmicas y reológicas se analizaron mediante calorimetría diferencial de barrido y reometría rotacional. Los cambios en la morfología se analizaron mediante microscopía de fuerza atómica (AFM). Encontraron en las mezclas con cera de polietileno que los asfaltos son más duros y tienen temperaturas de ablandamiento mayores. Las mezclas con SBS produjeron asfaltos con mayores resistencias a las deformaciones permanentes y la adición de caucho molido de llanta arrojó una mejoría en las propiedades en comparación con el asfalto crudo. Sin embargo, estas mejorías fueron en todos los casos menores a las obtenidas con la adición de CPE y SBS.

Cagry y Burak estudiaron los efectos de aditivos como la cal hidratada, los elastómeros (SBS- Styrene-Butadiene-Styrene) y plastómeros (EVA- etileno vinil acetato), con el fin de evaluar la adhesión potencial y las características de la susceptibilidad a la humedad en mezclas asfálticas en caliente (HMA) con dos

¹² MUNERA, Juan y OSSA Alexander. Estudio de mezclas binarias Asfalto – Polímero. Escuela de ingeniería. Universidad EAFIT. Medellín, Colombia. p. 18 - 31. Disponible [En línea]: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-62302014000100003&script=sci_arttext

contenidos de agregados, el primero una mezcla de piedras calizas y el otro solo con un contenido de tipo de piedra caliza; las propiedades de estudio fueron evaluadas a través del ensayo de Stripping de Nicholson (ASTM D 1664) y el ensayo modificado de Lottman (AASHTO T 283) encontrando que la adición de cal hidratada y la modificación con polímeros aumenta la resistencia de mezclas asfálticas a los efectos causados por el agua. También encontraron que las muestras elaboradas con SBS exhibieron mayor resistencia al daño por humedad que las preparadas con EVA¹³

Rondón y Molano decidieron realizar un estudio que tuviera su principal aplicación en la ciudad de Bogotá ya que por sus condiciones climáticas se reportó en obra la disminución de la temperatura de compactación, decidiendo evaluar la influencia de esta temperatura de compactación sobre la resistencia mecánica (Marshall) de mezclas asfálticas en caliente modificadas con grano de caucho reciclado (GCR), estas fueron modificadas por vía húmeda, se emplearon dos granulometrías y fueron compactadas a temperaturas de 120, 130, 140 y 150°C, encontrando que la disminución de la temperatura de compactación (hasta 30°C), genera una pequeña disminución en la resistencia (Marshall). Adicionalmente, se presentó un incremento la resistencia cuando se compactan bajo una temperatura de 10°C por debajo de la de referencia (150°). Las mezclas no modificadas (sin GCR) experimentaron un decaimiento lineal en su resistencia de hasta 34%¹⁴.

En Egipto Abu El-Maaty Behiry decidió evaluar la relación de estabilidad y resistencia a la tracción (Marshall) para determinar la resistencia al daño por humedad, ya que las carreteras en Egipto mostraban grave deterioro causado por la intrusión de agua en las mezclas asfálticas generando una pérdida de resistencia y durabilidad. Abu realizó los ensayos con dos aditivos anti-stripping (hidratada cal y cemento Portland). Los resultados mostraron que la cal hidratada y el cemento portland podrían aumentar la estabilidad Marshall, la resistencia a la tracción y la resistencia al daño de la humedad de las mezclas especialmente en condiciones difíciles, encontrando además que el uso de cal hidratada tuvo mejores resultados que el cemento Portland¹⁵.

¹³ CAGRI, Gorken y BURAK Sengoz. Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime. Dokuz Eylul University, Izmir, Turkey. P. 1-10 Disponible [En línea]: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061808003486>

¹⁴ RONDON, Hugo; MOLANO, Yennifer y TENJO Angélica. Influencia de la Temperatura de Compactación Sobre la Resistencia Bajo Carga Monotónica de Mezclas Asfálticas Modificadas con Grano de Caucho Reciclado de Llantas. Instituto Tecnológico Metropolitano. Medellín, Colombia. Tecno-Lógicas, N 29. (2012). p.13-31. Disponible [En línea]: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=344234330002>

¹⁵ABU EL-MAATY BEHERY, Ahmed. Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures. Minufiya University. Shibeen El- Kom City, Egypt. Disponible [En línea]: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447912000974>

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el daño por humedad de una mezcla asfáltica modificada con diferentes porcentajes de GCR (Grano de Caucho Reciclado).

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Modificar con grano de caucho reciclado (GCR), una mezcla asfáltica convencional, de acuerdo a las recomendaciones de la Especificación Técnica IDU 560-11.

Determinar el daño por humedad de una mezcla asfáltica modificada con grano de caucho reciclado (GCR) por medio del ensayo TSR (tensile strength ratio - ensayo de tracción indirecta)

Comparar si en una mezcla asfáltica modificada con grano de caucho reciclado (GCR) se genera una optimización del parámetro de daño por humedad con respecto a una mezcla asfáltica convencional.

4. JUSTIFICACIÓN

Al pasar el tiempo el hombre ha generado ideas con el fin de mejorar las vías y carreteras por las cuales transita a diario, generando una necesidad de estar a la vanguardia en el diseño y construcción de carpetas asfálticas cada vez más resistentes y de mayor durabilidad, por lo cual la composición y la calidad de los materiales utilizados en las mezclas asfálticas se convierten en un tema importante a la hora de diseñar, buscando las mejores características del pavimento en términos de resistencia, comodidad y seguridad.

Las mezclas asfálticas han venido siendo modificadas durante algunos años con el objeto de mejorar el comportamiento del conjunto multicapa o pavimento. A este aspecto se le suma la problemática de la contaminación generada en el país por el mal manejo de los residuos de llantas o neumáticos, lo que hace necesario la implementación de estos residuos en nuevas técnicas. Las aplicaciones más extendidas de los NFU (Neumáticos fuera de servicio) en carreteras son, en forma de granulados, para la fabricación de betunes-caucho, directamente como áridos o filler para las mezclas bituminosas¹⁶. La implementación del GCR (Grano de caucho reciclado) como modificante de las mezclas asfálticas, produce una reutilización de las llantas y genera además nuevas condiciones dentro de la mezcla que podrían optimizar sus parámetros.

En estudios realizados a través de diversas investigaciones se ha querido encontrar las causas y la afectación que tiene la humedad en las mezclas asfálticas, tanto a nivel micro estructural como macro estructural, por ello es importante conocer que el daño en un pavimento gracias a la humedad es causado por algunos mecanismos físicos y químicos; entre los más comunes se encuentran la falta de adhesión entre el agregado y el asfalto, la falta de cohesión entre las moléculas del asfalto, la falta de cohesión entre las moléculas del agregado, la emulsificación espontánea del asfalto y en climas extremos, el congelamiento del agua atrapada en la mezcla asfáltica, dando como resultado daños prematuros en el pavimento, afectando principalmente la resistencia y la durabilidad del mismo¹⁷.

Cabe resaltar que este parámetro en numerosas oportunidades no es tenido en cuenta en los diseños, generando deficiencias permanentes. Debido a esto es importante conocer cómo se comporta una mezcla asfáltica modificada con grano de caucho (GCR) por vía húmeda frente al daño por humedad.

¹⁶ EPPS, Jon. Use of recycled rubber tires in highways. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). Synthesis of Highway Practice 198. Transportation Research Board. Washington D.C. 1994. 2010. p. 13. Disponible [En línea]: http://www.asphaltrubber.org/ARTIC/Reports/RPA_A1021.pdf

¹⁷ SOTELO, Victor y GUTIERREZ, Alvaro. Métodos prácticos para determinar la sensibilidad al agua en las mezclas asfálticas. Revista vías terrestres. Edición No 17. México D.F. 2012. P.10 Disponible [En línea]: http://www.amivtac.org/assets/files/magazine/9992_VT17.pdf

5. HIPÓTESIS

En una mezcla asfáltica modificada con mayor porcentaje de grano de caucho reciclado (GCR), el daño por humedad es menor en comparación con una mezcla asfáltica estándar o no modificada.

6. MARCO REFERENCIAL

6.1. MARCO CONCEPTUAL

6.1.1. Pavimento. Superficie de rodadura, que depende del tipo de vehículos que circulen en la vía, su función es distribuir y transmitir las cargas que son aplicadas por el tránsito. Su formación está dada por varias capas de distintos materiales.

Existen dos tipos de pavimentos: rígidos (formados por concreto) y flexibles (formado por asfalto). Cada tipo de pavimento se utiliza teniendo en cuenta el comportamiento que tiene frente a la resistencia a la flexión, ya que para cada caso o lugar es diferente¹⁸.

6.1.2. Pavimento Flexible. Este debe proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, resistente a la acción del tránsito a la del intemperismo y otros agentes perjudiciales, así como transmitir a las terracerías los esfuerzos por las cargas del tránsito. Entre las características principales que debe cumplir un pavimento flexible se encuentran, la deformabilidad, la durabilidad, el costo, el requerimiento de conservación, la comodidad y por último la resistencia estructural ya que debe soportar las cargas impuestas por el tránsito que producen esfuerzos normales y cortantes en la estructura, considerados como la principal causa de falla desde el punto de vista estructural. Además de los esfuerzos cortantes también se tienen los producidos por la aceleración, frenaje de los vehículos y esfuerzos de tensión en los niveles superiores de la estructuras.

6.1.2.1. Estructura Básica del Pavimento:

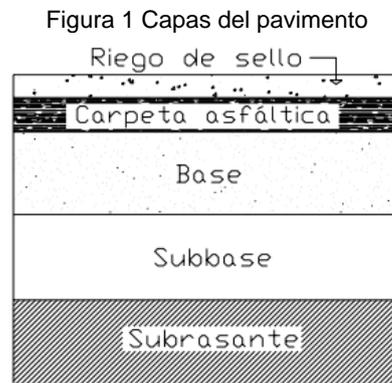
Capa de rodadura: Su función es que sea una capa estable, uniforme, impermeable y con una textura apropiada que preste comodidad a los usuarios de la vía, está constituida por material pétreo mezclado con algún producto asfáltico (cemento asfáltico, asfalto líquido, emulsión asfáltica).

Base: Capa del pavimento que tiene material granular, conformado principalmente por mezcla natural de agregado y suelo; existen bases estabilizadas con cemento Portland, cal o materiales bituminosos. Adquiriendo la resistencia necesaria para transmitir una parte del esfuerzo a la siguiente capa.

Sub-base: Su función es transmitir los esfuerzos obtenidos por la capa base hacia la sub-rasante de una manera óptima, para disminuir efectos que perjudiquen el pavimento en cuanto a cambios volumétricos y el rebote elástico, se debe tener en cuenta además que no se presente contaminación entre las capas de sub-base y sub-rasante.

¹⁸ GUTIÉRREZ, Fernando. Rediseño geométrico del distribuidor vial de la UDLA – P en la ruta Quetzalcóatl. Universidad de las Américas Puebla. México. 2004. p. 82. Disponible [En línea]: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/gutierrez_g_f/capitulo_3.html

Al tener una buena Sub-base se puede reducir el costo de la infraestructura debido a que las capas superiores del pavimento reciben mayores esfuerzos y la sub-rasante queda sujeta a menores esfuerzos, entonces se requiere de características menos rígidas que se pueden recrear con materiales de menor costo.¹⁹



Fuente: Rediseño geométrico del distribuidor vial de la UDLA-P en la ruta Quetzalcóatl²⁰

6.1.3. Mezclas asfálticas modificadas. Las mezclas asfálticas modificadas cuentan con la incorporación de elementos como aditivos, entre los más utilizados encontramos los polímeros, grano de caucho reciclado o sustancias químicas ya preparadas, entre otros, los cuales provocan una modificación de sus propiedades físicas y geológicas, lo que lleva a la disminución de la susceptibilidad a la temperatura, a la humedad y a la oxidación.

El objetivo principal de modificar las mezclas asfálticas es que la adherencia aumente entre el material asfáltico y el pétreo y que aún en presencia de agua se conserve. Los modificadores generalmente se aplican al material asfáltico, antes de mezclarlo con el pétreo; al adicionarlos se aumentara la resistencia a la deformación y se pueden reducir los agrietamientos generados en él.

Se ha comprobado que el asfalto convencional tiene buenas propiedades de adhesión y mecánicas; pero en la actualidad debido a un incremento en los volúmenes de tráfico se originan aumentos en las cargas axiales, lo que ocasiona que no sea suficiente utilizar asfaltos convencionales en la construcción de carreteras, por lo cual se deben tener en cuenta parámetros que disminuyan el envejecimiento prematuro, la poca durabilidad causada por las deformaciones y las fisuras generadas en la carpeta asfáltica.²¹

¹⁹ HERNÁNDEZ, Hugo; MOLINA, Everth y REYES, Cristian. Propuesta de elaboración de un manual práctico para el control de calidad en el mantenimiento de pavimentos asfálticos. El Salvador. 2007. Cap. 2. p. 60 Disponible [En línea]: http://www.univo.edu.sv:8081/tesis/018150/018150_Port.pdf

²⁰ GUTIÉRREZ, Fernando. Rediseño geométrico del distribuidor vial de la UDLA – P en la ruta Quetzalcóatl. Universidad de las Américas Puebla. México. 2004. p. 85. Disponible [En línea]: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/gutierrez_g_f/capitulo_3.html

²¹ MAXIL, Roberto y SALINAS, Marco. Ventajas y Desventajas del Uso de Polímeros en el Asfalto. Universidad de las Américas Puebla. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

6.1.4. Grano de caucho reciclado (GCR). El grano de caucho reciclado proviene de los neumáticos que ya no se utilizan, este generalmente se encuentra en condición triturada, deberá ser fluido y contener menos del 0.75% de humedad con el fin de que aporte a las propiedades de la mezcla; no deberá contener partículas de metal visible y si las contiene debe ser en menor o igual a 0.01% en peso. Si va a ser utilizado como aglutinante en tipo de mezcla caliente su contenido no será mayor al 0.5% en peso y para usos en pulverización, este no será mayor a 0.1 en peso.

Para las mezclas se recomienda que las partículas de GCR no sean retenidas en el tamiz No. 8 (2.36 mm), sin embargo este parámetro también depende de las aplicaciones de la mezcla y sus especificaciones²²

En la siguiente tabla se mostraran las propiedades mínimas con las que debe cumplir la mezcla asfáltica modificada con GCR:

Tabla 1. Contenido de GCR en ensayos

Ensayo	Norma de Ensayo	Mínimo	Máximo
Asfalto original ya modificado con GCR			
Viscosidad a 163° C con viscosímetro rotacional, Pa-s	INV E-717-07	1.5	3.0
Penetración a 25° C, 1/10 mm	INV E-706-07	40	70
Punto de ablandamiento, ° C	INV E-712-07	52	-

Fuente: Especificación técnica. Sección 560-11. IDU²³

6.1.5. Daño por humedad. El daño por humedad es el efecto que produce el agua en las mezclas asfálticas, este se encuentra relacionado con el enlace por cohesión, que involucra la fuerza de cohesión del asfalto y con el enlace por adhesión que más bien tiene que ver con la fuerza de interacción entre el agregado y el asfalto, se puede presentar a través de diferentes síntomas, entre los que tenemos:

- Ahuellamiento
- Desprendimiento de agregados
- Fisuras
- Grietas

Estas características muestran una debilitación en la unión agregados – ligante asfáltico compuesta por la humedad que queda atrapada en el tiempo de la fabricación o en la que pudo penetrar desde la superficie, dando como resultado

México. 2006. p. 14. Disponible [En línea]: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/maxil_c_r/capitulo_2.html#

²² Pontifica Universidad Javeriana. Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder Colombia. 2015. p. 2. Disponible [En línea]: <http://www.asphaltrubberitalia.com/wp-content/uploads/2013/05/Standard-Specification-for-Asphalt-Rubber-Binder.pdf>.

²³ INSTITUTO DE DESARROLLO URBA.NO. Especificación Técnica: mezclas asfálticas en caliente densas, semidensas, gruesas y de alto módulo. Bogotá. Sección 510-11-IDU. p. 3. Disponible [En línea]: http://app.idu.gov.co/espec_tecnicas/Capitulo_5/510-11.pdf

un desplazamiento del ligante con los agregados por el proceso de emulsificación lo cuál se podría traducir en un ablandamiento²⁴.

En la siguiente tabla se mostraran los diferentes factores que ayudan a que se del daño por humedad:

Tabla 2. Factores que contribuyen al daño por humedad.

DISEÑO DE LA MEZCLA	<ul style="list-style-type: none"> - Química del asfalto y agregados - Contenido de asfalto - Vacíos con aire - Aditivos
PRODUCCIÓN	<ul style="list-style-type: none"> - Porcentaje de recubrimiento de agregados y calidad del material que pasa el tamiz 200 - Temperatura en planta - Exceso de humedad en los agregados - Presencia de arcilla
CONSTRUCCIÓN	<ul style="list-style-type: none"> - Compactación - Alta permeabilidad - Segregación de la mezcla - Cambios del diseño de la mezcla respecto al sitio de Colocación
CLIMA	<ul style="list-style-type: none"> - Áreas muy lluviosas - Ciclos de congelamiento y descongelamiento - Separación del vapor de agua
OTROS FACTORES	<ul style="list-style-type: none"> - Drenaje superficial - Drenaje sub superficial - Estrategias de rehabilitación-sellos de materiales marginales sobre las mezclas asfálticas en caliente - Paso de altas cargas vehiculares (tracto mulas)

Fuente. Análisis de la susceptibilidad al daño por humedad de una mezcla asfáltica para rodadura empleando asfaltos sumergidos

Tabla 3. Métodos para conocer el daño por humedad.

MÉTODO	ASTM/AASHTO/OTRA	IMPORTANCIA DE USO	TOLERANCIA DESIGNADA ASTM/AASHTO/OTRA
Ensayo de inmersión compresión	D1075, T165	Alta	50% (ASTM/AASHTO)
Ensayo de tracción indirecta	Ninguna	Varias versiones en uso	No
<ul style="list-style-type: none"> • Versión de Lottman • Versión de Tunnicliff/Root 	T283-85 (partes) T283-85 (partes) Esfuerzos ASTM completado en Junio de 1988	Medio Medio a Alto	21.4 – 26% 23%
Ensayo Marshall sumergido	No hay un estándar pero ASTM tiene un proyecto preparado	Muy bajo	Precisión o tolerancia localizada
<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación húmeda • Evaluación seca 			
Ensayo de módulo resiliente	Ninguno pero puede usarse ASTM D 4123	Bajo a Medio	No establecido
Método del golpe doble	Ninguno – bajo prueba en Arizona	Muy bajo	No documentado

Fuente. Análisis de la susceptibilidad al daño por humedad de una mezcla asfáltica para rodadura empleando asfaltos sumergidos²⁵

²⁴ CHEN, Xingwei y HUANG, Baoshan. Evaluation of moisture damage in hot mix asphalt using simple performance and superpave indirect tensile tests. Construction and Building Materials. 2008. Volumen 22. p. 1950-1962. Bogotá Disponible [En línea]. <<http://www.sciencedirect.com.ugc.elogim.com:2048/science/article/pii/S0950061807001882>>

²⁵ CUBILLOS, Estrella y GALEANO Camila. Análisis de la susceptibilidad al daño por humedad de una mezcla asfáltica para rodadura empleando asfaltos sumergidos. Pontificia Universidad

Teniendo en cuenta la información encontrada en los antecedentes de este proyecto se elige el ensayo de tracción indirecta (TSR) ya que se cuenta con los equipos necesarios y además es una forma por medio de la cual se podrá evaluar el parámetro de daño por humedad.

6.1.6. Método de tensión indirecta (TSR). El método de tensión indirecta esta estandarizado por las normas AASHTO T-283 y por las INVIAS con la norma I.N.V. E – 725 – 07. Se debe contar con seis especímenes, que deben ser compactados obteniendo el 6% y 8% de vacíos de aire en la mezcla. Estos se dividen en dos subgrupos cada uno de tres especímenes, en el primero grupo deberán estar sometidos a una condición seca y el segundo a una condición húmeda. Luego de esto se someten a una tensión indirecta, de esta se obtienen unos promedios de la fuerza que se realiza por unidad de área en cada subgrupo.

Con este procedimiento se busca determinar la efectividad del grano de caucho como ligante entre los materiales asfálticos y los pétreos, teniendo en cuenta el daño que se da en presencia de agua²⁶

Dependiendo del metodo de tracción indirecta que se utilicese da un valor minimo del indice, que se encuentra en la siguiente tabla:

Tabla 4. Porcentaje de éxito para cada método de ensayo.

MÉTODO DE ENSAYO	ÍNDICE MÍNIMO DE ENSAYO	% DE ÉXITO
Lottman (NCHRP 246)	TSR=70%	67
	TSR=80%	76
Tunnidiff-Root (NCHRP 274)	TSR=70%	60
	TSR=80%	67
	TSR=70-80%	67
Compresión Inmersión (ASTM D1075)	Radio de resistencia=75%	47
Ensayo de "hervido 10 minutos"	Recubrimiento retenido 85-90%	58
Ensayo de "tira" dinámica de Nevada	Pérdida de peso (no menor a 25%)	36

Fuente. Análisis de la susceptibilidad al daño por humedad de una mezcla asfáltica para rodadura empleando asfaltos sumergidos²⁷

Javeriana. Bogotá. p. 8 (2013). Disponible [En línea]: <http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/12685/1/NunezGaleanoCamilaEugenia2013.pdf>

²⁶ PLAZA, Sara y RINCON Ginna. Estudio de la susceptibilidad al daño por humedad de una mezcla asfáltica para rodadura utilizando asfalto 80-100 y su relación con el desempeño de campo. (2014). p. 37 Disponible [En línea]: <http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/12696/1/PlazaTorralvoSaraCatherine2014.pdf>

²⁷ CUBILLOS, Estrella y GALEANO Camila. Análisis de la susceptibilidad al daño por humedad de una mezcla asfáltica para rodadura empleando asfaltos sumergidos. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. (2013). p. 17 Disponible [En línea]: <http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/12685/1/NunezGaleanoCamilaEugenia2013.pdf>

Los agregados escogidos para el diseño de mezcla deben encontrarse entre uno de los tipos de granulometría; definidos por la siguiente tabla:

Tabla 5. Granulometrías definidas

Tamiz	Porcentajes pasa		
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
1"	100	100	
¾"	95- 100	95-100	100
1/2"	87 - 97	83-87	90-100
3/8"	70 - 80	65-70	83-87
No. 4	43 - 58	28-42	28-42
No. 8	30 - 45	14-22	14-22
No. 200	7 - 10	0-6.0	0-6.0

Fuente: Especificación técnica. Sección 560-11. IDU²⁸

Según la norma para conocer el daño por humedad, en el método de TSR se deben calcular los siguientes parámetros.

En los especímenes sometidos a condición húmeda, se debe hallar el porcentaje de saturación por medio de la siguiente formula:

$$\%s = \frac{V_{wa}}{V_v} \times 100$$

Donde %s es el porcentaje de saturación, V_{wa} es el volumen de agua absorbido y V_v es el volumen de vacíos del espécimen.

El volumen de vacíos del espécimen se da por la siguiente ecuación:

$$V_v = V \frac{\%V_v}{100}$$

Y el porcentaje de volumen de vacíos del espécimen está dado por la siguiente ecuación:

$$\%V_v = \left[1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right] \times 100$$

Donde G_{mb} es gravedad específica de Bulk del espécimen y G_{mm} es gravedad máxima teórica de la mezcla.

La resistencia a la tensión:

$$R_t = \frac{2000 P}{\pi tD} [kPa]$$

²⁸ INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Especificación Técnica: mezclas asfálticas en caliente densas, semidensas, gruesas y de alto módulo. Bogotá. Sección 510-11-IDU. p. 3. Disponible [En línea]: http://app.idu.gov.co/espec_tecnicas/Capitulo_5/510-11.pdf

Donde R_t es la resistencia a la tensión [kPa], P es la máxima carga [N], t es la altura del espécimen antes de la prueba [mm] y D es el diámetro del espécimen [mm].

La relación de resistencia:

$$RRT = \frac{R_{th}}{R_{ts}} \times 100$$

Donde RRT es la relación de la resistencia a la tensión[%], R_{th} es la resistencia promedio a la tensión del subgrupo acondicionado al agua [kPa] y R_{ts} es la resistencia promedio a la tensión del subgrupo seco [kPa]²⁹

²⁹ Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta. (I.N.V.E – 725 – 07). Bogotá. p. Disponible [En línea]: ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-725-07.pdf

6.2. MARCO NORMATIVO

NORMA	PROPOSITO	OBSERVACIÓN
I.N.V.E 725 – 07	Establece los procedimientos para preparar y probar especímenes de concreto asfáltico con el propósito de medir el efecto del agua sobre la resistencia a la tracción indirecta.	Según esta norma INVIAS se realizaran los procedimientos para determinar el daño por humedad en las diferentes muestras.
RESOLUCIÓN N° 6981	Se dictan lineamientos para el aprovechamiento de llantas y neumáticos fuera de uso en el Distrito Capital.	Cómo se realizara la reutilización de llantas o neumáticos fuera de servicio para la mezcla asfáltica, se tuvo en cuenta la resolución.
IDU 560 - 11	Incorporación del Grano de Caucho Reciclado (GCR) en las mezclas asfálticas como un agente modificador del asfalto.	Se debe seguir la especificación para el proceso de modificar la mezcla con GCR. También se deben tener en cuenta los parámetros sobre los materiales que se van usar.
IDU 510 - 11	Plantea diferencias en las granulometrías y el campo de aplicación de mezclas asfálticas en caliente densas, semidensas, gruesas y de alto modulo.	En el proceso de aceptación de los diferentes agregados se debe conocer los requerimientos técnicos, tanto de los agregados gruesos como de los finos.
IDU 200 - 11	Se refiere a las características de calidad que debe presentar el cemento asfáltico que se utilizara en la mezcla asfáltica en caliente.	Teniendo en cuenta las especificaciones del cemento, se realizara el ensayo para poder conocer la calidad del cemento conseguido para el proyecto.
I.N.V. E – 123 – 13	Describe el procedimiento del análisis granulométrico por tamizado para determinar cuantitativamente la distribución de tamaños de partículas de los agregados de la mezcla asfáltica	Se realiza la curva que nos determinara el tipo de agregados trabajados en la mezcla, además de definir el tipo de gradación que se utilizara en la mezcla que se va a realizar.
I.N.V. E – 222 – 13	Se describe el procedimiento a seguir para determinar la densidad	Se le realizará el ensayo de densidad a los agregados

	promedio de una cantidad de partículas de agregado fino.	finos, ya que esta afectara la mezcla asfáltica.
I.N.V. E – 223 – 13	Se describe el procedimiento a seguir para determinar la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado grueso.	Se le realizará el ensayo de densidad a los agregados gruesos, ya que esta afectara la mezcla asfáltica.
I.N.V. E - 717 - 13	Establece el procedimiento para medir la viscosidad del ligante a temperatura elevada, por medio del viscosímetro rotacional.	De acuerdo al procedimiento descrito en la norma conoceremos la viscosidad y sí se encuentra entre los rangos aceptables para la mezcla.
I.N.V. E – 706 – 13	Se determina la consistencia de los materiales bituminosos tanto solidos como semisólidos, el principal componente es el asfalto.	Teniendo este parámetro podremos confirmar el tipo de ligante que estamos utilizando y si es óptimo para la mezcla.
I.N.V. E – 733 – 13	Se determina la gravedad específica bulk y densidad de especímenes de mezclas asfálticas compactadas.	Es importante determinar la gravedad específica bulk, ya que esta determina el porcentaje de vacíos, parámetro esencial para el ensayo TSR.
I.N.V. E – 734 – 13	Este método se refiere a la determinación de la gravedad específica bulk y densidad de especímenes de mezclas asfálticas compactadas	Con el fin de corroborar y hallar algunas gravedades específicas y densidad de las mezclas asfálticas se utilizó el método parafinado.
I.N.V. E – 735 – 13	Describe el procedimiento para hallar la gravedad específica máxima teórica y densidad de mezclas asfálticas en caliente para, sin compactar	La gravedad específica máxima se determina de cada uno de las mezclas modificadas con el fin de obtener el parámetro de relación de vacíos, importante para la variable de estudio.
I.N.V. E – 736 – 13	Esta norma se refiere a la determinación del porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas densas y abiertas compactadas.	El porcentaje de vacíos es un parámetro que define el ensayo TSR parámetro de estudio por lo cual es importante tenerlo en nuestros cálculos

I.N.V. E – 712 – 13	Se establece el punto de ablandamiento de productos bituminosos por el método de anillo y bola en un rango de temperaturas determinadas.	Conociendo el parámetro se comparan el resultado del ligante, la mezcla entre ellos y el grano de caucho reciclado.
I.N.V. E – 748 – 13	Se determina la resistencia a la deformación plástica de una mezcla asfáltica para pavimento.	De acuerdo a las recomendaciones del procedimiento se realiza una prueba a la mezcla asfáltica (agregados y ligante).

7. METODOLOGÍA

7.1. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo debido a que se van a realizar ensayos, que permitirán determinar numéricamente la variación del daño por humedad que constituye la variable principal del estudio.

7.1.1. Variable Independiente: la variable independiente es el parámetro del porcentaje de grano de caucho que se va a utilizar como modificante del ligante, además del tipo de granulometría de los agregados con la que se va a realizar la mezcla según la especificación del IDU 560 – 11.

7.1.2. Variable dependiente: El daño por humedad que se puede dar en el pavimento depende de factores como el diseño de mezcla, el tipo de granulometría y el contenido de GCR; este parámetro es medido a través de la relación entre la resistencia a la tensión del subgrupo húmedo y la del subgrupo seco de muestras.

7.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Este tipo de investigación se basa en un modelo experimental utilizando el método científico, partiendo de un estudio previo sobre las mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho y el daño por humedad que se produce en los pavimentos, a partir de allí se realizarán pruebas y ensayos de laboratorio para determinar de manera experimental el daño por humedad de esta modificación a la mezcla asfáltica realizada con grano de caucho reciclado.

7.3. FASES DE INVESTIGACIÓN

7.3.1. Fase 1

Determinar la granulometría: Existen tres tipos de granulometría estandarizadas por la norma IDU 560-11, la cual se basa en los porcentajes que pasan de los agregados. Los agregados deberán cumplir las siguientes especificaciones:

Agregado grueso (Sección IDU 510 Numeral 2.2.1): Está retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), obtenido de grava natural y/o de la trituración de piedra de cantera. El material deberá estar limpio y sin exceso de partículas blandas, alargadas, planas o desintegrarles.

Si se deben realizar mezclas de dos agregados gruesos diferentes, estos deben cumplir los requisitos de la siguiente tabla:

Tabla 6. Requisitos del agregado grueso para mezclas asfálticas en caliente

Ensayo		Norma de Ensayo	Requisitos por Categoría de Tránsito		
			T0-T1	T2-T3	T4-T5
Petrografía					
Análisis petrográfico		ASTM C-295	Nota (1)		
Dureza					
Desgaste Los Ángeles	En seco, 500 revoluciones, % máximo	INV E-218-07	35	35	30
	- Capas de Base e Intermedias (excepto mezclas de Alto Módulo) - Mezclas de Alto Módulo - Capas de Rodadura		NA 30	NA 30	25 25
Micro Deval, % máximo	- Capas de Base e Intermedias (excepto mezclas de Alto Módulo) - Mezclas de Alto Módulo - Capas de Rodadura	INV E-238-07	30	30	25
			NA 25	NA 25	20 20
10% de finos	Valor en seco, kN mínimo	INV E-224-07	60	60	75
	- Capas de Base e Intermedias (excepto mezclas de Alto Módulo) - Mezclas de Alto Módulo - Capas de Rodadura		NA 75	NA 75	110 110
	Relación húmedo/seco, % mínimo		75	75	75
Durabilidad					
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, % máximo	Sulfato de Magnesio	INV E-220-07	18	18	18
Geometría de las Partículas					
Partículas Fracturadas Mecánicamente, % mínimo	- 1 cara	INV E-227-07	75	75	90
	- 2 caras		50	60	75
Índice de Aplanamiento, % máximo		INV E-230-07	25	25	20
Índice de Alargamiento, % máximo		INV E-230-07	25	25	20
Resistencia al Pulimento					
Coeficiente de Pulimento Acelerado para capas de rodadura, valor mínimo		INV E-232-07	0.40	0.45	0.50

(1) En este análisis se deben describir y clasificar los constituyentes de la muestra de agregado, y determinar sus cantidades relativas, identificar tipos y variedades de rocas, la presencia de minerales química y voluméticamente inestables o reactivos, grado de meteorización o alteración, nivel de porosidad y posible presencia de contaminantes en los agregados presentándolo en porcentajes. Se debe establecer un concepto sobre la forma de adherencia posible del asfalto con el agregado en relación a la acidez de los materiales y el tipo de asfalto a usar.

Fuente: Especificación técnica. Sección 510-11. IDU³⁰

Agregado fino (IDU 510.2.2.2): Comprende desde el tamiz 4.75 mm (No. 4) hasta 75 µm (No. 200), obtenido de la trituración de piedra de cantera o de grava natural, o fuentes naturales de arena (está no podrá exceder los límites de proporción dados en la siguiente tabla). Deberá estar limpio, ser duro y de superficie rugosa y angular.

Cómo se va a realizar una mezclas de 2 agregados finos diferentes, estos deben cumplir los requisitos de la siguiente tabla:

³⁰ INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Especificación Técnica: mezclas asfálticas en caliente densas, semidensas, gruesas y de alto módulo. Bogotá. IDU. Sección 510-11. p. 3. Disponible [En línea]: http://app.idu.gov.co/espec_tecnicas/Capitulo_5/510-11.pdf

Tabla 7. Requisitos del agregado fino para mezclas asfálticas en caliente

Ensayo	Norma de Ensayo	Requisitos por Categoría de Tránsito			
		T0-T1	T2-T3	T4-T5	
Petrografía					
Análisis petrográfico	ASTM C-295	Nota (1)			
Contenido de Arena Natural					
Proporción máxima de arena natural, en peso	- Capa de Rodadura	50	35	25	
	- Capa Intermedia	75	40	25	
	- Capa de Base	100	75	50	
Durabilidad					
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, % máximo	- Sulfato de Magnesio	INV E-220-07	18	18	18
Geometría de las Partículas					
Angularidad del Agregado Fino, % mínimo	- Capas de Base	AASHTO T-304	40	40	40
	- Capas Intermedias		40	40	45
	- Capas de Rodadura		45	45	45

(1) En este análisis se deben describir y clasificar los constituyentes de la muestra de agregado, y determinar sus cantidades relativas, identificar tipos y variedades de rocas, la presencia de minerales química y volumétricamente inestables o reactivos, grado de meteorización o alteración, nivel de porosidad y posible presencia de contaminantes en los agregados presentándolo en porcentajes. Se debe establecer un concepto sobre la forma de adherencia posible del asfalto con el agregado en relación a la acidez de los materiales y el tipo de asfalto a usar.

Fuente: Especificación técnica. Sección 510-11. IDU³¹

7.3.1.1. Ensayos realizados a los agregados

- Densidades

- Agregado fino (I.N.V. E – 222 – 13): sumergir una muestra del agregado en agua para llenar los poros aproximadamente 24 ± 4 horas. Se determina la masa de esta muestra con un secado superficial previo, luego se coloca parte de la muestra en un recipiente graduado y se determina el volumen. Por último, se determina la masa seca; con estas masas halladas se calcula la densidad.
- Agregado grueso (I.N.V. E – 223 – 13): sumergir una muestra del agregado en agua para llenar los poros aproximadamente 24 ± 4 horas. Se determina la masa de esta muestra con un secado superficial previo, luego se coloca parte de la muestra en un recipiente graduado y se determina el volumen. Por último, se determina la masa seca; con estas masas halladas se calcula la densidad.

³¹ INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Especificación Técnica: mezclas asfálticas en caliente densas, semidensas, gruesas y de alto módulo. Bogotá. Sección 510-11- IDU. p. 4. Disponible [En línea]: http://app.idu.gov.co/espec_tecnicas/Capitulo_5/510-11.pdf

7.3.1.2. Determinar el ligante asfáltico: En Colombia existen tres categorías, 40-50, 60-70 y 80-100, que relacionan sus especificaciones en la siguiente tabla:

Tabla 8. Especificaciones del cemento asfáltico

Característica	Unidad	Norma de ensayo	40-50		60-70		80-100	
			Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
Asfalto original								
Penetración	0.1 mm	INV E-706-07	40	50	60	70	80	100
Índice de penetración	-	-	-1.0	+1.0	-1.0	+1.0	-1.0	+1.0
Viscosidad a 60°C	Pa-s	ASTM D-4402	200	400	150	300	100	200
Viscosidad a 135°C	Pa-s	ASTM D-4402	0.27	0.65	0.22	0.45	0.15	0.40
Punto de ablandamiento	°C	INV E-712-07	49	59	45	55	42	52
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min)	cm	INV E-702-07	100	-	100	-	100	-
Solubilidad en tricloroetileno	%	INV E-713-07	99	-	99	--	99	-
Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland	°C	INV E-709-07	232	-	232	-	232	-

Fuente: Especificación técnica. Sección 200-11. IDU³²

Para el proyecto se utilizó el tipo de asfalto 80-100, basado en el tráfico T2 – T3 (tráfico mayor de 200 hasta 1999 vehículos pesados por día en el carril de diseño durante el primer año de servicio de las obras); a este se le realizaron los siguientes ensayos:

- Viscosidad rotacional (I.N.V. E - 717 - 13): Mide la viscosidad del asfalto cuando hay temperatura elevada, primero se coloca una muestra del asfalto en un recipiente; el torque aplica fuerza sobre un vástago cilíndrico sumergido que lo hace girar y mantiene constante la velocidad de rotación y la temperatura. Así se determina la resistencia a la rotación, dando a conocer la viscosidad del ligante en Pascal por segundo.
- Penetración (I.N.V. E – 706 – 13): Se mide la consistencia del ligante para ello se derritió una muestra hasta que tuvo una consistencia fluida con el fin de verterla en un recipiente, la temperatura máxima fue de 90° C y se enfrió de forma controlado. La muestra se colocó en un baño de agua, encima de esto un sistema con una aguja normalizada de un penetómetro, finalmente se suelta el mecanismo en un tiempo específico y se tomó la lectura de la distancia en decimas de milímetro. Se realizaron tres penetraciones por cada muestra.

³² INSITUTO DE DESARROLLO URBANO. Especificación Técnica: Cemento asfáltico. Bogotá. IDU Sección 200-11. p. 2. Disponible [En línea]: http://app.idu.gov.co/espec_tecnicas/Capitulo_2/200-11.pdf

- Punto de ablandamiento (I.N.V. E – 712 – 13): La medición del punto de ablandamiento se realizó entre las temperaturas de los dos discos con el ligante que se ablandaron lo suficiente para que las bolas de acero que se encontraban encima de ellos quedaran envueltas en el ligante con una distancia de caída de 25 mm (1”). La temperatura máxima en el ensayo era de 110° C y la muestra tuviera una consistencia fluida, además se calentó los anillos de latón; el ligante fue vertido entre los anillos y una placa base, se dejó enfriar a temperatura ambiente. Las bolas de acero fueron colocadas encima de los anillos del material. Las lecturas que se tomaron son las temperaturas del termómetro en el momento en que la bola queda cubierta con el ligante y tocó el fondo, es decir, la placa base.

7.3.1.3. Grano de caucho: El grano de caucho fue obtenido en una fábrica de trituración, se le realizó una revisión preliminar, puesto que debía ser uniforme, libre de metal, fibras textiles u otros contaminantes. Además de esto se secó para realizar una granulometría teniendo en cuenta que todo el material debe pasar por el tamiz No 30, es decir, debe ser menor a 0.60 mm. El grano de caucho se adiciono de acuerdo a la especificación del IDU 560 – 11, con el fin de evaluar un rango amplio del comportamiento del daño por humedad en las mezcla asfálticas, los porcentajes serán 2%, 5%,10%, 15% y 20%.

7.3.1.4. Ensayos de laboratorio de mezclas combinadas

A la mezcla entre el ligante y los agregados se le realizó el siguiente ensayo:

- Estabilidad y flujo empleando el equipo Marshall (I.N.V. E – 748 – 13): Se realizaron probetas cilíndricas de la mezcla asfáltica, fueron sometidas a curado en un baño u horno, luego sometidas a cargas en la prensa Marshall. Se determinó la estabilidad y la deformación. Se utilizó el método A, que emplea un marco de carga con un anillo y un dial que medirá la deformación (flujo) de las probetas. Se prepararon tres probetas por cada contenido de asfalto.

A la mezcla del ligante con el grano de caucho reciclado se le realizarán los siguientes ensayos:

- Viscosidad (I.N.V. E - 717 – 13): Se buscó medir la viscosidad de la mezcla asfáltica modificada con grano de caucho reciclado (GCR), primero se coloca una muestra del asfalto en un recipiente; el torque aplica fuerza sobre un vástago cilíndrico sumergido que lo hace girar y mantiene constante la velocidad de rotación y la temperatura. Así se determina la resistencia a la rotación, dando a conocer la viscosidad del ligante en Pascal por segundo.
- Penetración (I.N.V. E – 706 – 13): Se midió la consistencia de la mezcla asfáltica modificada con grano de caucho (GCR) para ello se derritió una muestra hasta que tuvo una consistencia fluida con el fin de verterla en un recipiente, la temperatura máxima fue de 90° C y se enfrió de forma controlado. La muestra se colocó en un baño de agua, encima de esto un sistema con una aguja

normalizada de un penetómetro, finalmente se suelta el mecanismo en un tiempo específico y se tomó la lectura de la distancia en decimas de milímetro. Se realizaron tres penetraciones por cada muestra.

- Punto de ablandamiento (I.N.V. E – 712 – 13): La medición del punto de ablandamiento se realizó entre las temperaturas de dos discos con las muestras de mezcla asfáltica modificada con grano de caucho (GCR) se ablandaron lo suficiente para que las bolas de acero que se encontraban encima de ellos quedaran envueltas en el ligante con una distancia de caída de 25 mm (1”). La temperatura máxima en el ensayo era de 110° C y la muestra tuviera una consistencia fluida, además se calentó los anillos de latón; el ligante fue vertido entre los anillos y una placa base, se dejó enfriar a temperatura ambiente. Las bolas de acero fueron colocadas encima de los anillos del material. Las lecturas que se tomaron son las temperaturas del termómetro en el momento en que la bola queda cubierta con el ligante y tocó el fondo, es decir, la placa base.

Los resultados de estos ensayos fueron comparados con la siguiente tabla, con el fin de verificar los parámetros:

Tabla 9. Especificación de asfaltos modificados con GCR

Ensayo	Norma de Ensayo	Mínimo	Máximo
Asfalto original ya modificado con GCR			
Viscosidad a 163° C con viscosímetro rotacional, Pa-s	INV E-717-07	1.5	3.0
Penetración a 25° C, 1/10 mm	INV E-706-07	40	70
Punto de ablandamiento, ° C	INV E-712-07	52	-

Fuente: Especificación técnica. Sección 60-11. IDU³³

7.3.2. Fase 2

Ensayo de tracción indirecta (I.N.V. E – 725 -13): Se prepararon un grupo de especímenes previamente compactados y con un contenido de vacíos con aire entre 6% y 8%; los especímenes con contenido de vacíos aproximadamente igual entre ellos. Se dividieron en dos subgrupos, el primer subgrupo se mantiene en condición seca; el otro fue saturado parcialmente. El subgrupo saturado parcialmente fue humedecido con agua destilada a temperatura ambiente, posteriormente se calculó el grado de saturación, el cual debe estar en un rango de 55-80%, se acondicionó en un baño de agua destilada a $60 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 24 horas, luego de esto se realizó un ajuste a la temperatura colocándolos a $25 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 1 hora. Se tomaron las alturas y volúmenes de los especímenes secos y húmedos. Para las muestras secas se ajustó la temperatura de estas por medio de un baño de agua a $25 \pm 1^\circ\text{C}$ durante

³³ INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Especificación Técnica: mezclas asfálticas en caliente densas, semidensas, gruesas y de alto módulo. Bogotá. IDU Sección 560-11. p. 3. Disponible [En línea]: http://app.idu.gov.co/espec_tecnicas/Capitulo_5/560-11.pdf

20 minutos. Finalmente se colocó cada espécimen en el aparato de carga, se aplicó una carga diametral con una tasa de deformación 50mm/min hasta llegar a la carga máxima y se registró; se desmontó la muestra y se estimó visualmente el daño que causó la humedad, inspeccionando todas las superficies.

Se elaboró otra mezcla asfáltica, en este caso una convencional (sin adición de grano de caucho) y también se realizó el ensayo de tracción indirecta (TSR), de acuerdo a la norma I.N.V. E – 725 – 07, comparando las mezclas elaboradas con grano de caucho reciclado y la convencional para encontrar la variación del daño por humedad y conocer si se dio una optimización del parámetro del daño por humedad.

8. RESULTADOS

8.1. FASE I

8.1.1. Agregados gruesos

El agregado grueso se compone de triturado de $\frac{3}{4}$ " proveniente de la cantera Loma pelada (Mosquera). El tamaño máximo es de $\frac{3}{4}$ " y tamaño máximo nominal $\frac{3}{4}$ ". El triturado de $\frac{1}{2}$ " proviene de la cantera de Loma Pelada (Mosquera). El tamaño máximo es $\frac{3}{4}$ " y tamaño máximo nominal $\frac{1}{2}$ ".

8.1.1.1. Granulometría

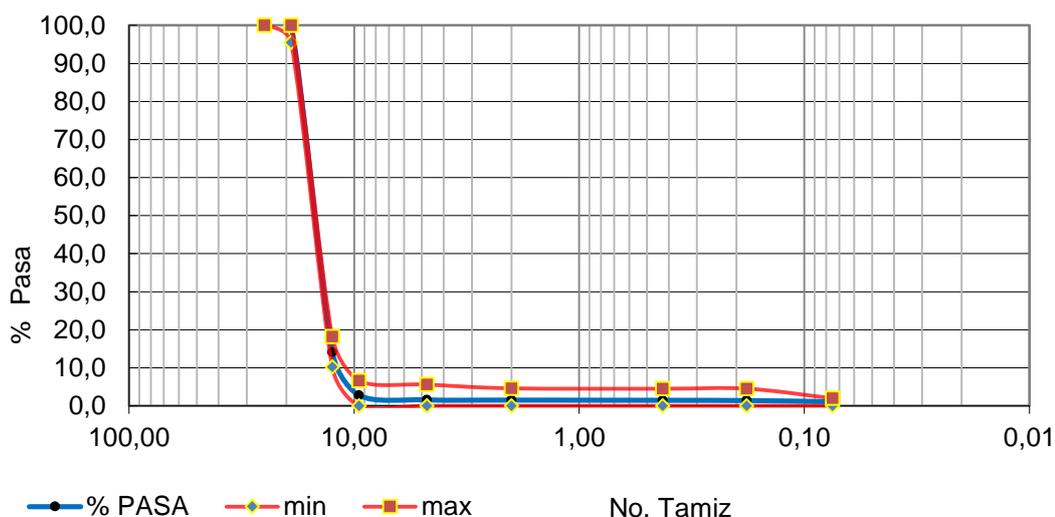
- Grava triturada de $\frac{3}{4}$ "

Tabla 10. Granulometría grava triturada $\frac{3}{4}$ "

TAMIZ	TAMIZ M.M.	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% PASA	TM $\frac{3}{4}$ "	
					MIN	MAX
1 1/2"	37,5	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0
1"	25,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	0,0	0,0	100,0	95,5	100,0
1/2"	12,5	3145,4	85,9	14,1	10,2	18,2
3/8"	9,5	417,4	11,4	2,7	0,0	6,6
#4	4,75	42,9	1,2	1,6	0,0	5,6
#10	2,00	2,3	0,1	1,5	0,0	4,6
#40	0,43	1,9	0,1	1,5	0,0	4,5
#80	0,18	2,5	0,1	1,4	0,0	4,5
#200	0,075	11,2	0,3	1,1	0,0	2,0
Fondo		3,7	1,1			
Total		3627,3	100,0			

Fuente: UAERMV -Unidad administrativa especial de rehabilitación y mantenimiento vial

Gráfica 1 Granulometría Grava $\frac{3}{4}$ "



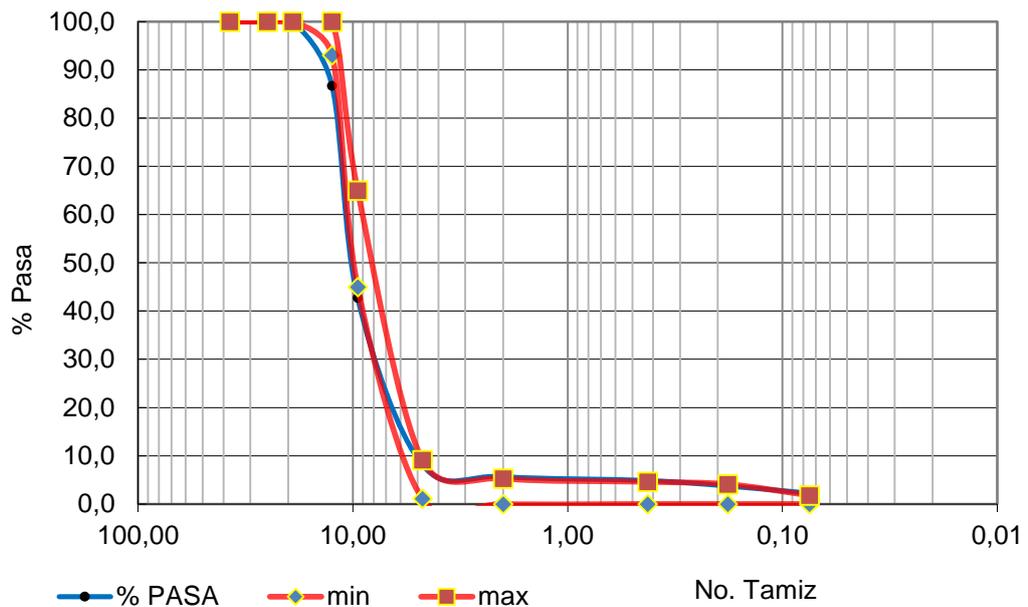
Fuente: UAERMV

- Grava triturada de 1/2"

Tabla 11. Granulometría grava triturada 1/2"

TAMIZ	TAMIZ	PESO	%	%	TM 1/2"	
	M.M.	RETENIDO	RETENIDO	PASA	MIN	MAX
1 1/2"	37,5	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0
1"	25,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,5	448,9	13,3	86,7	93,0	100,0
3/8"	9,5	1482,7	44,0	42,7	45,0	65,0
#4	4,75	1165,2	34,6	8,1	1,1	9,1
#10	2,00	83,4	2,5	5,7	0,0	5,3
#40	0,43	27,1	0,8	4,9	0,0	4,6
#80	0,18	38,2	1,1	3,7	0,0	4,1
#200	0,075	50,5	1,5	2,2	0,0	1,8
Fondo		5,9	2,2			
Total		3301,9	100,0			

Fuente: UAERMV



Gráfica 2 Granulometría Grava 1/2"

Fuente: Unidad administrativa especial de rehabilitación y mantenimiento vial

8.1.1.2. Pesos específicos (norma INV E 222 y 223)

COMBINACION AGREGADO GRUESOS

Peso Específico bulk

$$2.242 \frac{g}{cm^3}$$

8.1.2. Agregados finos

Los finos están compuestos por arena triturada gris proveniente de Sumapáz, con contenido de materiales finos, como se refleja en la curva granulométrica, arrojando un valor de pasa malla # 200 de 4.8 %. La arena triturada color amarilla proviene de la cantera Loma Pelada, con contenido de materiales finos, como se refleja en la curva granulométrica, arrojando un valor de pasa malla # 200 de 15.2 %.

8.1.2.1. Granulometría

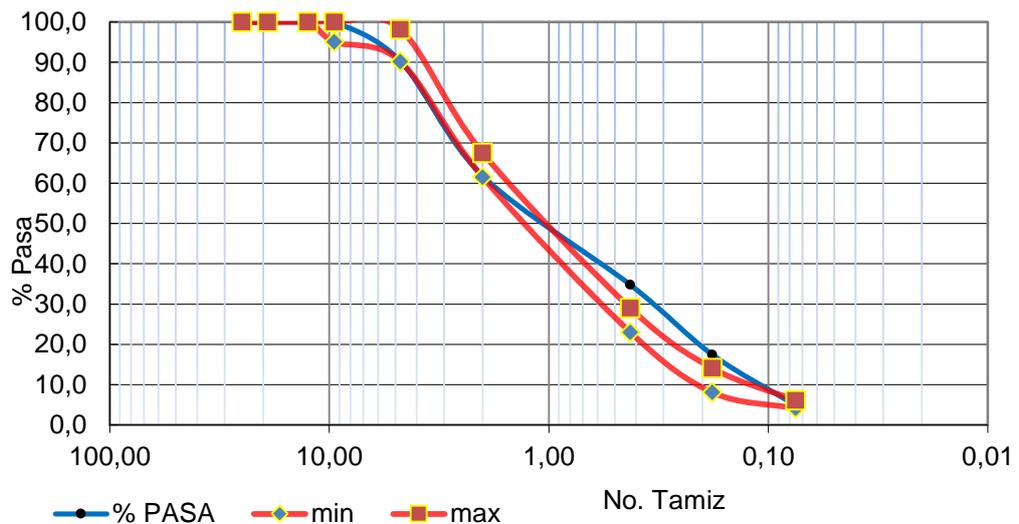
- Arena triturada gris de Sumapaz

Tabla 12. Granulometría arena triturada gris de Sumapaz

TAMIZ	TAMIZ	PESO	%	%	TABLA U.M.V.	
	M.M.	RETENIDO	RETENIDO	PASA	MIN	MAX
1"	25,0	0,0	0,0	100,0	100	100
3/4"	19,1	0,0	0,0	100,0	100	100
1/2"	12,5	0,0	0,0	100,0	100	100
3/8"	9,5	0,0	0,0	100,0	95,1	100
#4	4,75	271,5	9,7	90,3	90,2	98,2
#10	2,00	799,2	28,5	61,8	61,5	67,5
#40	0,43	757,3	27,0	34,8	23,0	29,0
#80	0,18	484,8	17,3	17,5	8,1	14,1
#200	0,075	353,9	12,6	4,8	4,1	6,1
Fondo		18,6	4,8			
Total		2685,3	100,0			

Fuente: UAERMV - Unidad administrativa especial de rehabilitación y mantenimiento vial

Gráfica 3 Granulometría arena triturada gris de Sumapaz



Fuente: UAERMV

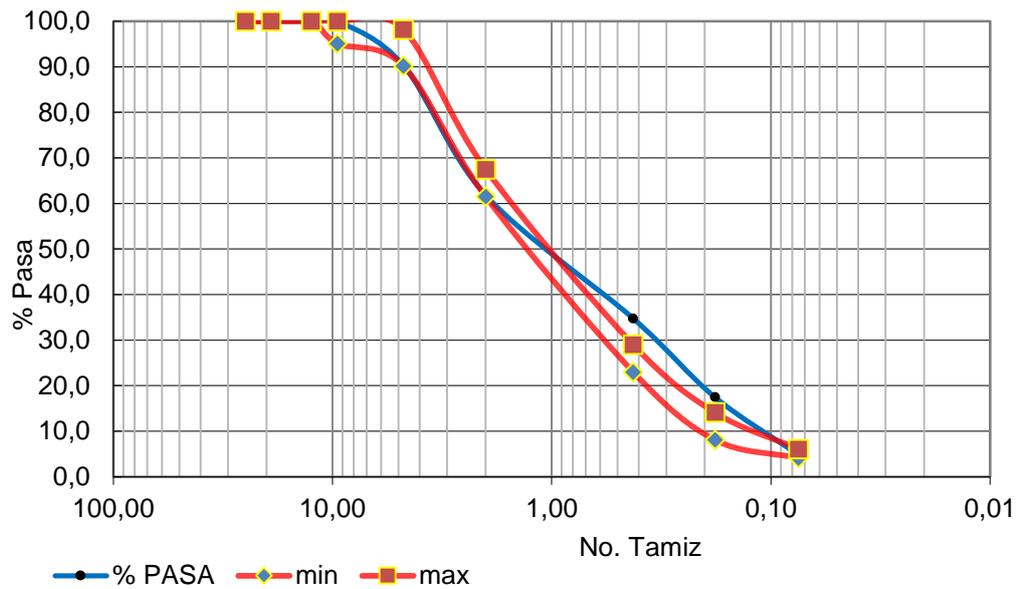
- Arena triturada color amarilla

Tabla 13. Granulometría arena triturada color amarilla

	TAMIZ	PESO	%	%	TABLA U.M.V.	
TAMIZ	M.M.	RETENIDO	RETENIDO	PASA	MIN	MAX
3/4"	19,1	0,0	0,0	100,0	100	100
1/2"	12,5	0,0	0,0	100,0	100	100
3/8"	9,5	0,0	0,0	100,0	97	100
#4	4,75	662,6	27,4	72,6	73,0	81
#10	2,00	569,5	23,5	49,1	53,0	59,0
#40	0,43	364,0	15,0	34,1	37,4	43,4
#80	0,18	190,3	7,9	26,2	21,8	27,8
#200	0,075	267,0	11,0	15,2	12,3	14,3
Fondo		10,8	14,8			
Total		2064,2	99,7			

Fuente: UAERMV

Gráfica 4 Granulometría arena triturada color amarilla



Fuente: UAERMV

8.1.2.2. Pesos específicos (Norma INV E 222 Y 223)

COMBINACION AGREGADOS FINOS

Peso Específico Bulk

$$2.561 \frac{g}{cm^3}$$

8.1.3. Agregados combinados

Tabla 14. Ensayos de agregados combinados

ENSAYO	PORCENTAJE	ESPECIFICACIÓN IDU	
		Mínimo	Máximo
Equivalente de arena	47,0%	40%	--
Desgaste máquina de los ángeles triturado ¾" y ½":	28,5%	--	30%
Desgaste micro de val para agregado de ¾" y ½"	24,7%	--	25%
Índice de aplanamiento de agregado grueso	19,0%	--	25%
Índice de alargamiento de agregado grueso	10,0%	--	25%
Caras fracturadas	100,0%	60%	--
Angularidad del agregado fino	48,9%	45%	--

Fuente: Propia

Los ensayos realizados a los agregados combinados se encuentran dentro de los rangos encontrados en la especificación IDU por lo cual cumplen los parámetros de caracterización del diseño de mezcla y se continúa con la modificación de la misma

8.1.4. Ligante asfáltico

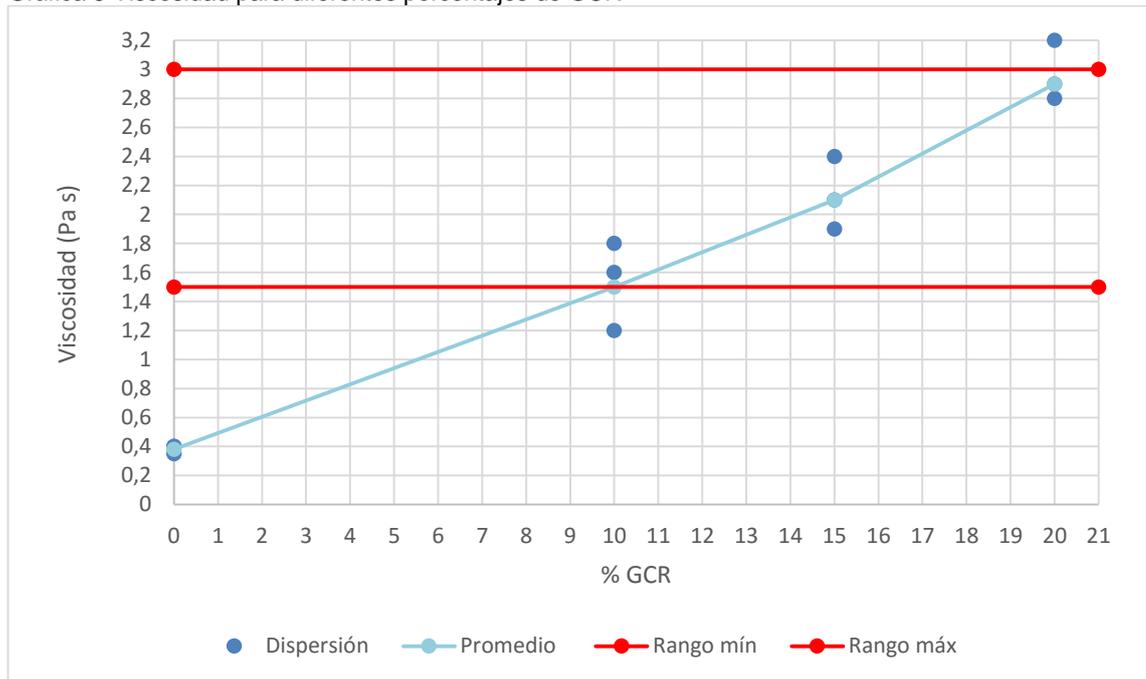
8.1.4.1. Viscosidad rotacional

Tabla 15 Viscosidad para diferentes porcentajes de GCR

Porcentaje GCR	Muestra	Temperatura °C	Viscosidad por ensayo (Cp)	Viscosidad por ensayo (Pa s)	Promedio de viscosidad por porcentaje de GCR (Pa s)
0	0-1	135	350	0,35	0,38
	0-2	135	400	0,40	
	0-3	135	400	0,40	
10	10-1	163	1150	1,2	1,5
	10-2	163	1550	1,6	
	10-3	163	1820	1,8	
15	15-1	163	2120	2,1	2,1
	15-2	163	1852	1,9	
	15-3	163	2430	2,4	
20	20-1	163	2850	2,9	2,9
	20-2	163	3210	3,2	
	20-3	163	2760	2,8	

Fuente: Propia

Gráfica 5 Viscosidad para diferentes porcentajes de GCR



Fuente: Propia

La viscosidad rotacional para el ligante asfáltico sin modificar cumple la especificación IDU- 200-11 ya que su valor máximo es 0,40 Pa s y los resultados se encuentran dentro del rango

La viscosidad de las muestras modificadas con GCR a 163° se ve aumentada a medida que el porcentaje de GCR se incrementa ya que la mezcla se vuelve más flexible a bajas temperaturas y menos plástica a temperaturas elevadas, además cabe resaltar que los resultados cumplen la especificación IDU-560-11 en la cual el valor mínimo es 1,5 Pa s y el máximo 3,0 Pa s

Figura 2 Viscosidad Brookfield 10% GCR a 163 °C



Fuente: Propia

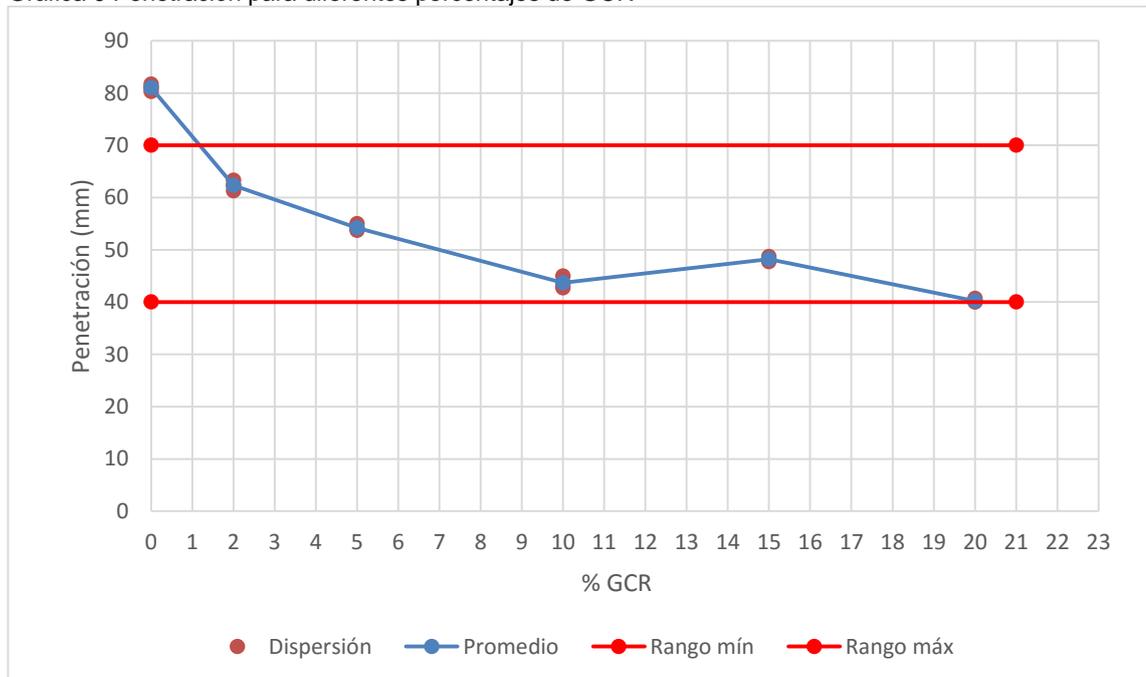
8.1.4.2. Penetración

Tabla 16 Penetración para diferentes porcentajes de GCR

Porcentaje GCR	Muestra	Penetración (mm)			Promedio por ensayo (mm)	Promedio % GCR
		1	2	3		
0	0-1	81	82	82	81,7	81,0
	0-2	80	81	82	81,0	
	0-3	80	80	81	80,3	
2	2-1	62	63	65	63,3	62,3
	2-2	60	62	65	62,3	
	2-3	63	60	61	61,3	
5	5-1	55	50	56	53,7	54,2
	5-2	55	54	56	55,0	
	5-3	58	50	54	54,0	
10	10-1	42	45	43	43,3	43,7
	10-2	50	43	42	45,0	
	10-3	42	43	43	42,7	
15	15-1	47	46	52	48,3	48,2
	15-2	50	52	44	48,7	
	15-3	49	44	50	47,7	
20	20-1	43	39	40	40,7	40,2
	20-2	40	40	40	40,0	
	20-3	39	40	41	40,0	

Fuente: Propia

Gráfica 6 Penetración para diferentes porcentajes de GCR



Fuente: Propia

En las muestras de asfalto sin modificar o con 0% de GCR la penetración fue de 81 mm valor que se encuentra dentro del rango establecido para el parámetro de penetración en asfaltos de tipo 80-100.

En muestras modificadas con diferentes porcentajes de asfalto se ve reflejada la disminución de la penetración a lo largo de la alteración con mayores porcentajes de GCR, es decir el ligante se endurece a medida que el contenido de GCR aumenta hasta el 15% de modificación, sin embargo la mezcla con contenido de 20% de GCR tiene una caída en el valor de la penetración acercándose al límite mínimo de lo permitido para mezclas modificadas con grano de caucho reciclado que es 40 mm.

Figura 3 Penetración para ligante modificado con 2% GCR



Fuente: Propia

8.1.4.3. Punto de ablandamiento

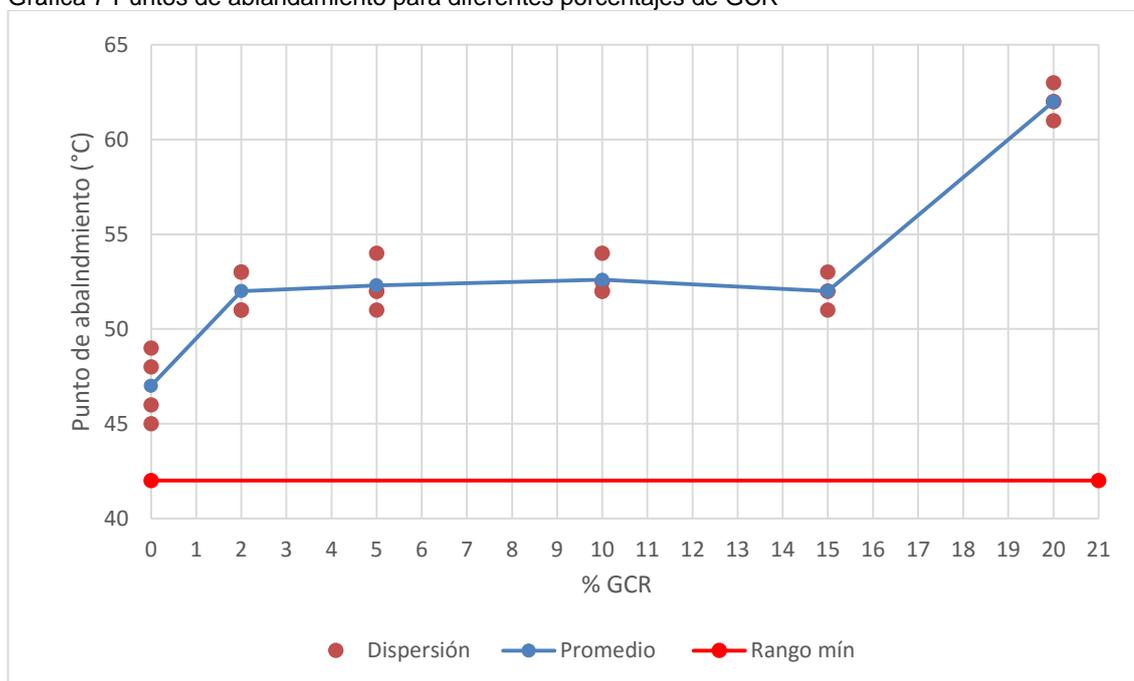
Tabla 17. Puntos de ablandamiento para diferentes porcentajes de GCR

Porcentaje GCR	Muestra	Resultados (°C)	Promedio por ensayo (°C)	Promedio por rango (°C)
0	1-A	46,0	47,0	47,0
	1-B	48,0		
	2-A	45,0	47,0	
	2-B	49,0		
2	1-A	51,0	52,0	52,0
	1-B	53,0		
	2-A	51,0	52,0	
	2-B	53,0		

Porcentaje GCR	Muestra	Resultados (°C)	Promedio por ensayo (°C)	Promedio por rango (°C)
5	1-A	52,0	52,0	52,3
	1-B	52,0		
	2-A	51,0	52,5	
	2-B	54,0		
10	1-A	52,0	53,0	52,6
	1-B	54,0		
	2-A	52,0	52,25	
	2-B	52,5		
15	1-A	51,0	52,0	52,0
	1-B	53,0		
	2-A	52,0	52,0	
	2-B	52,0		
20	1-A	61,0	61,5	62,0
	1-B	62,0		
	2-A	62,0	62,5	
	2-B	63,0		

Fuente: Propia

Gráfica 7 Puntos de ablandamiento para diferentes porcentajes de GCR



Fuente: Propia

Para las muestras de asfalto sin modificar se encontró que el punto de ablandamiento es 47°C valor que se encuentra entre 42 y 52 °C, rango establecido por la IDU-200-11 por lo cual se puede decir que cumple la especificación, a su vez los puntos de ablandamiento del ligante asfáltico

modificado con diferentes porcentajes de GCR cumplen la especificación IDU-560-11 donde se establece que este debe ser mayor de 52°C.

Además se puede evidenciar que el mayor punto de ablandamiento lo obtuvo el asfalto modificado con 20% de GCR ya que al realizar esta modificación al ligante se vuelve más resistente a los cambios de temperatura por lo cual los puntos de ablandamiento a mayor contenido de GCR aumentan.

Figura 4 Punto de ablandamiento 2%, 10% y 20%



Fuente: Propia

8.1.5. Diseño de mezcla

Los porcentajes que se tomaron para el diseño de mezcla aparecen en el cuadro de dosificación en las siguientes proporciones.

Tabla 18. Dosificación de materiales para mezcla asfáltica

Nombre	Abreviación	Porcentaje (%)
Triturado de 3/4" (Cantera Loma Pelada – Mosquera)	M1	5
Triturado de 1/2" (Cantera Loma Pelada)	M2	35
Arena triturada gris Sumapaz	M3	55
Arena triturada amarilla (Cantera Loma Pelada)	M4	5
Asfalto optimo		5.9

Fuente: Propia

8.1.5.1. Granulometría

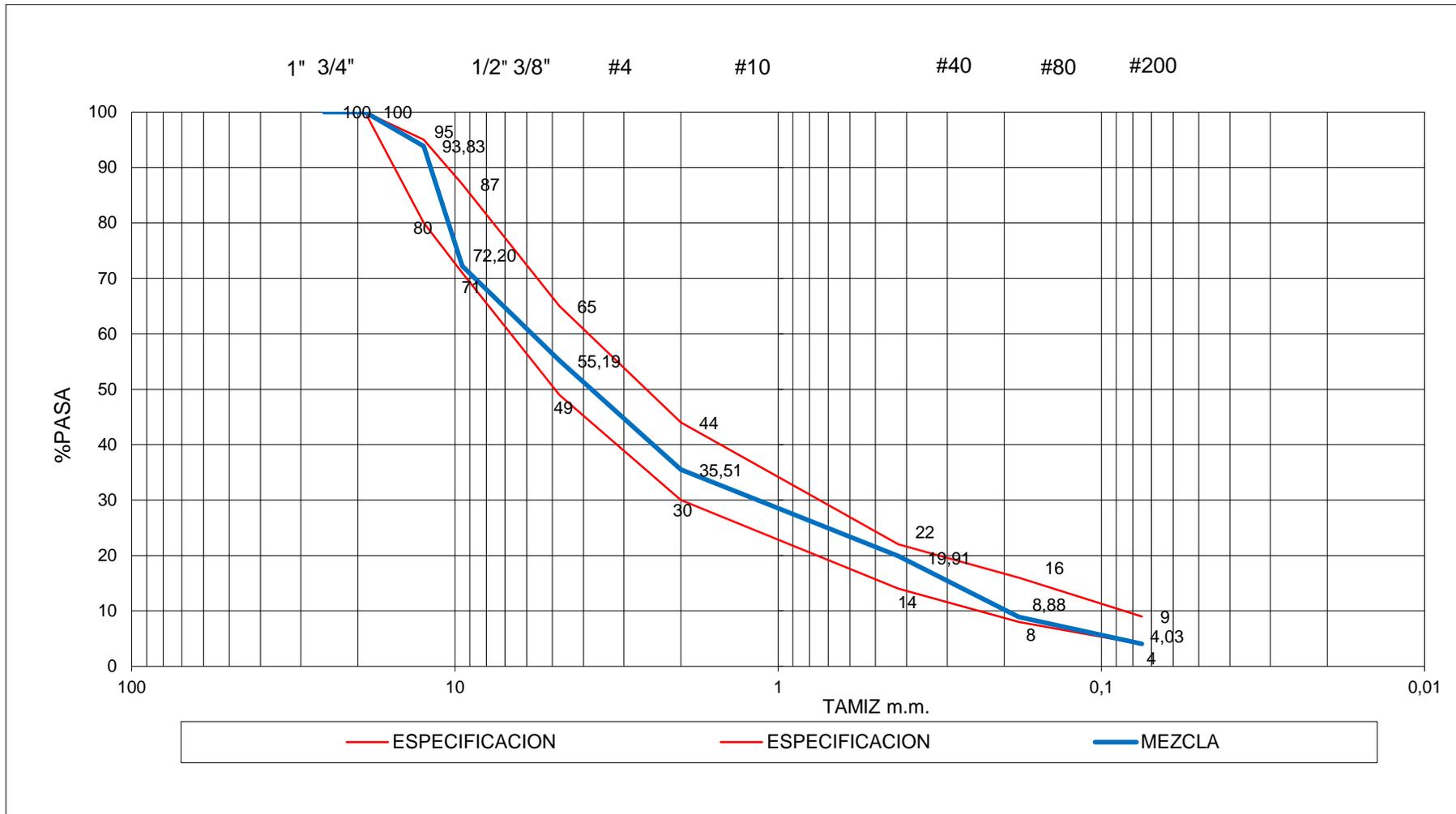
Tabla 19. Granulometría y de Diseño de mezcla

Porcentaje	5,0%	35%	55%	5%	100%	Especificación IDU-2011, SECCION 510			Formula de Trabajo			IDU 510,4	
	TAMIZ	M1	M2	M3	M4	TOTAL	L. Superior	L. Inferior	Formula de Trabajo	Tolerancia		F. Trabajo	Especificación
	mm.	% Pasa				MEZCLA COMBINADA				L. Superior	L. Inferior	Cumple	Cumple
1"	25,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,00	100	100	100,0	100,0	100,0	SI	SI
3/4"	19,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,00	100	100	100,0	100,0	96,0	SI	SI
1/2"	12,5	40,6	91,0	100,0	99,3	93,83	95	80	93,8	97,8	89,8	SI	SI
3/8"	9,5	5,9	34,6	99,9	97,3	72,20	87	71	72,2	76,2	68,2	SI	SI
No 4	4,76	0,9	5,1	90,9	67,5	55,19	65	49	55,2	59,2	51,2	SI	SI
No 10	2	0,5	3,7	58,5	39,5	35,51	44	30	35,5	38,5	32,5	SI	SI
No 40	0,425	0,5	1,7	32,4	28,9	19,91	22	14	19,9	22,9	16,9	SI	SI
No 80	0,18	0,4	1,7	13,3	19,2	8,88	16	8	8,9	11,9	5,9	SI	SI
No 200	0,075	0,2	1,4	6,3	1,0	4,03	9	4	4,0	5,0	3,0	SI	SI

Fuente: Propia

En la anterior tabla podemos evidenciar los porcentajes que pasan para cada uno de los agregados pétreos, obteniendo los porcentajes finales utilizados en el diseño de mezcla, estos además cumplen con los niveles de tolerancia establecidos en la especificación IDU-510- 2011.

Gráfica 8 Granulometría Diseño de mezcla



Fuente: Propia

8.1.5.2. Estabilidad y flujo:

El valor de estabilidad para las muestras no modificadas arrojó un valor de 1684.3 kg, el cual cumple la especificación IDU-ET-05 para tráfico 2-3 que sugiere un valor mínimo de 750 kg y con la especificación INVIAS-13 para tráfico 2 en la cual el valor mínimo de este parámetro es de 765 kg, el parámetro de flujo obtenido del ensayo Marshall fue de 3.3 mm que se encuentra dentro del rango de las especificaciones anteriormente mencionadas en las cuales el rango se encuentra entre 2 y 4.

Figura 5 Ensayo Marshall Briquetas 0% GCR



Fuente: Propia

La relación estabilidad fue de 545.6 mm que se encuentra dentro del rango de la especificación IDU-ET-05 para tráfico 2-3 y la especificación INVIAS-13 para tráfico 2 las cuales sugieren que esta se debe encontrar entre 300 a 600 mm.

Tabla 20. Estabilidad y flujo de muestras no modificadas

ESTABILIDAD Y FLUJO MUESTRAS NO MODIFICADAS												
M	Altura (mm)			Prom altura (cm)	Diámetro (cm)	Volumen (cm ³)	Factor de corrección	Carga (lb)	Deformación (pulg)	Estabilidad (Kg)	Flujo (mm)	Estabilidad/Flujo
1	61,3	62,2	62,7	6,21	10,16	503,19	1,04	4588	0,135	2164,3	3,4	631,2
2	62	59,6	63,3	6,16	10,14	497,72	1,04	3581	0,092	1689,3	2,3	722,9
3	75	73,7	76	7,49	10,14	604,25	0,78	3390	0,167	1199,4	4,2	282,8
PROMEDIO										1684,3	3,3	545,6

Fuente: Propia

En las siguientes imágenes podemos observar las primeras briquetas elaboradas para realizar el ensayo de estabilidad y flujo en juegos de tres, donde se identifica que existe una variación en las alturas por lo cual se utiliza un factor de corrección.

Figura 6 Estabilidad y flujo 2% GCR



Fuente: Propia

Figura 7 Estabilidad y flujo 5% GCR



Fuente propia

Figura 8 Estabilidad y flujo 10% GCR



Fuente: Propia

Figura 9 Estabilidad y flujo 15% GCR



Fuente: Propia

Figura 10 Estabilidad y flujo 20% GCR



Fuente: Propia

8.2. FASE II

8.2.1. Mezcla modificada

Las mezclas asfálticas fueron modificadas con 2%, 5%, 10%, 15% y 20% de GCR, con el fin de evaluar su comportamiento frente a los ensayos.

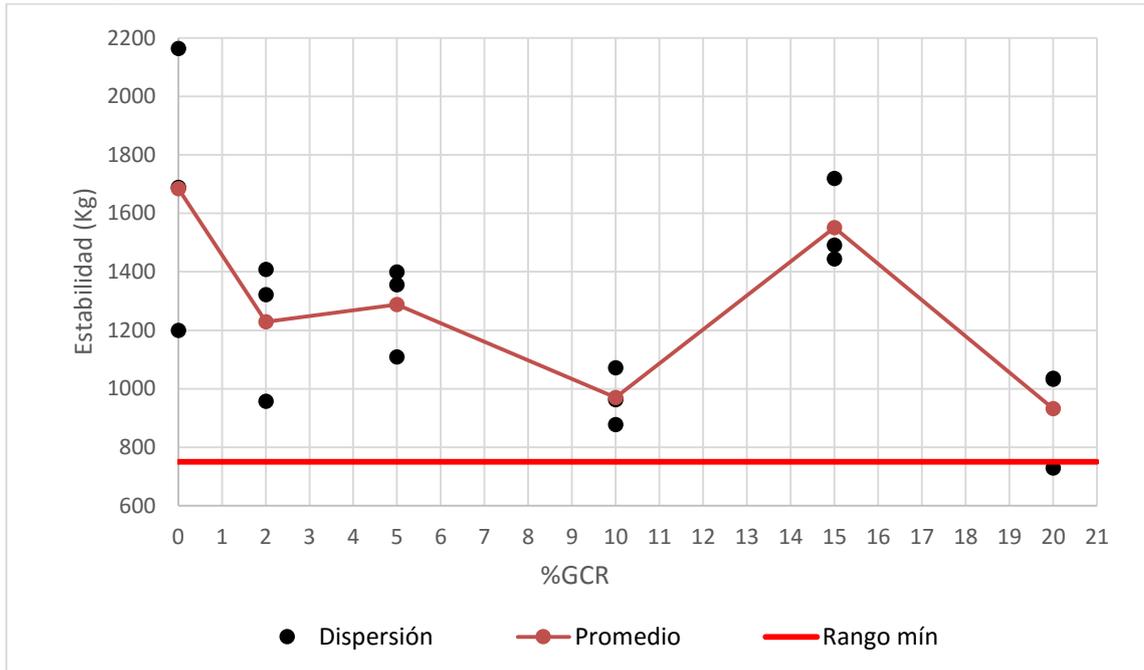
8.2.1.1. Estabilidad y flujo mezcla modificada. En la siguiente tabla podemos identificar la carga máxima que soporto cada una de las briquetas ensayadas en kg y la deformación máxima en mm, además se encuentra relacionado el factor de corrección aplicado por la varacion de volumen y los promedios de los parámetro para cada porcentaje de GCR.

Tabla 21 Estabilidad y flujo de muestras modificadas con % GCR

% GCR	Muestra	Peso (g)	Altura (mm)			Prom altura (cm)	Diámetro (cm)	Volumen (cm3)	Factor de corrección	Carga (KN)	Deformación (mm)	Estabilidad (Kg)	Flujo (mm)	Promedio Estabilidad (Kg)	Promedio Flujo (mm)	Estabilidad / Flujo	Promedio Estabilidad / Flujo
2	2-1	1110,9	65,7	66,4	67,3	6,65	10,17	539,93	0,93	12,96	3,604	1.321,53	3,604			395,16	
	2-2	1092,4	69,4	69	68	6,88	10,05	545,77	0,93	9,39	2,698	957,50	2,698	1229,08	2,947	295,82	320,22
	2-3	1100,2	65,1	66,7	66,3	6,60	10,10	529,05	0,96	13,81	2,539	1.408,21	2,539			269,69	
5	5-1	1098	66,4	67,5	68	6,73	10,19	548,85	0,89	13,72	4,12	1.399,03	4,12			472,04	
	5-2	1099,9	67,8	68	69	6,83	10,14	551,28	0,89	13,3	3,207	1.356,20	3,207	1287,88	3,465	367,44	401,04
	5-3	1089,8	69,5	70,4	70,63	7,02	10,10	562,24	0,86	10,87	3,067	1.108,41	3,067			363,65	
10	10-1	1096,9	68,1	69	70	6,90	10,16	559,68	0,86	9,44	3,731	962,60	3,731			442,38	
	10-2	1096,6	68,5	67,6	69	6,84	10,12	549,91	0,89	10,51	4,232	1.071,70	4,232	970,41	3,593	484,87	416,63
	10-3	1092,3	69	69,5	69,4	6,93	10,10	555,22	0,89	8,6	2,816	876,94	2,816			322,64	
15	15-1	1091,7	68,3	69	68,9	6,87	10,19	560,54	0,86	14,16	4,716	1.443,90	4,716			559,18	
	15-2	1092,6	68,5	68,4	68,2	6,84	10,13	551,00	0,89	16,86	3,986	1.719,21	3,986	1551,30	4,308	456,69	499,86
	15-3	1099,2	69,5	68,9	68,7	6,90	10,12	555,28	0,89	14,62	4,222	1.490,80	4,222			483,73	
20	20-1	1085,9	70,4	70,6	70,4	7,05	10,12	566,81	0,86	7,15	4,431	729,09	4,431			525,38	
	20-2	1088,9	69,3	69,5	68	6,89	10,16	558,86	0,89	10,16	4,674	1.036,02	4,674	932,35	4,275	535,51	500,70
	20-3	1081,6	68,5	70	70	6,95	10,14	561,24	0,86	10,12	3,721	1.031,94	3,721			441,20	

Fuente: Propia

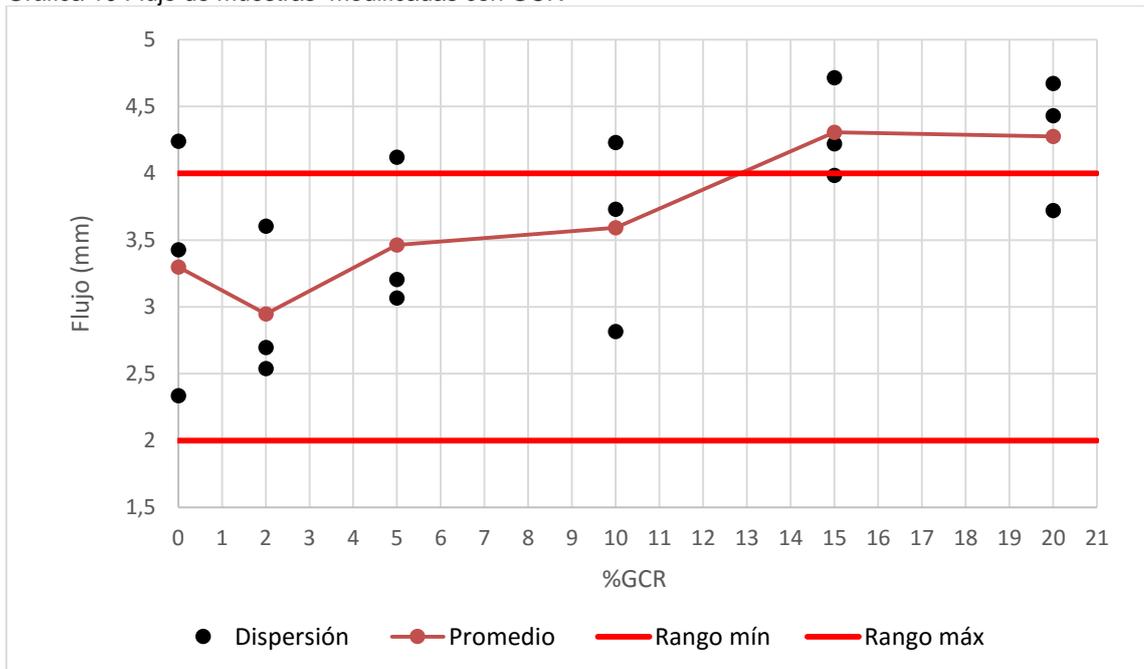
Gráfica 9 Estabilidad de muestras modificadas con GCR



Fuente: Propia

La estabilidad promedio de las muestras modificadas con diferentes porcentajes de grano de caucho reciclado fue mayor para el 15 % de GCR arrojando un valor promedio de 1551,30 Kg y su valor más bajo para la modificación con 20% de caucho arrojando un valor de 932,35 kg, sin embargo todos los promedios de las variaciones realizadas con grano de caucho reciclado cumplen con la especificación IDU-ET-05 para tráfico 2-3 y la especificación INVIAS-13 para tráfico 2 que dicen que la estabilidad debe ser superior a 750Kg y 765Kg.

Gráfica 10 Flujo de muestras modificadas con GCR

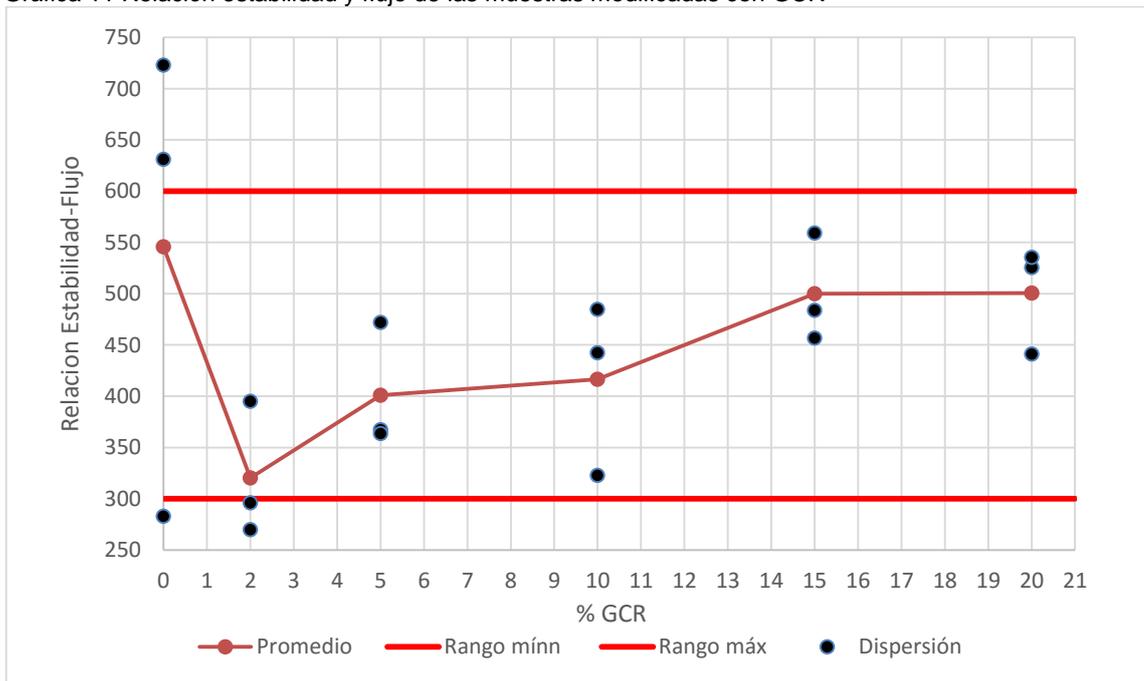


Fuente: Propia

En la gráfica 10 podemos evidenciar que existe la tendencia de que a mayor porcentaje de modificación con GCR el flujo medido en mm aumenta, obteniendo como promedio más alto las mezclas asfálticas modificadas con el de 15% de GCR arrojando un valor de 4,308 mm.

Cabe resaltar además que las mezclas asfálticas modificadas con 15 y 20% de GCR no cumplen con la especificación IDU-ET-05 para tráfico 2-3 y la especificación INVIAS-13 para tráfico 2 en la cual está plasmado que el flujo se debe encontrar entre 2 mm y 4 mm.

Gráfica 11 Relación estabilidad y flujo de las muestras modificadas con GCR



Fuente: Propia

En la gráfica 11 podemos evidenciar que la mayor relación estabilidad-flujo fue aportada por la modificación del 20% de GCR, cumpliendo con la especificación IDU-ET-05 para tráfico 2-3 y la especificación INVIAS-13 para tráfico 2 en la cual se recomienda que esté entre 300 y 600 Kg/mm, ya que cuando los valores de la rigidez son demasiado altos significa que son mezclas demasiado frágiles para un pavimento y las de valores muy bajos se consideran plásticas y altamente deformables.

8.2.1.2. Ensayo TSR

En la tabla 22 podemos verificar los valores arrojados para la gravedad específica bulk y gravedad específica máxima de cada briqueta, ya que estas determinan el comportamiento del porcentaje de vacíos, parámetro importante para la realización del ensayo TSR.

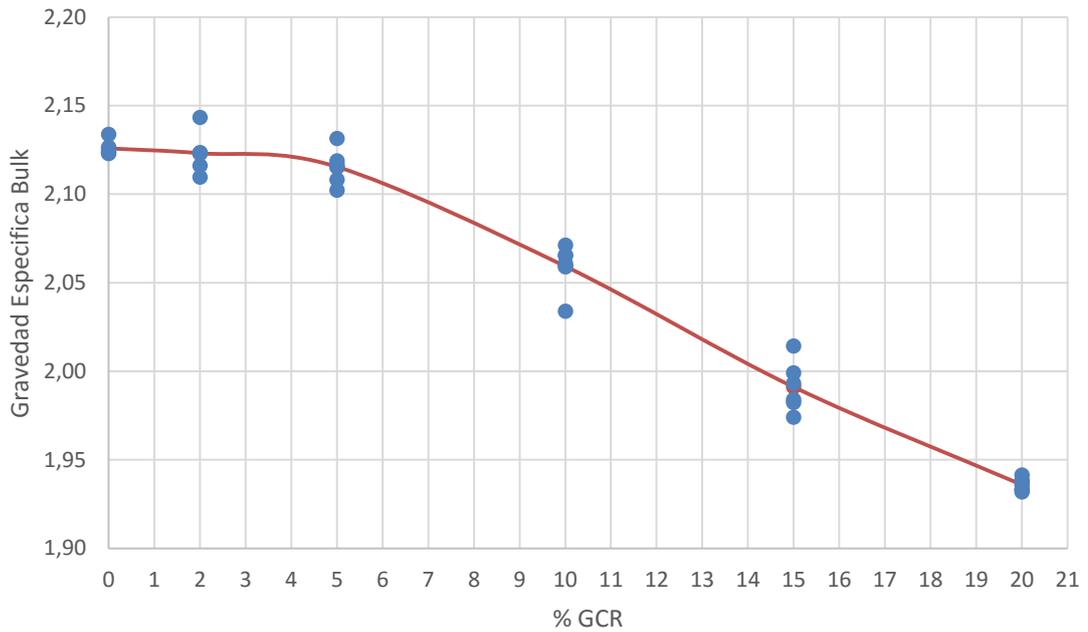
Tabla 22 Porcentaje de vacíos

% GCR	Muestra	Peso (g)	Peso s (g)	Peso ss (g)	Altura (mm)			Diámetro (mm)	Prom altura(mm)	Prom altura (cm)	Diámetro (cm)	Gravedad específica de Bulk	% de agua absorbida	Volumen gravedad de Bulk	Gravedad específica máxima	% de vacíos
0	0-4	1101,4	586,1	1104,7	68	66,6	68,4	101,6	67,67	6,77	10,16	2,1238	0,6	518,6	2,2298	4,8
	0-5	1096,7	588,5	1104,2	69,3	69	68,7	101	69,00	6,90	10,10	2,1266	1,5	515,7	2,2298	4,6
	0-6	1089,0	578,8	1091,7	67	66,7	67,5	102	67,07	6,71	10,20	2,1232	0,5	512,9	2,2298	4,8
	0-7	1098,3	587,0	1101,7	67,2	68,6	67,3	101	67,70	6,77	10,10	2,1339	0,7	514,7	2,2298	4,3
	0-8	1094,3	583,8	1098,8	66,4	67	66,3	101,6	66,57	6,66	10,16	2,1249	0,9	515,0	2,2298	4,7
	0-9	1098,8	585,2	1102,8	67	67,4	67,1	101,5	67,17	6,72	10,15	2,1229	0,8	517,6	2,2298	4,8
2	2-4	1095,7	586,1	1102,1	67	66	66,3	102	68,57	6,86	10,14	2,1234	1,2	516,0	2,2147	4,1
	2-5	1098,7	591,9	1112,7	68	68,7	67,3	101,5	66,93	6,69	10,15	2,1096	2,7	520,8	2,2147	4,7
	2-6	1096,8	583,8	1102,1	67,4	68,2	66,8	101,4	68,67	6,87	10,16	2,1161	1,0	518,3	2,2147	4,4
	2-7	1099,4	586,6	1104,4	66,6	66,4	66,5	101,2	67,10	6,71	10,10	2,1232	1,0	517,8	2,2147	4,1
	2-8	1093,3	587,6	1102,6	67,2	68,2	68,5	101	67,70	6,77	10,23	2,1229	1,8	515,0	2,2147	4,1
	2-9	1100,4	593,5	1106,9	68	66,5	66,7	101,5	66,43	6,64	10,20	2,1434	1,3	513,4	2,2147	3,2
5	5-4	1090,1	579,1	1093,6	68,8	68,5	68,4	101,4	68,57	6,86	10,14	2,1188	0,7	514,5	2,1849	3,0
	5-5	1098,3	587,5	1102,8	66,8	67	67	101,5	66,93	6,69	10,15	2,1314	0,9	515,3	2,1849	2,4
	5-6	1090,6	583,6	1100,9	69	69	68	101,6	68,67	6,87	10,16	2,1083	2,0	517,3	2,1849	3,5
	5-7	1096,7	579,2	1097,7	67	67,7	66,6	101	67,10	6,71	10,10	2,1151	0,2	518,5	2,1849	3,2
	5-8	1097,2	578,9	1100,8	68	68	67,1	102,3	67,70	6,77	10,23	2,1023	0,7	521,9	2,1849	3,8

% GCR	Muestra	Peso (g)	Peso s (g)	Peso ss (g)	Altura (mm)			Diámetro (mm)	Prom altura(mm)	Prom altura (cm)	Diámetro (cm)	Gravedad específica de Bulk	% de agua absorbida	Volumen gravedad Bulk	Gravedad específica máxima	% de vacíos
10	5-9	1086,8	577,9	1091,3	66,3	67	66	102	66,43	6,64	10,20	2,1169	0,9	513,4	2,1849	3,1
	10-4	1080,1	560,0	1083,0	68,3	68,5	65,9	102,9	67,57	6,76	10,29	2,0652	0,6	523,0	2,1703	4,8
	10-5	1107,4	573,7	1109,8	68,3	67,8	67,6	101,3	67,90	6,79	10,13	2,0657	0,4	536,1	2,1703	4,8
	10-6	1092,8	566,6	1094,2	68,3	68	68	101,3	68,10	6,81	10,13	2,0713	0,3	527,6	2,1703	4,6
	10-7	1094,5	569,2	1100,8	70	70	70	101	70,00	7,00	10,10	2,0589	1,2	531,6	2,1703	5,1
	10-8	1095,1	563,4	1101,8	69	69,5	69	102	69,17	6,92	10,20	2,0340	1,2	538,4	2,1703	6,3
	10-9	1106,8	573,1	1110,2	68,5	68,3	68	101,5	68,27	6,83	10,15	2,0607	0,6	537,1	2,1703	5,0
15	15-4	1096,5	556,6	1109,3	69,6	69,4	70	101,8	69,67	6,97	10,18	1,9839	2,3	552,7	2,1173	6,3
	15-5	1085,9	549,0	1092,2	67	67	67,3	102	67,10	6,71	10,20	1,9991	1,2	543,2	2,1173	5,6
	15-6	1092,9	559,1	1110,4	69,4	70	69,4	101,3	69,60	6,96	10,13	1,9824	3,2	551,3	2,1173	6,4
	15-7	1090,9	557,4	1104,7	70,4	70	69,5	101	69,97	7,00	10,10	1,9932	2,5	547,3	2,1173	5,9
	15-8	1102,6	564,9	1112,3	68,7	68,6	68,3	101	68,53	6,85	10,10	2,0142	1,8	547,4	2,1173	4,9
15-9	1096,0	555,8	1111,0	69,4	70	69,4	101,3	69,60	6,96	10,13	1,9741	2,7	555,2	2,1173	6,8	
20	20-4	1091,6	546,9	1110,0	70	69,6	70	101,4	69,87	6,99	10,14	1,9386	3,3	563,1	2,0344	4,7
	20-5	1100,5	550,9	1118,9	71	71,4	71,6	102	71,33	7,13	10,20	1,9375	3,2	568,0	2,0344	4,8
	20-6	1089,1	548,3	1109,3	70,4	70	70	101,4	70,13	7,01	10,14	1,9414	3,6	561,0	2,0344	4,6
	20-7	1092,2	540,6	1105,6	70,6	71	70,3	101,8	70,63	7,06	10,18	1,9331	2,4	565,0	2,0344	5,0
	20-8	1093,4	543,3	1109,3	71	70,6	71,3	101,5	70,97	7,10	10,15	1,9318	2,8	566,0	2,0344	5,0
	20-9	1096,2	535,4	1102,4	73	72,7	71,9	101	72,53	7,25	10,10	1,9333	1,1	567,0	2,0344	5,0

Fuente: Propia

Gráfica 12 Gravedad Específica Bulk para diferentes porcentajes de GCR



Fuente: Propia

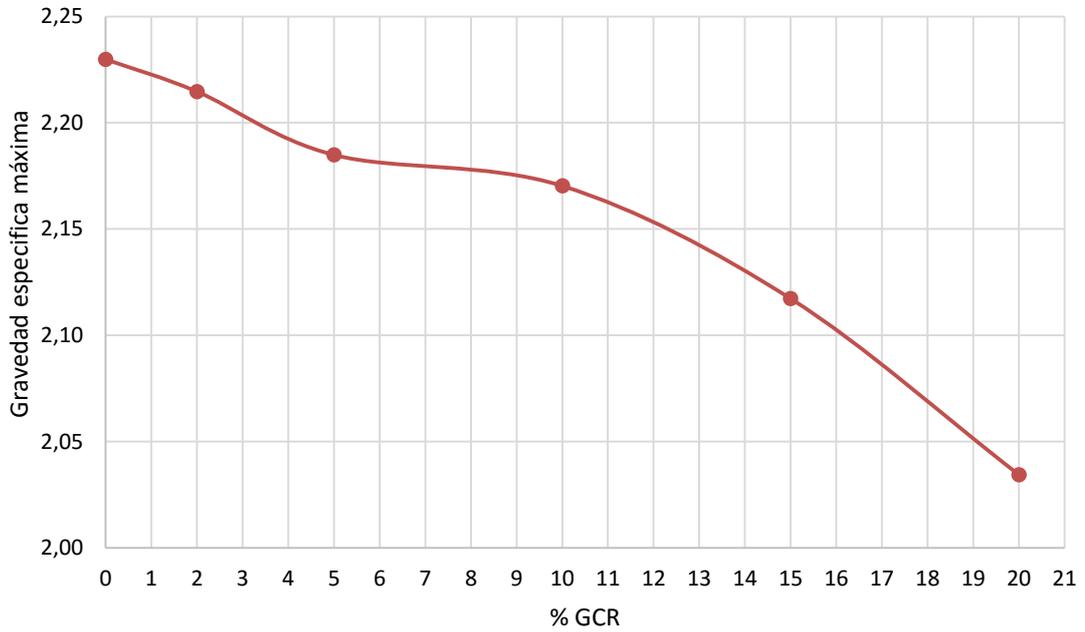
En la gráfica 12 se observa que el mayor valor de la gravedad específica Bulk se presenta en la mezcla asfáltica sin modificar y a medida que aumenta el porcentaje de GCR en la mezcla, la gravedad específica Bulk disminuye, influyendo directamente en el parámetro de relación de vacíos, haciendo las briquetas más livianas.

Tabla 23 Gravedad específica máxima dependiendo del porcentaje de GCR

GRC (%)	Peso m+w+r+t (g)	Peso pic+ tapa (g)	Gravedad específica máxima
0	9296		2,2298
2	9292	8579	2,2147
5	9284	Peso muestra (g)-m	2,1849
10	9280		2,1703
15	9265	1300	2,1173
20	9240		2,0344

Fuente: Propia

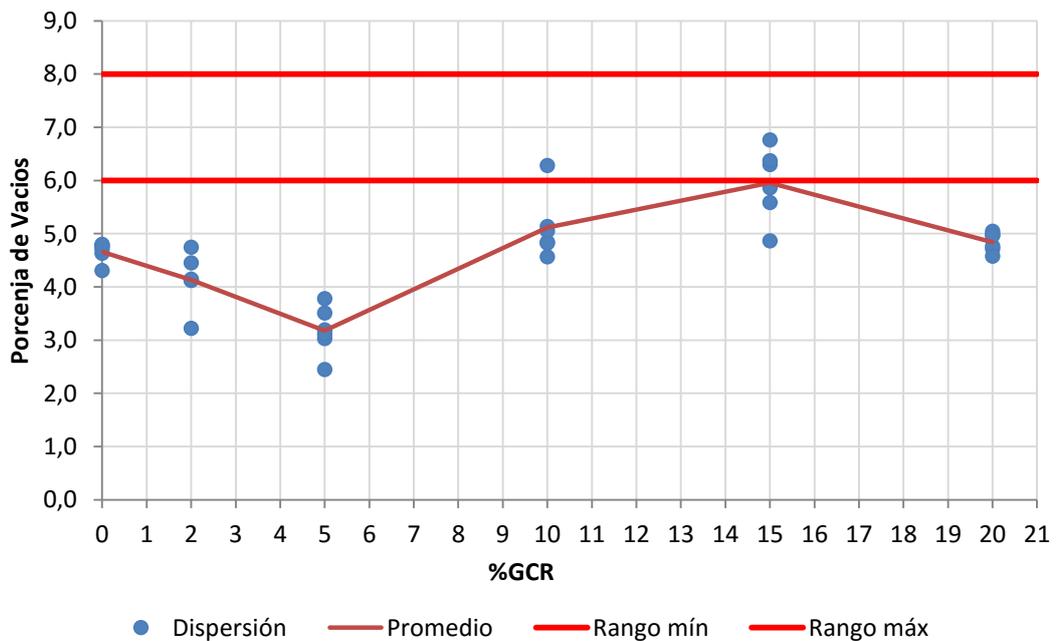
Gráfica 13 Gravedad específica máxima con diferentes porcentajes de GCR



Fuente: Propia

En la gráfica 13 elaborada por medio de la tabla 23 se evidencia que la gravedad específica máxima tiene el mismo comportamiento que la gravedad específica Bulk y a medida que aumenta el porcentaje de GCR la gravedad específica máxima disminuye.

Gráfica 14 Porcentaje de vacíos con diferentes porcentajes de GCR



Fuente Propia

En la gráfica 14 se puede observar que la relación de vacíos tiende a disminuir en las briquetas elaboradas con 75 golpes, cuando se modifica la mezcla asfáltica con poco porcentaje de GCR, mientras que en las briquetas elaboradas con mayor porcentaje de GCR se presenta un aumento de la relación de vacíos; muy posiblemente este es uno de los factores por los cuales la especificación IDU-560-11 recomienda hacer la modificación del ligante entre el 10% y el 20%.

Figura 11 Briquetas 0% GCR – Gravedades y vacíos



Fuente: Propia

Figura 12 Briquetas 2% GCR – Gravedades y vacíos



Fuente: Propia

Figura 13 Briquetas 5% GCR - Gravedades y vacíos



Fuente: Propia

Figura 14 Briquetas 10% GCR – Gravedades y vacíos



Fuente: Propia

En las figuras de la 11 a la 14 se pueden observar las briquetas elaboradas con los porcentajes de vacíos que no cumplen con la INV-E 725-13, por lo cual se requiere hacer una corrección para este parámetro.

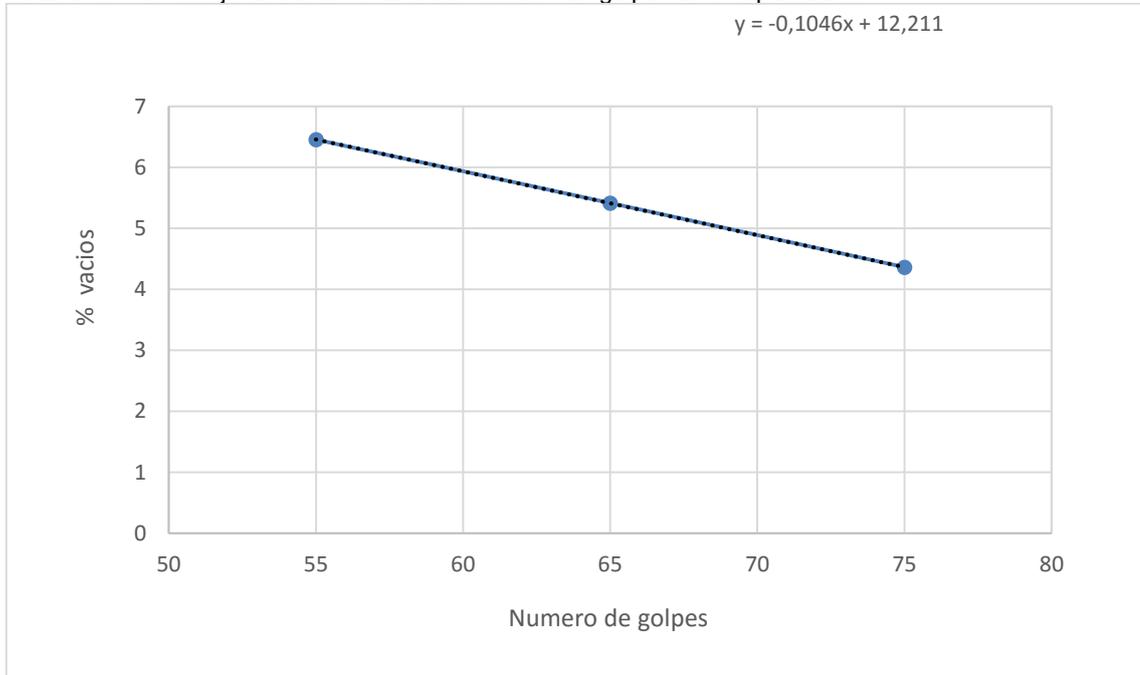
- Corrección de vacíos

Tabla 24 Porcentaje de vacíos con diferente número de golpes

% GCR	No golpes	Peso (g)	Peso s (g)	Peso sss (g)	Altura (mm)			Diámetro (mm)	Prom altura(mm)	Gravedad específica de Bulk	% de agua absorbida	Gravedad específica máxima	% de vacíos
0	55	1100,3	577,5	1121,0	66,3	67,7	66	101,8	66,67	2,08588	3,81	2,2298	6,4562
	65	1100	578,4	1115,6	67,6	67,4	67,5	101,3	67,50	2,10907	2,90	2,2298	5,4165
	75	1097,9	578,0	1108,1	66,5	67,3	66,4	101,1	66,73	2,13253	1,92	2,2298	4,3642

Fuente: Propia

Gráfica 15 Porcentaje de vacíos a diferente número de golpes de compactación



Fuente: Propia

Para realizar el ensayo de tracción indirecta TSR se requiere que las briquetas tengan un porcentaje de vacíos entre 7 ± 1 , por lo cual fue necesario desarrollar

un ajuste por medio de una gráfica elaborada a partir de la compactación de briquetas a 55, 65 y 75 golpes sin porcentaje de GCR que permitiera determinar el número de golpes necesarios para obtener en la compactación una relación de vacíos de 7%.

Tabla 25 Número de golpes para cada % de GCR

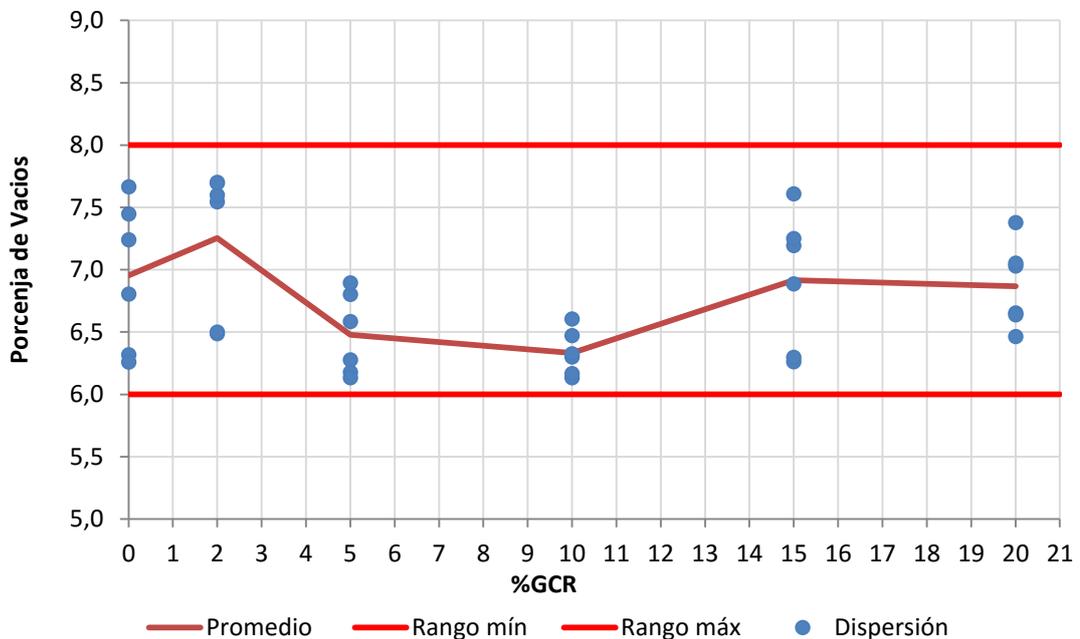
% GCR	% vacíos	Optimo % vacíos	Corte en y (b)	Numero golpes
0	4,36	7	12,211	50
2	4,1	7	11,945	47
5	3,2	7	11,045	39
10	5,1	7	12,945	57
15	6,0	7	13,845	65
20	4,8	7	12,645	54

Fuente: Propia

En la tabla 25 se relaciona el número de golpes de compactación de las nuevas briquetas elaboradas, con el fin de que cumplan el porcentaje de vacíos establecido en la I.N.V.E.-725-13, para hacer el ensayo TSR.

- Porcentaje de vacíos corregidos para ensayo TSR

Gráfica 16 Porcentaje de vacíos de muestras para TSR



Una vez compactadas las nuevas briquetas y corregidos los golpes de compactación se obtuvieron los porcentajes de vacíos entre 7 ± 1 de acuerdo a la norma I.N.V.E. 725-13.

En la tabla 26 podemos identificar el nuevo porcentaje de vacíos obtenido para cada una de las briquetas elaboradas con el número de golpes corregidos según la tabla 25.

Tabla 26 Porcentajes de vacíos corregidos

% GCR	Muestra	Peso (g)	Peso s (g)	Peso sss (g)	Altura (mm)			Diámetro (mm)	Prom altura(mm)	Gravedad específica de Bulk	% de agua absorbida	Volumen gravedad Bulk	Gravedad específica máxima	% de vacíos
0	0-10	1092,9	575,2	1106,0	64,0	64,4	64,0	101,8	64,13	2,0590	2,5	530,8	2,2298	7,7
	0-11	1094,4	580,2	1109,3	65,0	64,3	64,8	101,4	64,70	2,0684	2,8	529,1	2,2298	7,2
	0-12	1093,3	577,4	1103,5	64,7	65,2	65,0	101,2	64,97	2,0781	1,9	526,1	2,2298	6,8
	0-13	1099,6	580,5	1113,3	65,4	65,3	64,4	101,4	65,03	2,0638	2,6	532,8	2,2298	7,4
	0-14	1096,1	584,5	1109,2	65,0	65,3	65,4	101,5	65,23	2,0890	2,5	524,7	2,2298	6,3
	0-15	1094,7	586,0	1109,7	65,7	66,4	65,7	101,0	65,93	2,0903	2,9	523,7	2,2298	6,3
2	2-10	1096,6	577,8	1107,3	70,0	70,6	70,6	101,7	69,37	2,0710	2,0	529,5	2,2147	6,5
	2-11	1105,9	576,5	1116,6	69,0	69,5	70,0	101,5	68,57	2,0476	2,0	540,1	2,2147	7,5
	2-12	1100,8	578,7	1110,3	66,5	66,3	67,5	101,7	67,90	2,0707	1,8	531,6	2,2147	6,5
	2-13	1102,6	570,4	1109,8	68,2	69,3	68,3	101,5	66,30	2,0441	1,3	539,4	2,2147	7,7
	2-14	992,1	523,7	1008,5	61,4	61,0	61,6	101,6	69,27	2,0464	3,4	484,8	2,2147	7,6
	2-15	983,9	515,0	996,3	61,6	61,6	61,0	101,3	67,93	2,0443	2,6	481,3	2,2147	7,7
5	5-10	1094,5	572,2	1109,7	69,0	70,2	68,9	101,3	69,37	2,0363	2,8	537,5	2,1849	6,8
	5-11	1101,3	575,0	1112,8	68,5	68,2	69,0	101,5	68,57	2,0478	2,1	537,8	2,1849	6,3
	5-12	1099,6	575,4	1111,8	66,8	69,3	67,6	101,4	67,90	2,0500	2,3	536,4	2,1849	6,2
	5-13	1098,5	579,5	1119,5	66,0	66,4	66,5	101,4	66,30	2,0343	3,9	540,0	2,1849	6,9
	5-14	1099,5	574,2	1112,9	70,4	68,4	69,0	101,1	69,27	2,0410	2,5	538,7	2,1849	6,6
	5-15	1099,9	582,7	1119,0	65,8	69,4	68,6	101,2	67,93	2,0509	3,6	536,3	2,1849	6,1
10	10-10	1100,5	576,7	1116,9	66,6	68,2	66,7	101,3	67,17	2,0372	3,0	540,2	2,1703	6,1
	10-11	1096,5	576,9	1116,1	67,3	67,0	67,5	101,6	67,27	2,0336	3,6	539,2	2,1703	6,3
	10-12	1094,6	576,8	1114,3	67,2	67,6	67,4	101,0	67,40	2,0365	3,7	537,5	2,1703	6,2

% GCR	Muestra	Peso (g)	Peso s (g)	Peso sss (g)	Altura (mm)			Diámetro (mm)	Prom altura(mm)	Gravedad específica de Bulk	% de agua absorbida	Volumen gravedad Bulk	Gravedad específica máxima	% de vacíos
	10-13	1096,2	569,5	1110,3	67,7	68,3	68,0	101,0	68,00	2,0270	2,6	540,8	2,1703	6,6
	10-14	1101,8	577,3	1120,1	67,6	68,2	68,4	101,0	68,07	2,0298	3,4	542,8	2,1703	6,5
	10-15	1096,4	571,6	1110,9	66,3	67,0	66,5	101,4	66,60	2,0330	2,7	539,3	2,1703	6,3
15	15-10	1090,6	561,7	1111,2	68,6	68,6	68,6	101,0	68,60	1,9847	3,7	549,5	2,1173	6,3
	15-11	1089,4	561,1	1110,2	66,4	66,2	66,2	101,4	66,27	1,9840	3,8	549,1	2,1173	6,3
	15-12	1093,5	560,4	1119,4	69,2	68,0	69,4	101,3	68,87	1,9562	4,6	559,0	2,1173	7,6
	15-13	1098,9	561,6	1119,0	68,5	69,0	68,3	101,4	68,60	1,9715	3,6	557,4	2,1173	6,9
	15-14	1082,7	559,4	1110,4	67,4	68,8	67,0	101,0	67,73	1,9650	5,0	551,0	2,1173	7,2
	15-15	1085,2	561,5	1114,1	66,6	67,0	66,5	101,0	66,70	1,9638	5,2	552,6	2,1173	7,2
20	20-10	1095,4	542,0	1118,8	69,0	69,0	69,3	101,0	69,10	1,8991	4,1	576,8	2,0344	6,7
	20-11	1059,2	519,2	1079,2	68,7	70,0	70,4	101,0	69,70	1,8914	3,6	560,0	2,0344	7,0
	20-12	1091,6	532,5	1111,8	68,7	68,8	68,8	101,6	68,77	1,8843	3,5	579,3	2,0344	7,4
	20-13	1080,7	532,5	1104,0	69,7	70,2	69,6	101,4	69,83	1,8910	4,1	571,5	2,0344	7,1
	20-14	1098,0	542,6	1119,6	69,6	69,3	69,3	101,3	69,40	1,9029	3,7	577,0	2,0344	6,5
	20-15	1099,0	537,1	1115,7	68,7	69,2	68,8	101,7	68,90	1,8994	2,9	578,6	2,0344	6,6

Fuente: Propia

- Muestras Secas – TSR

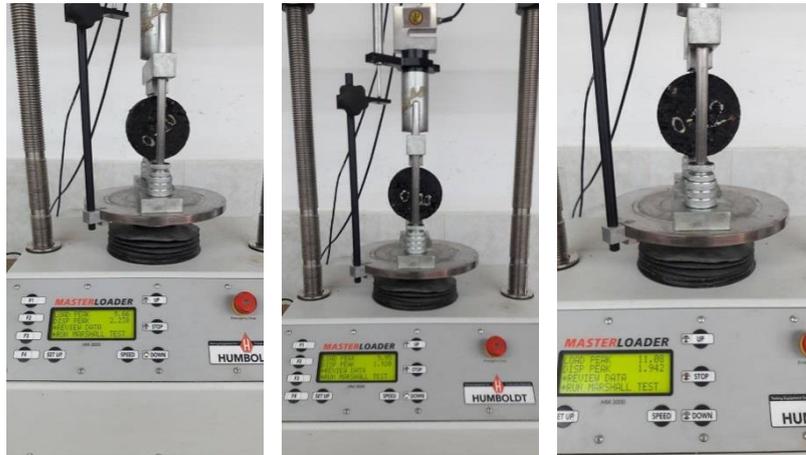
En la tabla 27 observamos el resultado de la resistencia a la tensión de las muestras secas para los diferentes porcentajes de GCR

Tabla 27 Ensayo TSR en muestras secas

Porcentaje GCR	Muestra	Peso s (g)	Peso sss (g)	Altura (mm)			Diámetro (mm)	Prom altura(mm)	Carga (KN)	Carga (N)	Deformación (mm)	Resistencia a la tensión (Kpa)	Prom
0	0-13	594,7	1116,4	65,1	65,3	65,8	101,8	65,40	13,76	13760	1,681	1315,75	1181,75
	0-14	591,2	1118,0	65	65,6	66,0	102,0	65,53	11,06	11060	1,627	1053,35	
	0-15	591,0	1112,0	66	67	67,8	100,6	66,93	12,44	12440	1,696	1176,14	
2	2-13	570,1	1115,9	67,9	68,1	68	102,2	68,00	5,72	5720	3,13	523,98	622,66
	2-14	525,0	1008,4	61,3	60,8	60,7	100,7	60,93	7,27	7270	2,352	754,28	
	2-15	519,4	1005,3	60,8	61,7	61,6	101,5	61,37	5,77	5770	2,397	589,74	
5	5-13	584,4	1117,4	66	66,8	67,6	100,8	66,80	6,49	6490	2,718	613,60	539,42
	5-14	585,8	1122,5	68	68,6	70,3	101,4	68,97	5,48	5480	2,656	498,87	
	5-15	586,4	1127,6	68,3	68,8	69,1	100,9	68,73	5,51	5510	2,156	505,79	
10	10-13	573,5	1116,0	69	69	68,9	101	68,97	7,28	7280	2,222	665,35	687,41
	10-14	583,1	1123,6	67,6	68,2	68,7	101,4	68,17	7,38	7380	2,894	679,71	
	10-15	576,2	1112,0	67,6	66,5	67,8	101,3	67,30	7,68	7680	2,355	717,16	
15	15-13	566,6	1094,2	68,6	69	68,7	102	68,77	4,96	4960	2,291	450,18	537,22
	15-14	559,3	1116,1	67,7	67,4	69,4	101,8	68,17	6,31	6310	1,788	578,88	
	15-15	564,3	1114,9	66,3	68	66,3	100,5	66,87	6,15	6150	1,606	582,61	
20	20-13	548,4	1114,7	70,5	70,4	70	101,6	70,20	4,14	4140	2,24	369,53	366,44
	20-14	564,8	1097,3	69,3	69,3	69,6	101	69,40	4,8	4800	1,887	435,95	
	20-15	557,8	1101,7	69	69	69,1	102	69,03	3,25	3250	2,656	293,84	

Fuente: Propia

Figura 15 TSR muestras secas 0% GCR



Fuente: Propia

Figura 16 TSR muestras secas 2% GCR



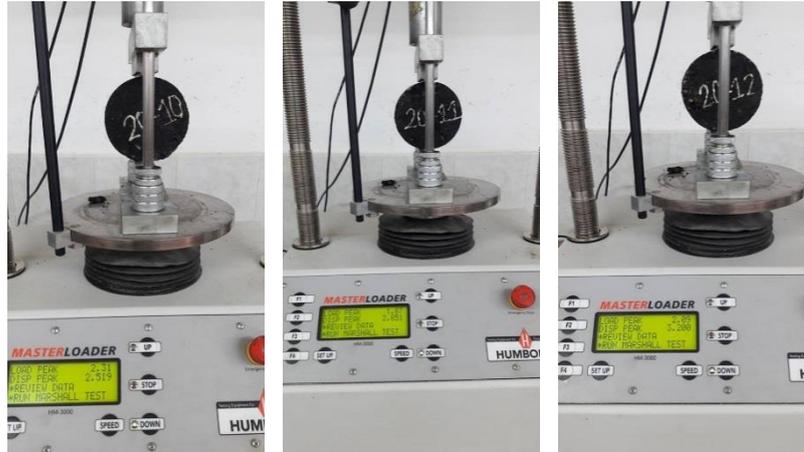
Fuente: Propia

Figura 17 TSR Muestras secas 5% GCR



Fuente: Propia

Figura 18 TSR muestras secas 20% GCR

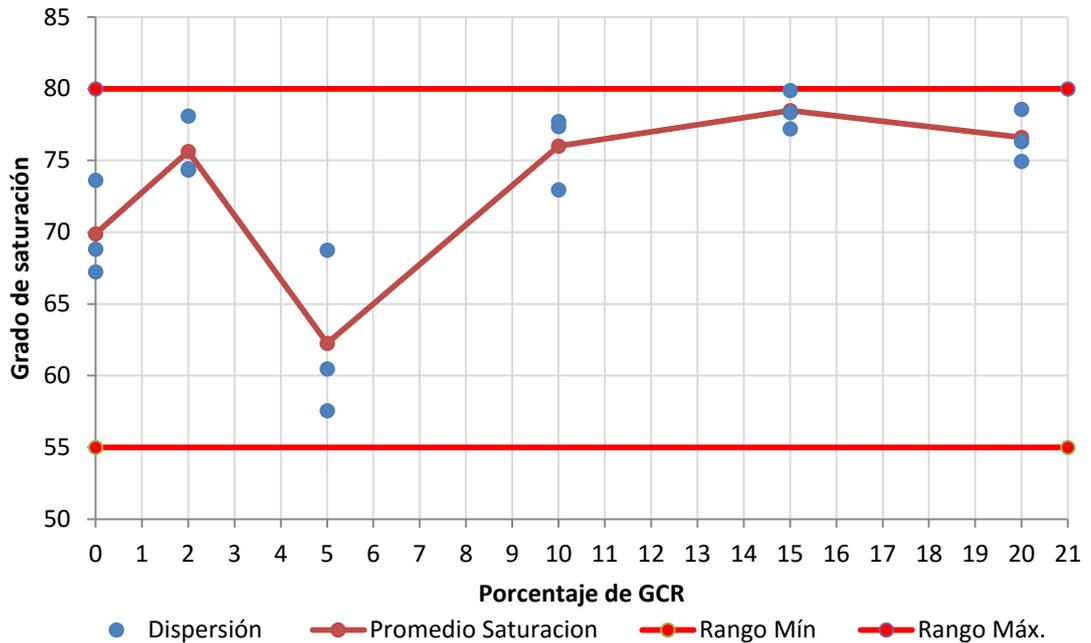


Fuente: Propia

En las figuras de la 15 a la 18 se pueden ver los resultados de la carga máxima arrojados en la maquina para el calculo de la resistencia a la tension para las muestras secas.

- Grado de Saturación

Gráfica 17 Grado de saturación para diferentes porcentajes de GCR



Fuente: Propia

Por medio de la gráfica 17 podemos evidenciar que el grado de saturación se encuentra dentro del rango establecidos por la IN.V.E. 725-13 en el cual el grado de saturación debe ser mayor a 55 y menor a 80.

Se presentaron mayores grados de saturación para las mezclas asfálticas modificadas con los porcentajes de 10, 15 y 20 % de GCR.

En la tabla 28 se encuentran los cálculos para el grado de saturación, que debe encontrarse entre 55 y 80% para poder realizar el ensayo TSR

Tabla 28 Grado de saturación antes de 24 horas- Muestras húmedas

Porcentaje GCR	Muestra	Peso (g)	Peso s (g)	Peso sss (g)	Volumen de vacíos con aire	Volumen de agua absorbido	Grado de saturación	Volumen Bulk sin saturación	Cambio de volumen
0	0-10	1092,9	590,4	1118,3	37,776	25,4	67,24	530,8	100,55
	0-11	1094,4	595,4	1117,3	31,104	22,9	73,62	529,1	101,38
	0-12	1093,3	591,9	1117,8	35,597	24,5	68,83	526,1	100,04
2	2-10	1096,6	592,3	1123,1	35,643	26,5	74,35	529,5	99,76
	2-11	1105,9	598,4	1129,6	31,844	23,7	74,43	540,1	101,68
	2-12	1100,8	598,7	1118,8	23,046	18,0	78,10	531,6	102,21
5	5-10	1094,5	583,6	1116,4	31,856	21,9	68,75	537,5	100,88
	5-11	1101,3	584,7	1120,5	31,743	19,2	60,48	537,8	100,37
	5-12	1099,6	583,2	1117,4	30,922	17,8	57,57	536,4	100,41
10	10-10	1100,5	585,6	1121,6	28,923	21,1	72,95	540,2	100,78
	10-11	1096,5	583,5	1123,6	34,867	27,1	77,72	539,2	99,83
	10-12	1094,6	582,9	1119,7	32,442	25,1	77,37	537,5	100,13
15	15-10	1090,6	567,6	1119,2	36,501	28,6	78,35	549,5	99,62
	15-11	1089,4	568,6	1114,3	31,168	24,9	79,89	549,1	100,62
	15-12	1093,5	567,7	1125,1	40,932	31,6	77,20	559,0	100,29
20	20-10	1095,4	549,9	1121,3	32,969	25,9	78,56	576,8	100,95
	20-11	1059,2	530,5	1085,2	34,062	26,0	76,33	560,0	100,96
	20-12	1091,6	543,7	1125,5	45,237	33,9	74,94	579,3	99,57

Fuente: Propia

- Muestras Húmedas - TSR

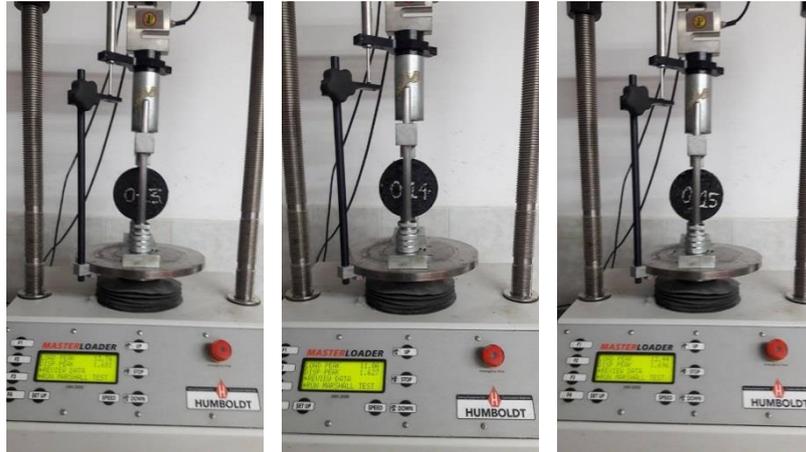
En la tabla 29 se puede observar el resultado de la resistencia a la tensión de las muestras húmedas para los diferentes porcentajes de GCR

Tabla 29 TSR Muestras húmedas

Porcentaje GCR	M	Peso (g)	Peso sss (g)	Peso s (g)	Altura (mm)			Diámetro (mm)	Prom altura (mm)	Volumen agua absorbida	Volumen de vacíos con aire	Grado de saturación	Volumen Bulk sin saturación	Cambio de volumen	Carga (KN)	Carga (N)	Deformación (mm)	Resistencia a la tensión (Kpa)	Prom
0	0-10	1092,9	1133,2	615,9	64	64,5	64,0	101,3	64,17	40,30	27,18	148,29	530,8	97,5	9,66	9660	2,238	946,10	994,34
	0-11	1094,4	1132,2	616,9	64,4	65,0	64,6	101,5	64,67	37,80	24,50	154,26	529,1	97,4	9,95	9950	1,92	965,07	
	0-12	1093,3	1112,9	612,9	65	64,7	65,0	101,4	64,90	19,62	9,72	201,91	526,1	95,0	11,08	11080	1,942	1071,86	
2	2-10	1096,6	1160,6	609,0	70,7	70,4	71,0	100,6	70,70	64,00	56,44	113,39	529,5	104,2	4,91	4910	2,837	439,49	504,89
	2-11	1105,9	1174,8	622,2	7,5	69,7	69,3	101,1	48,83	68,90	53,24	129,41	540,1	102,3	4,28	4280	2,721	551,89	
	2-12	1100,8	1159,6	620,2	67,3	67,6	67,1	101	67,33	58,80	42,35	138,85	531,6	101,5	5,59	5590	2,937	523,29	
5	5-10	1094,5	1159,3	615,4	69,8	69,2	69,6	100,7	69,53	64,80	42,96	150,85	537,5	101,2	5,35	5350	2,958	486,42	426,64
	5-11	1101,3	1162,3	616,6	69,7	68,8	67,5	101,1	68,67	61,00	41,64	146,48	537,8	101,5	4,3	4300	3,338	394,32	
	5-12	1099,6	1161,5	618,8	67	67,4	68,3	101,5	67,57	61,90	39,42	157,02	536,4	101,2	4,3	4300	3,436	399,16	
10	10-10	1100,5	1155,1	614,6	68,3	68,1	67,1	102,2	67,83	54,60	33,42	163,36	540,2	100,1	5,54	5540	2,885	508,74	495,21
	10-11	1096,5	1161,7	618,7	67,7	67,6	67,8	101,9	67,70	65,20	37,77	172,64	539,2	100,7	4,76	4760	3,654	439,26	
	10-12	1094,6	1159,5	615,8	68,4	68,5	68,1	101,2	68,33	64,90	39,34	164,96	537,5	101,2	5,84	5840	3,376	537,63	
15	15-10	1090,6	1156,4	604,1	69,7	69,9	69,7	101,4	69,77	65,80	49,79	132,17	549,5	100,5	3,5	3500	3,302	314,96	331,93
	10-11	1089,4	1156,7	609,5	66,6	68,4	67,0	102,7	67,33	67,30	45,24	148,77	549,1	99,7	3,93	3930	3,313	361,80	
	10-12	1093,5	1181,8	616,7	69,9	69,4	70,0	102,4	69,77	88,30	61,25	144,17	559,0	101,1	3,58	3580	4,123	319,02	
20	20-10	1095,4	1165,0	607,6	69,5	70,1	69,4	101,7	69,67	69,60	52,67	132,14	576,8	96,6	2,31	2310	2,519	207,56	188,81
	20-11	1059,2	1128,3	588,8	69,3	70	69,4	101,4	69,57	69,10	51,45	134,30	560,0	96,3	1,87	1870	2,851	168,77	
	20-12	1091,6	1166,9	608,9	69,3	69,6	69,0	101	69,30	75,30	55,02	136,85	579,3	96,3	2,09	2090	3,2	190,10	

Fuente: Propia

Figura 19 TSR muestras húmedas 0% GCR



Fuente: Propia

Figura 20 TSR muestras húmedas 2% GCR



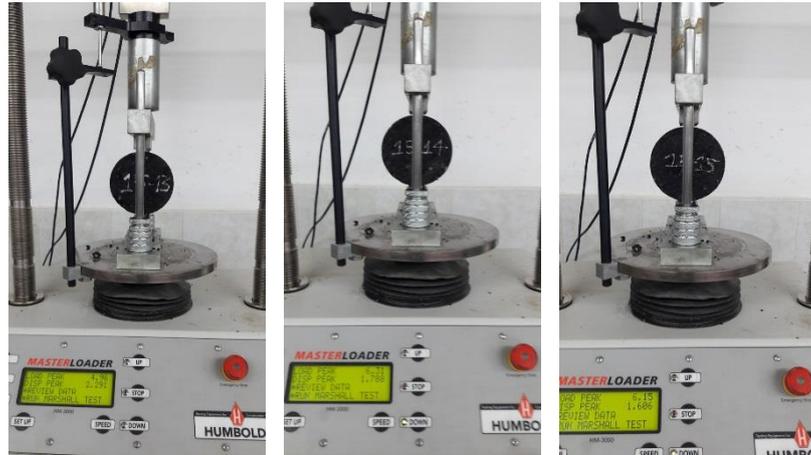
Fuente: Propia

Figura 21 TSR muestras húmedas 10% GCR



Fuente: Propia

Figura 22 TSR muestras húmedas 15% GCR



Fuente: Propia

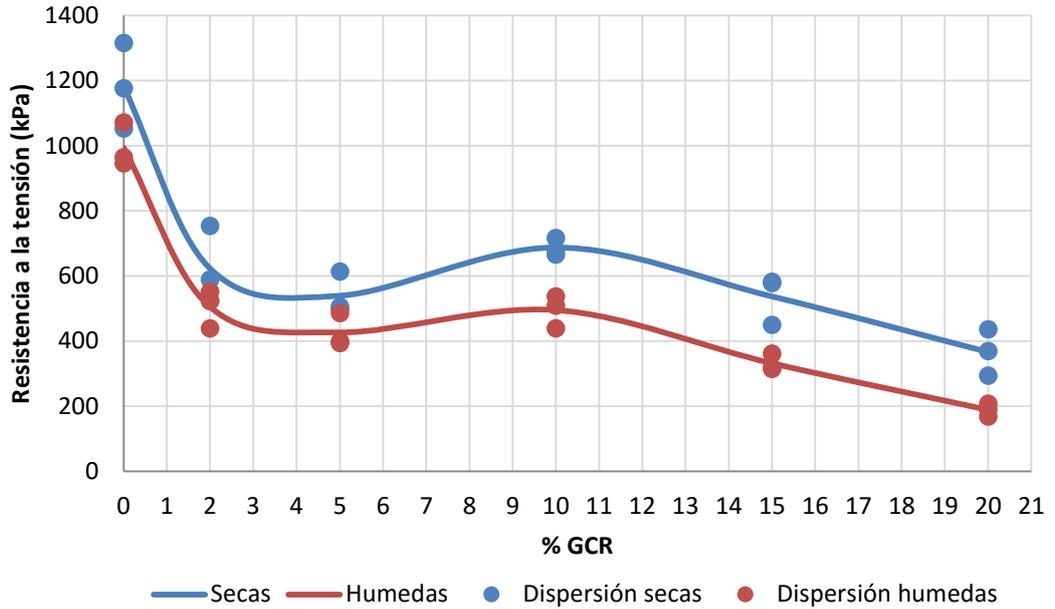
En las figuras 19 a la 22 se pueden ver los resultados de la carga máxima arrojados en la maquina para el calculo de la resistencia a la tension para las muestras húmedas.

Tabla 30 Resistencia a la tensión por % de GCR

Porcentaje GCR	Promedio resistencia a la tensión secas (kpa)	Promedio resistencia a la tensión húmedas (kpa)	Relación de la resistencia a la tensión
0	1181,75	994,34	84,14
2	622,66	504,89	81,09
5	539,42	426,64	79,09
10	687,41	495,21	72,04
15	537,22	331,93	61,79
20	366,44	188,81	51,52

Fuente: Propia

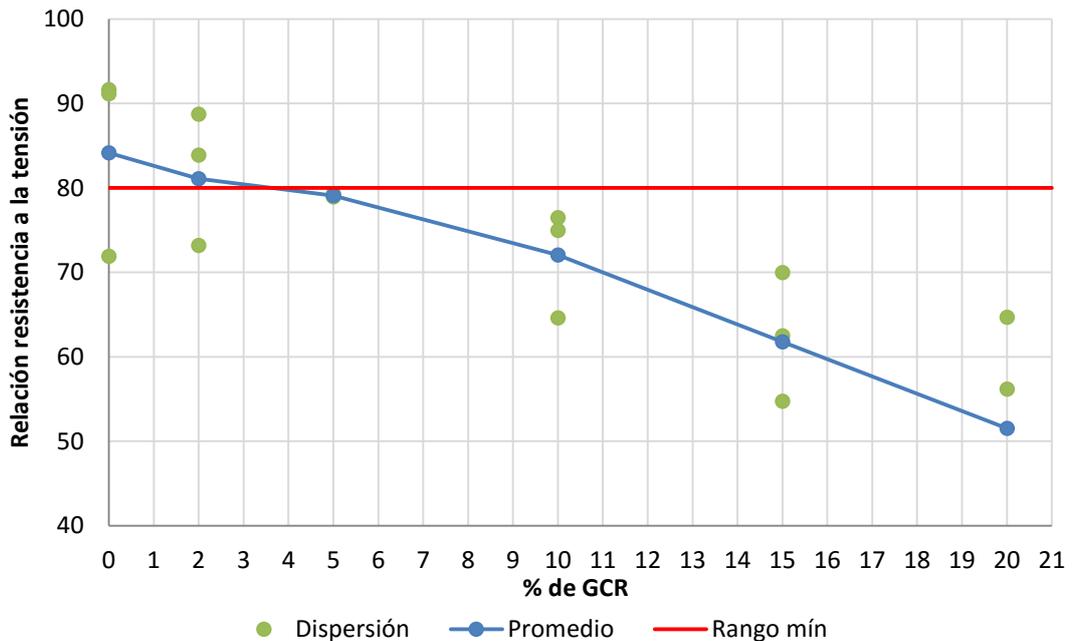
Gráfica 18 Resistencia a la tensión



Fuente: Propia

En la gráfica 18 se observa que las mezclas asfálticas modificadas, aunque evaluadas en seco y en húmedo, por separado según la I.N.V.E. 725-13, tienen el mismo comportamiento, sin embargo por el poco tiempo de exposición de las muestras secas al agua, se genera un aumento en su resistencia. Evidenciando que el daño por humedad es mayor en las muestras expuestas durante 24 horas al agua.

Gráfica 19 Coeficiente RRT Relación de la resistencia a la tensión



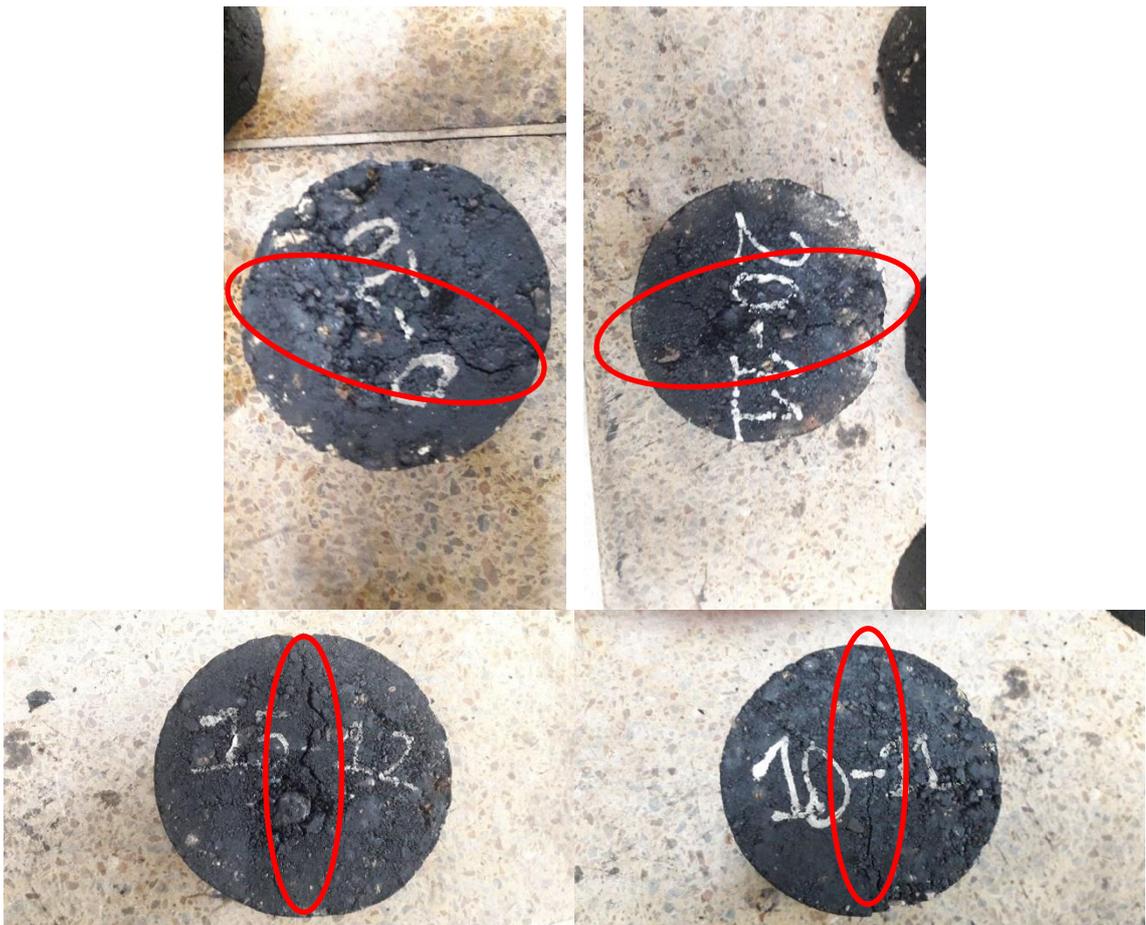
Fuente: Propia

Se puede evidenciar en la gráfica 19 que a medida que aumenta el % de GCR en las mezclas asfálticas modificadas, el coeficiente RRT se ve reducido, lo que genera la disminución de las competencias mecánicas de las mezclas asfálticas.

Según el artículo 450- llamado Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico) que hace parte de las especificaciones generales de construcción de carreteras 2013, se plantea que el coeficiente RRT debe ser ochenta por ciento (80%), como mínimo, sin embargo en los ensayos realizados solamente el 0% y el 2% cumplen con esta especificación por lo cual se debe incrementar la adhesividad GCR y el ligante asfáltico

Al comparar la mezcla asfáltica convencional con una modificada con GCR el coeficiente RRT es mayor en la mezcla asfáltica sin modificar cumpliendo con el mínimo de 80%, sin embargo las mezclas asfálticas modificadas con los diferentes porcentajes de GCR obtuvieron coeficientes inferiores al de la muestra sin modificar por lo cual se podría decir que no se realizó una optimización del parámetro de daño por humedad.

Figura 23 Evaluación visual del daño por humedad



Fuente propia.

En el grupo de imágenes de la figura 23 se puede evidenciar la grieta producida por la carga de falla que presentaron las briquetas luego de ser sometidas al ensayo de tracción indirecta, además se observó que en las briquetas con mayores porcentajes de modificación de GCR la grieta era más pronunciada que en las briquetas elaboradas con menores porcentajes de GCR.

9. CONCLUSIONES

Al evaluar el daño por humedad en las mezclas asfálticas modificadas se encuentra que el aumento del porcentaje de grano de caucho reciclado disminuye el coeficiente RRT, por lo cual las mezclas asfálticas modificadas con GCR son más susceptibles al daño causado por el agua.

El GCR aumenta la elasticidad, punto de ablandamiento, rigidez y viscosidad del ligante modificado, sin embargo se disminuye la penetración.

Al incorporar el GCR a la mezcla asfáltica, la estabilidad de Marshall disminuye, mientras que el flujo aumenta. El contenido de vacíos disminuye en presencia de pocas cantidades de GCR y aumenta cuando se modifica con un porcentaje mayor.

10.RECOMENDACIONES

Se sugiere evaluar detalladamente el rango que presentó las mejores condiciones de estabilidad de la mezcla asfáltica modificada entre el 10 y 15 %, con el fin de precisar en un rango más pequeño el porcentaje óptimo que presenta condiciones de aumento en sus parámetros.

Se recomienda realizar el ensayo complementario Moisture Induced Strength Tester (MIST), ya que funciona a mayores temperaturas que las normales, generando presiones dentro de los poros de la mezcla y logrando una reproducción de los efectos que experimenta en condiciones normales de tráfico y de temperatura, ya que el ensayo TSR no simula totalmente las condiciones encontradas en campo, pues dicho ensayo contempla un acondicionamiento parcial de las muestras y no tiene en cuenta el efecto del tráfico en las mismas y los largos periodos de tiempo de exposición al agua.

Se recomienda según los antecedentes investigados y los resultados obtenidos evaluar el daño por humedad con otro polímero diferente al GCR grano de caucho reciclado, ya que se obtienen mejores resultados al incrementar la adhesividad, empleando un aditivo mejorador de adherencia y/o una llenante mineral apropiada.

Se recomienda realizar el ensayo TSR con otro tipo de asfalto, para este proceso de investigación se utilizó asfalto 80-100, puede ocurrir que con un asfalto 40-50 u 60-70 los resultados arrojados arrojen una optimización del daño por humedad.

11. BIBLIOGRAFÍA

ABU EL-MAATY BEHIRY, Ahmed. Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures. Minufiya University. Shibeen El-kom City, Egypt. (2012). Disponible [En línea]: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447912000974>

AIREY, Gordon; COLLOP, Andrew; ZOOROB, Salah y ELLIOTT R. The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage. Construction and building materials. Vol. 22. Nottingham. 2008. Disponible [En línea]: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061807001808>

BUCHANAN, Shane y MOORE, Vernon. Laboratory Accelerated Stripping Simulator for Hot Mix Asphalt. Mississippi Transportation Research Center. Mississippi. James Worth Bagley College of engineering Mississippi States of university. 2005. Disponible [En línea]: http://ntl.bts.gov/lib/25000/25000/25098/FINAL_REPORT_SS_167.pdf

CARO, Silvia, GARCÍA, Cristina y CAICEDO, Bernardo. Modelo numérico para el estudio del clima en pavimentos flexibles". XIII Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos. Universidad de los Andes. Bogotá. 2001. Disponible [En línea]: <https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwik6qWP7aTLAhXEHR4KHWaHD9IQFgguMAI&url=https://www.ingenieria.uniandes.edu.co/fojs/index.php/fojs/article/download/521/702&usq=AFQjCNHxKu2NzFIWvubVqjXNcWy4zn14w&sig2=k9bSuVLXgz0BesndorhMnw>

CAGRI, Gorken y BURAK Sengoz. Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime. Dokuz Eylul University, Izmyr, Turkey. Disponible [En línea]: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061808003486>

CARREÑO, Ricardo y REYES, Jesus. Estudio del efecto de aditivos reductores de temperaturas de trabajo, en el desempeño de mezclas bituminosas Gap-Graded elaboradas con asfaltos modificados con grano de caucho reciclado. Universidad Católica de Colombia. Bogotá D.C. 2015.. Disponible [En línea]: <http://repository.ucatolica.edu.co/jspui/bitstream/10983/2580/1/Efecto-aditivos-reductores-temperaturas-de-trabajo.pdf>

CHEN, Xingwei y HUANG, Baoshan. Evaluation of moisture damage in hot mix asphalt using simple performance and superpave indirect tensile tests. Construction and Building Materials. 2008. Volumen 22. Disponible [En línea]. <<http://www.sciencedirect.com.ugc.elogim.com:2048/science/article/pii/S0950061807001882>>

CUBILLOS, Estrella y GALEANO Camila. Análisis de la susceptibilidad al daño por humedad de una mezcla asfáltica para rodadura empleando asfaltos sumergidos. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. (2013). Disponible [En línea]:

<http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/12685/1/NunezGaleanoCamilaEugenia2013.pdf>

EPPS, Jon. Use of recycled rubber tires in highways. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). Synthesis of Highway Practice 198. Transportation Research Board. Washington D.C. 1994. 2010. Disponible [En línea]: http://www.asphaltrubber.org/ARTIC/Reports/RPA_A1021.pdf

Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta. (I.N.V.E – 725 – 07). Bogotá. Disponible [En línea]: ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-725-07.pdf.

GUTIÉRREZ, Fernando. Rediseño geométrico del distribuidor vial de la UDLA – P en la ruta Quetzalcóatl. Universidad de las Américas Puebla. México. 2004. Disponible [En línea]: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/gutierrez_g_f/capitulo_3.html

HERNÁNDEZ, Hugo; MOLINA, Everth y REYES, Cristian. Propuesta de elaboración de un manual práctico para el control de calidad en el mantenimiento de pavimentos asfálticos. El Salvador. 2007. Cap. 2. Disponible [En línea]: http://www.univo.edu.sv:8081/tesis/018150/018150_Port.pdf

INSITUTO DE DESARROLLO URBANO. Especificación Técnica: Cemento asfáltico. Bogotá. IDU Sección 200-11. Disponible [En línea]: http://app.idu.gov.co/espec_tecnicas/Capitulo_2/200-11.pdf

INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Especificación Técnica: mezclas asfálticas en caliente densas, semidensas, gruesas y de alto módulo. Bogotá. Sección 510-11-IDU. Disponible [En línea]: http://app.idu.gov.co/espec_tecnicas/Capitulo_5/510-11.pdf

INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Especificación Técnica: mezclas asfálticas en caliente densas, semidensas, gruesas y de alto módulo. Bogotá. IDU Sección 560-11. Disponible [En línea]: http://app.idu.gov.co/espec_tecnicas/Capitulo_5/560-11.pdf

KANITPONG, Kunnawee y BAHIA, Hussain. Evaluation of HMA moisture damage in Wisconsin as it relates to pavement performance. International Journal of Pavement Engineering. Vol. 9. Washington D.C. 2008. Disponible [En línea]

<https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjvkvYL8KTLAhWD9x4KHYQeBcoQFggrMAI&url=http%3A%2F%2Fdocs.trb.org%2Fprp%2F06-1605.pdf&usg=AFQjCNEdtGepczwb3AjnodNyRKKFbsnlw&sig2=3caZHbKSBO07JuRHQNvcew>.

MAXIL, Roberto y SALINAS, Marco. Ventajas y Desventajas del Uso de Polímeros en el Asfalto. Universidad de las Américas Puebla. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. México. 2006. Disponible [En línea]: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/maxil_c_r/capitulo_2.html#.

MUNERA, Juan y OSSA Alexander. Estudio de mezclas binarias Asfalto – Polímero. Escuela de ingeniería. Universidad EAFIT. Medellín, Colombia. Disponible [En línea]: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-62302014000100003&script=sci_arttext

PLAZA, Sara y RINCON, Gina. Estudio de la susceptibilidad al daño por humedad de una mezcla asfáltica para rodadura utilizando asfalto 80-100 y su relación con el desempeño de campo. Pontificia Universidad Javeriana. Tesis de Maestría. Bogotá. 2014. Disponible [En línea]: <http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/12696/1/PlazaTorralvoSaraCatherine2014.pd>

PONTIFICA UNIVERSIDAD JAVERIANA. Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder Colombia. 2015. p. 2. Disponible [En línea]: <http://www.asphaltrubberitalia.com/wp-content/uploads/2013/05/Standard-Specification-for-Asphalt-Rubber-Binder.pdf>.

REYES, Fredy; MADRID, María y SALAS, Sandra. Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80-100). Pontificia Universidad Javeriana. Infraestructura Vial. Bogotá. 2007. Disponible [En línea]: <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/2063/2026>

RONDON, Hugo; MOLANO, Yennifer y TENJO Angélica. Influencia de la Temperatura de Compactación Sobre la Resistencia Bajo Carga Monotónica de Mezclas Asfálticas Modificadas con Grano de Caucho Reciclado de Llantas. Instituto Tecnológico Metropolitano. Medellín, Colombia. Tecno-Lógicas, N 29. (2012). Disponible [En línea]: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=344234330002>

SOTELO, Victor y GUTIERREZ, Alvaro. Métodos prácticos para determinar la sensibilidad al agua en las mezclas asfálticas. Revista vías terrestres. Edición No 17. México D.F. 2012. Disponible [En línea]: http://www.amivtac.org/assets/files/magazine/9992_VT17.pdf