



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE DIFERENTES ADITIVOS APLICADOS
EN UNA MEZCLA MDC - 19

AUTORES:

NOMBRE: JHOANA STHEPANY ÁVILA PARRA **CÓDIGO:** 505894
NOMBRE: EDISON FERNANDO VELASCO DÍAZ **CÓDIGO:** 506972

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTÁ D.C.

2021



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE DIFERENTES ADITIVOS APLICADOS
EN UNA MEZCLA MDC - 19

AUTORES:

NOMBRE: JHOANA STHEPANY ÁVILA PARRA CÓDIGO: 505894

NOMBRE: EDISON FERNANDO VELASCO DÍAZ CÓDIGO: 506972

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL**

ASESOR:

PHD. JUAN CARLOS RUGE CÁRDENAS

ASESOR EXTERNO:

PHD. CARLOS JOSE SLEBI ACEVEDO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTÁ D.C.



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](#). [Advertencia](#).

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales.



SinDerivadas — Si remueve, transforma o crea a partir del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>

Nota de Aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C, 2021

DEDICATORIA

Quiero dar un agradecimiento a mi familia, en especial a mis padres Flor y Luis, que han estado para mí incondicionalmente, sin ellos no hubiera sido posible llegar a la meta. A mis hermanos Alejandra y Felipe, que han sido un gran apoyo en esta etapa de mi vida que hoy culmina. También quiero agradecer a mis abuelos Efraín y Rosalía que siempre han estado en los momentos más importantes de mi vida apoyándome y brindándome todo su amor. Finalmente, le doy gracias a mis amigos por siempre creer en mí. Los amo a todos.

Jhoana Sthepany Ávila Parra.

Dedico este trabajo a dios, por acompañarme y guiarme en este largo camino, por haberme dado la vida y permitirme haber llegado hasta este anhelado momento. A mis padres Gregorio Velasco y Teresa Díaz, por ser los pilares fundamentales de este proceso, por darme siempre cariño y apoyo. A mis hermanos Nicolás, Karol, Yulieth y Carlitos, por estar siempre a mi lado, mostrándome su amor y alegría, por acompañarme durante toda la vida, los amo. A mi tía Flor Velasco por estar siempre a mi lado, finalmente a mis compañeros con los que compartí y viví esta gran experiencia.

Edison Fernando Velasco Díaz.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, le agradecemos a dios, por ser nuestro motor, por darnos la motivación y la fuerza para culminar este trabajo. Agradecemos al ingeniero Juan Carlos Ruge Cárdenas por acompañarnos en este proceso.

Por otro lado, damos infinitas gracias a nuestro asesor externo, el Ingeniero Carlos José Slebi Acevedo, por compartir su valioso conocimiento con nosotros, por su paciencia, por su orientación, por los consejos y también por tener siempre la mejor disposición al responder nuestras dudas, nos sentimos honrados que nos haya permitido trabajar con él.

También le queremos agradecer a los técnicos de laboratorio de la universidad, Hugo Alfonso Rondón y Manuel Daza, por su apoyo y conocimiento en cada una de las prácticas que se realizaron para la ejecución de esta investigación. Así mismo, le agradecemos al Ingeniero Daniel Andrés López Sabogal quien fue nuestro docente y siempre nos brindó su apoyo y nos dio grandes consejos en el transcurso de nuestra carrera.

Finalmente, agradecemos a todos los docentes que nos acompañaron a lo largo de nuestra carrera; a nuestros compañeros y sobre todo a nuestras familias por su apoyo incondicional.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	14
ABSTRACT	16
1. INTRODUCCIÓN	18
2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	20
3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	25
4. ESTADO DEL ARTE	27
5. MARCO DE REFERENCIA	41
5.1 MARCO TEÓRICO	41
5.1.1 <i>Mezclas asfálticas.</i>	41
5.1.2 <i>Componentes de la mezcla asfáltica.</i>	43
5.1.2.1 Asfalto.....	43
5.1.2.2 Agregados pétreos.....	44
5.1.3 <i>Tipos de mezclas asfálticas.</i>	44
5.1.4 <i>Mezcla asfáltica densa caliente – HMA.</i>	45
5.1.5 <i>Aditivos.</i>	47
5.1.6 <i>Tipos de aditivos.</i>	48
5.1.7 <i>Ensayos experimentales.</i>	52
5.1.8 <i>Método Marshall.</i>	52
5.2 MARCO LEGAL	53
6. OBJETIVOS	56
6.1 OBJETIVO GENERAL	56
6.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	56
7. ALCANCES Y LIMITACIONES	57
7.1 ALCANCE.....	57
7.2 LIMITACIONES	57

8. METODOLOGÍA	58
8.1 CONTEXTUALIZACIÓN	58
8.1.1 <i>Etapa 1: Revisión literaria.....</i>	59
8.2.2 <i>Etapa 2: Diseño óptimo de mezcla control (Método Marshall). ...</i>	59
8.3.3 <i>Etapa 3: Diseño de mezcla modificada con diferentes aditivos... </i>	60
8.3.4 <i>Etapa 4: Evaluación experimental.</i>	60
8.3.5 <i>Etapa 5: Análisis de resultados.</i>	61
8.2 MATERIALES Y PREPARACIÓN DE ESPÉCIMENES	61
8.3 DISEÑO DE MEZCLAS.....	66
8.4 ENSAYOS EXPERIMENTALES	70
9. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	75
9.1 FASE PRELIMINAR.....	75
9.2 DISEÑO DE MEZCLA CONTROL MDC-19.....	82
9.2.1 <i>Propiedades volumétricas.</i>	83
9.2.2 <i>Ensayo Marshall.</i>	84
9.2.3 <i>Porcentaje óptimo de asfalto.</i>	85
9.3 ENSAYOS EXPERIMENTALES DE MEZCLAS MODIFICADAS ...	90
9.3.1 <i>Propiedades volumétricas.</i>	90
9.3.2 <i>Ensayo Marshall.</i>	94
9.3.3 <i>Ensayo de Tracción Indirecta.</i>	98
9.3.4 <i>Ensayo Cántabro.</i>	103
10. CONCLUSIONES	108
11. RECOMENDACIONES.....	110
12. REFERENCIAS	111
13. ANEXOS.....	119
ANEXO A- REGISTRO FOTOGRAFICO	119
ANEXO B- DATOS REGISTRADOS Y OBTENIDOS.....	126

ANEXO C- FORMATO DE ESTIMACIÓN DE TIEMPOS. 148

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización del asfalto.....	61
Tabla 2. Caracterización de los agregados.....	63
Tabla 3. Granulometría de los agregados.....	64
Tabla 4. Características de los aditivos utilizados.....	65
Tabla 5. Resumen de ensayos a realizar.....	67
Tabla 6. Porcentaje de aditivos.....	67
Tabla 7. Dosificación en porcentaje de cada mezcla	68
Tabla 8. Dosificación en g de cada mezcla.....	68
Tabla 9. Investigaciones en los últimos años para los diferentes aditivos. .	75
Tabla 10. Propiedades volumétricas, gravedad máxima teórica y densidad Bulk para cada porcentaje de asfalto.....	84
Tabla 11. Valores de estabilidad, flujo y relación E/F corregidos.....	85
Tabla 12. Características del porcentaje óptimo de asfalto.	89
Tabla 13. Criterios para el diseño de una mezcla asfáltica con gradación continua por el método Marshall.....	89
Tabla 14. Densidades Bulk para cada tipo de mezcla.	90
Tabla 15. Verificación de los criterios de VA, VAM Y VFA para un NT2.	93
Tabla 16. Verificación de los criterios de estabilidad, flujo y relación estabilidad flujo para un NT2.	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metodología utilizada en la investigación.....	58
Figura 2. Curva granulométrica MDC-19.	64
Figura 3. Probetas realizadas.	66
Figura 4. Adición de los aditivos en la mezcla.	69
Figura 5. Proceso de fabricación de briquetas.....	83
Figura 6 . Densidad Bulk vs Contenido de asfalto.	86
Figura 7. Vacíos de aire(a), vacíos del agregado mineral (b) y vacíos llenos de asfalto (c).	87
Figura 8. Estabilidad (a), flujo (b) y relación E/F (c).	88
Figura 9. Vacíos de aire en cada una de las mezclas.....	91
Figura 10. Vacíos en el agregado mineral en las diferentes mezclas.	92
Figura 11. Vacíos llenos de asfalto en las diferentes mezclas.....	92
Figura 12. Probetas después del ensayo Marshall.	94
Figura 13. Estabilidad en las diferentes mezclas.	95
Figura 14. Flujo en las diferentes mezclas.....	96
Figura 15. Relación E/F en las diferentes mezclas.	97
Figura 16. Ensayo de tracción indirecta.....	99
Figura 17. Resistencia a la tensión y relación de resistencias a la tensión en las diferentes mezclas.	100

Figura 18. Daño por humedad en la mezcla con adición de cal hidratada.
..... 101

Figura 19. Daño por humedad en la mezcla de fibra de coco..... 102

Figura 20. Pérdida por desgaste en las diferentes mezclas. 103

Figura 21. Porcentaje de pérdida a diferentes revoluciones por minuto. . 105

Figura 22. Porcentaje de pérdida a 300 RPM en las diferentes mezclas. 106

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Gravedad máxima teórica.	70
Ecuación 2. Densidad Bulk.	71
Ecuación 3. Calculo de Vacíos en el agregado mineral.	71
Ecuación 4. Calculo de vacíos llenos de asfalto.	71
Ecuación 5. Relación de resistencias a tensión.	73
Ecuación 6. Cálculo pérdida de desgaste.	73

RESUMEN

Debido al constante cambio climático y la alta demanda del parque automotor, así como también el crecimiento exponencial del tráfico, en la actualidad se ha visto la necesidad de experimentar e incluir nuevos materiales para mejorar la resistencia mecánica en las mezclas bituminosas. El uso de nuevos aditivos resulta una interesante alternativa para reducir los diferentes daños generados por las cargas de tráfico, el clima y cualquier otro agente; mejorando el desempeño de la mezcla y así mismo prolongando la vida útil de estas.

En la presente investigación se evaluaron distintos aditivos en una mezcla densa en caliente de tamaño máximo nominal de 19 mm (MDC-19). Los aditivos seleccionados como modificadores de las mezclas bituminosas fueron: cal hidratada (CH), fibra de coco (FC), fibra de polipropileno (PP) y grano de caucho reciclado (GCR). Los porcentajes de cada aditivo se establecieron con base en la revisión literaria previamente realizada. Un total de 72 probetas de asfalto fueron fabricadas; 12 para determinar el contenido de asfalto óptimo empleando la metodología Marshall y los 60 restantes para la evaluación experimental de las mezclas bituminosas. Los ensayos experimentales realizados fueron: Ensayo Marshall, Ensayo de tracción indirecta y ensayo de pérdida de partículas; estos siguiendo la normativa INVIAS.

De los resultados experimentales, se observó que la mezcla modificada con CH fue el aditivo más favorable y prometedor en la mezcla asfáltica densa en caliente, esto debido a que presenta mejoras en el comportamiento mecánico ya que tiene una mayor resistencia a la deformación además de una buena estabilidad y un menor daño por humedad, esto resulta una buena alternativa para el desempeño general en la mezcla.

Finalmente, en este estudio se recomienda como futuras líneas de investigación ampliar el espectro de dosificaciones de los aditivos, así como el empleo de distintos tipos de betún asfáltico. Además, la incorporación de nuevos tipos de aditivos resulta ser un campo de estudio de amplio interés en el mundo de las mezclas bituminosas.

ABSTRACT

Due to the constant climate change and the high demand of the vehicle fleet, as well as the exponential growth of traffic, there is now a necessity to experiment and include new materials to improve mechanical resistance in bituminous mixtures. The use of new additives is an interesting alternative to reduce the different damages generated by traffic loads, climate and any other agent; improving the performance of the mixture and prolonging the useful life of these.

In the present investigation, different additives were evaluated in a hot dense mixture with a maximum nominal size of 19 mm (MDC-19). The additives selected as modifiers of the bituminous mixtures were: hydrated lime (CH), coconut fiber (FC), polypropylene fiber (PP) and grained crumb rubber (GCR). The percentages of each additive were established based on the literary review previously performed. A total of 72 samples were manufactured; 12 were made to determine the optimum asphalt content using the Marshall methodology and the remaining 60 were made for the experimental evaluation of the bituminous mixtures. The experimental tests carried out were: Marshall test, indirect tension test and particle loss test; these following the INVIAS regulations.

From the experimental results, it was found that the modified mixture with CH was the most favorable and promising additive in the hot dense asphalt mixture, This is because it presents improvements in mechanical performance as it has greater resistance to deformation in addition to good stability and less moisture damage, this is a good alternative for the overall performance in the mixture.

Finally, in this study it is recommended as future research lines to expand the range of dosages of additives, as well as the use of different types of asphalt bitumen. In addition, the incorporation of new types of additives is a field of study of wide interest in the world of bituminous mixtures.

1. INTRODUCCIÓN

La mezcla asfáltica densa, también denominada concreto asfáltico a nivel internacional o Hot mix asphalt (por sus siglas en inglés HMA) es un tipo de mezcla bituminosa de granulometría densa cuyos componentes principales son el ligante asfáltico y agregados pétreos. La combinación de estos materiales ha sido ampliamente utilizada para la construcción de diversas vías, carreteras y autopistas. Su uso remonta del año de 1810 donde eran usadas para la pavimentación de vías en ciudades de Francia como Burdeos y Lyon[1]. En 1850 los países de Inglaterra y Estados Unidos pavimentaron sus vías con mezclas de materiales áridos, rocas asfálticas y asfaltos naturales, pero fue solo hasta la última década del siglo XIX donde se constituyeron las bases de la tecnología de las mezclas asfálticas para la pavimentación. Gracias a los conflictos humanos de la primera y segunda guerra mundial, se dio inicio a la producción industrializada de estas mezclas, pues eran los principales componentes para la construcción de aeródromos militares. [2]

La mezcla asfáltica al estar expuesta a las constantes variaciones del cambio climático, y frecuentes cargas de los vehículos, ésta se tiende a desgastar afectando sus propiedades de resistencia y durabilidad, presentando problemas como ahuellamiento y fatiga y de esta manera haciendo que su vida útil disminuya provocando problemas de movilidad en las vías. Lo anterior lleva a que se afecte de un modo u otro al desarrollo de un país, puesto que una red vial en excelentes condiciones de servicio contribuye notablemente en el desarrollo económico y social de un país.

Es por tal motivo que ha surgido la necesidad de usar aditivos por parte de los ingenieros e investigadores. En la actualidad existe una gran cantidad de estos, los cuales modifican las propiedades físicas y químicas de la mezcla bituminosa. A la fecha, se han estudiado una gran variedad de ellos, pero en

sí, no se tiene una cierta claridad de cuál de estos es el mejor que actúa en las mezclas. De ahí la finalidad de esta investigación, la cual busca evaluar experimentalmente distintos aditivos, analizando sus efectos en la mezcla asfáltica densa, y de este modo poderlos comparar y analizar, creando una prelación de los mismos, que permita visualizar cuál de esta mejora las propiedades de la mezcla.

2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

El progreso económico de un país está directamente conectado al desarrollo de sus vías. Un país que posea vías en buen estado puede llegar hacer que su interconectividad sea más eficiente y, esto a su vez permite el flujo de bienes, productos y servicios haciendo que la economía de un país prospere. Unos de los pilares que evalúa el foro mundial de economía en su informe anual de competitividad es la infraestructura del transporte donde evalúan conectividad de carreteras, calidad de la infraestructura vial, conectividad y eficiencia de puertos y aeropuertos. En el informe de 2019 [3] presentado por el Foro Económico Mundial (FEM), se ubica a Colombia en este pilar en el puesto 81 de 141 países que analizan. En el aspecto de conectividad vial la ubican en el puesto 97 y en el aspecto de calidad de infraestructura vial la ubican en el puesto 104, si bien Colombia no ocupa los últimos lugares, si se encuentra muy debajo de la lista. Lo anterior se lo podemos atribuir a varios factores como lo pueden ser: la falta de políticas de mantenimiento, la falta de recursos, la mala gestión en la ejecución de las obras, el uso indebido de malos materiales, entre otros.

Además del FEM la Organización para la cooperación y el desarrollo económico (OCDE), en su informe de 2019 indica que el producto interno bruto de Colombia (PIB) creció un 3.4%[4] teniendo una variación positiva en comparación a años anteriores, el sector de la infraestructura por medio de la construcción de vías y concesiones apporto un porcentaje del 10.7%[5] al PIB del país en el 2019 siendo una cifra de gran valor para el desarrollo económico, con lo anterior se puede afirmar que el PIB y la economía de un país van ligados a que tan buena es su infraestructura vial.

Los países con PIB elevados, cuentan con una amplia calidad en su infraestructura de transporte, esto también lo podemos ver en el informe que realiza el FEM, los países que ocupan los primeros lugares en su estudio de

competitividad cuentan con una excelente calificación en las variables de calidad y conectividad. Estos parámetros además de evaluar la calidad vial, también pueden ser vistos como medidas de inversión, grandes corporaciones y organizaciones miran a países en desarrollo como puntos fijos de inversión extranjera que se pueden dar por medio de concesiones viales, esto con el fin de generar un lucro para ellos y ayudar al desarrollo vial del país.

La institución encargada de manejar y dictar las políticas, normas y estrategias para el desarrollo vial de Colombia es el Instituto nacional de vías (INVIAS), en su estado de red vial del primer semestre del 2020 nos indica que el país cuenta con un porcentaje de vías pavimentadas del 80.98% [6], y un porcentaje de vías no pavimentadas del 18.67%, lo cual nos dice que el país cuenta con más de su mitad de red vial pavimentada. En el total de la red pavimentada, el 52.58% se encuentra en buen estado, lo que nos lleva a decir que Colombia cuenta con una red vial modesta, pues no es tan amplia, pero si lo suficiente para mantener su desarrollo económico. Finalmente, al analizar todo lo anterior, claramente se puede ver la clara relación de las vías y el crecimiento económico de un país.

El propósito de los aditivos es mejorar las propiedades internas de las mezclas asfálticas, por tal razón existe una gran variedad de ellos puesto que cada uno mejora una o varias propiedades de la mezcla. En la actualidad, existe una gran cantidad de estudios relacionados con trabajos experimentales utilizando aditivos, de cualquier tipo como fibras [7] y polímeros[8], entre otros.

A continuación, se muestran algunos estudios acerca del desempeño de la HMA ante varios productos sintéticos:

- La asociación de tecnólogos de pavimentación de asfalto (AAPT) realizó un estudio mediante ensayos de laboratorio utilizando cinco aditivos diferentes, (látex, caucho de copolímero en bloque, acetato de etileno y vinilo, polietileno), el objetivo principal de los ensayos era buscar cual era la mezcla modificada que mejor redujera las probabilidades de agrietamiento y ahuellamiento. El programa de laboratorio consistía en evaluar la rigidez, la fragilidad y flexibilidad de las mezclas ante cambios de temperatura, evaluando diferentes cargas vehiculares. La investigación consistió en identificar sistemáticamente tipos de aditivos asfálticos diseñados para reducir la deformación plástica y el agrietamiento en pavimentos asfálticos. Las mezclas asfálticas con y sin aditivos fueron probadas en el laboratorio para determinar las propiedades químicas, reológicas, elásticas, de fractura y térmicas, así como la sensibilidad al calor y la oxidación y la compatibilidad entre asfaltos y aditivos. Además, se determinó la estabilidad, compactibilidad y susceptibilidad al agua, así como las propiedades de rigidez, tracción, fatiga y fluencia en función de la temperatura. En general todos los aditivos mejoraron las propiedades de la mezcla, pero hubo pequeñas diferencias en las pruebas de deformación, puesto que el látex hacía que la mezcla no aguantara la de formación a altas temperaturas y el polietileno tampoco resistía la deformación a bajas temperaturas, en cuanto a la fatiga los aditivos que mejor actuaron fueron los de acetato de etileno y vinilo y el caucho de copolímero [9].
- Los aditivos que se usan para mitigar el daño interno de la mezcla a causa del agua, se conocen como aditivos anti-stripping, dentro de estos podemos encontrar los aditivos líquidos y cal hidratada, existen varios registros de estudios de cal hidratada como aditivo, en 1968 se examinó el efecto de agregar cal a la mezcla bituminosa y a los

agregados, hallando que se mejora la adhesión entre los agregados y el asfalto y la resistencia al desprendimiento del ligante. Este método permite que los tiempos de fraguados sean más cortos. En 1987 Mohammed Al-Jarilla y Kang Lee, estudiaron también la adición de cal hidratada para aliviar los problemas de desprendimiento de áridos, en su estudio utilizaron asfaltos saudíes y agregados locales, y concluyeron que la lechada de cal fue era más efectiva para contrarrestar este fenómeno [10].

- En 1988 David Hopkins desarrollo un método para mejorar la resistencia, estabilidad y resistencia al agua de los pavimentos de concreto asfáltico. Los aditivos que utilizó para este estudio fueron compuestos orgánicos metálicos como: el manganeso, cobre, cobalto, vanadio, hierro, circonio entre otros muchos, como finalidad del estudio se obtuvo que, gracias a lo medido por el ensayo de Marshall, la resistencia, la estabilidad y la resistencia al agua mejoraron al adicionar estos compuestos como aditivos [11].
- El uso de fibras en asfalto de mezcla caliente (HMA) se ha convertido en una alternativa mucho más atractiva para la construcción de pavimentos de carreteras muchos estudios han demostrado que la incorporación de fibras en la mezcla mejora la resistencia a la fatiga, la deformación permanente y la rigidez. Las propiedades físicas más relevantes a tener en cuenta para el análisis adecuado de las fibras son: resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, gravedad específica y dureza Mohs. Estas características tienen una influencia directa en el aglutinante y el rendimiento de la mezcla. La interconexión generada entre agregados y fibras permite que el material resista energía de tensión adicional antes de que se produzca el agrietamiento [7].

Con base en lo anterior, se puede analizar que existe una infinidad de aditivos que tienen como propósito común mejorar las propiedades intrínsecas de la mezcla asfáltica densa en caliente y esto a su vez permite que las vías, autopistas y carreteras sean más duraderas y resistentes. El auge en el uso de aditivos se puede atribuir a estas razones:

1. Existe una gran demanda por pavimentos HMA, debido al aumento del tráfico en los últimos años, lo que hace que este tenga que resistir una mayor carga de tráfico.
2. La mezcla asfáltica debe soportar una variabilidad de bajas y altas temperaturas, por lo tanto, debe adaptarse a su entorno.
3. La responsabilidad de instituciones locales y nacionales encargadas del diseño y mantenimiento de la red vial, necesitan tener una red vial duradera, en excelentes condiciones.

Por todas las razones anteriores, se realizó esta investigación, la cual por medio de trabajo experimental ejecutó un análisis entre diferentes tipos de aditivos para que al final se pudiera determinar cuál de los aditivos seleccionados fue el que mejor actuó en la mezcla asfáltica.

3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Las mezclas asfálticas es uno de los componentes principales para la construcción de vías terrestres; estas son de gran importancia para el desarrollo en las comunicaciones, deben ser de alta calidad y cumplir con condiciones óptimas para su tránsito.

El comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas depende no solo de cargas que debe soportar sino también de factores como cambios bruscos de temperatura, severas condiciones climáticas y esfuerzos cortantes y tangenciales generados por las cargas del tráfico[2]. Es por eso que, la principal finalidad en las mezclas es que estas deben ser capaces de soportar las cargas debidas al paso repetitivo de vehículos y, deben soportar los cambios producidos por acciones del medio ambiente. Debido a lo anterior, las mezclas asfálticas deben satisfacer algunos requerimientos mínimos y deben contar con características como la resistencia a la fatiga, al deslizamiento y resistencia a la durabilidad. Además, también debe cumplir con funciones que le permitan evitar que la estructura se vea afectada por diferentes factores como lo son el agua, la temperatura y la inestabilidad del suelo en el que se encuentra la mezcla.

Sin embargo, las mezclas asfálticas no siempre son capaces de soportar las cargas debidas a la acción al tráfico ni tampoco a las condiciones climáticas en las que se encuentran, es por eso que se ha visto la necesidad de mejorar las características y propiedades de estas por medio de la aplicación de aditivos. La utilización de los aditivos ha demostrado la gran capacidad para mejorar el comportamiento de las mezclas, y así mismo, ha aumentado la vida útil de estas. Actualmente, existe una amplia gama de aditivos que mejoran las propiedades en las mezclas asfálticas y es por eso que se ha estudiado el comportamiento de estos al ser aplicados en las mezclas; sin embargo, no se tiene claro cuál es el que más aporta y mejora las condiciones

y propiedades. Tampoco se ha realizado un análisis para comparar los precios de los diferentes aditivos y la facilidad de encontrarlos en el mercado.

Debido a la problemática planteada anteriormente, acerca de las mezclas asfálticas y los aditivos que se utilizan para mejorar las condiciones de estas, se formula siguiente pregunta: ***¿Cuál es el aditivo más favorable y prometedor en las mezclas asfálticas?***

4. ESTADO DEL ARTE

A continuación, se presentan las diferentes investigaciones que se han realizado respecto al comportamiento de los diferentes aditivos en la mezcla asfáltica densa:

- **ESTUDIOS E INVESTIGACIONES DE ADITIVOS ANTI-STRIPPING EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS DENSAS**

Debido al deterioro por el daño de humedad en las mezclas asfálticas en caliente se ha investigado a cerca de este fenómeno; los agentes anti-stripping son ampliamente usados para minimizar la susceptibilidad a la humedad en las mezclas asfálticas. Esta investigación tuvo como finalidad analizar el efecto del agente anti-stripping en las mezclas asfálticas, ya que estos agentes tienen como función principal eliminar la sensibilidad a la humedad que se presenta en las mezclas y de igual manera reducir el proceso de deterioro, además de mejorar su rendimiento y aumentar la vida útil.

Los ingenieros hindúes Ravi Shankar, Lekha BM y Calvin Carlton, del Instituto Nacional de Tecnología de Karnataka, ubicado en India, realizaron una investigación en donde utilizaron cal hidratada y Zycosoil, un compuesto orgánico. Se analizaron tres tipos de mezcla: mezcla sin aditivos, mezcla con cal hidratada y por último mezcla con Zycosoil; en los tres tipos de mezclas se usó un betún convencional con un grado de viscosidad de 30; para el diseño de mezcla se empleó la metodología Marshall, estas se prepararon con un contenido de betún de 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5 y 7.0% por peso de la mezcla.

El objetivo principal del estudio fue determinar el grado de susceptibilidad por humedad y la estabilidad que existe en las mezclas modificadas con agentes antideslizantes, esto comparándolo con las mezclas sin modificar.

Para cada una de las muestras se determinaron las características volumétricas y las características Marshall, con estas se obtuvo el contenido óptimo de ligante para cada una de las mezclas. Por otro lado, se realizaron ensayos de laboratorio en los tres tipos de muestra de estabilidad y flujo Marshall, tracción indirecta y prueba de estabilidad de fluencia. En estos ensayos se determinó que la estabilidad Marshall en la mezcla con cal y Zycosoil aumentan de un 10 a 19%; así mismo la relación de estabilidad en las mezclas modificadas con los diferentes aditivos aumento ya que en la mezcla sin aditivos se presentó una relación de estabilidad del 80% mientras que en la mezcla de cal es de 89% y con la de Zycosoil se tiene un 92%. La investigación dio como resultado que las mezclas asfálticas modificadas con el uso de aditivos anti-stripping mejora sus propiedades en especial la resistencia a la humedad en la mezcla. Tanto la cal como el Zycosoil brindaron resultados similares, esto se presentó cuando la mezcla modificada con cal contenía un 2% de adición de la misma respecto al peso de los agregados y la mezcla modificada con Zycosoil contenía un 1% respecto al peso del betún, este último después de diluir el metanol. Finalmente, se concluyó que al adicionar agentes anti-stripping en la mezcla la estabilidad Marshall aumenta significativamente, además, también se concluye que la adición de agentes anti-stripping reduce ligeramente el volumen de vacíos cuando se tiene un contenido óptimo de betún[12].

- **COMPORTAMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS CON ADICIÓN DE FIBRAS**

En esta investigación realizada por Reyes, Troncoso y Reyes [13] en el año 2005, se pretendió analizar el comportamiento de las mezclas asfálticas al adicionar las fibras, esto por medio de ensayos experimentales. Para el estudio inicialmente se caracterizó el material granular realizando la respectiva granulometría y el asfalto se caracterizó por medio de la metodología Marshall.

Para la investigación se usó la granulometría denominada 0/10, la cual es empleada según el reglamento técnico vial para la ejecución de obras en el sector vial de Bogotá. Para el análisis se usaron fibras de monofilamentos cortados las cuales son utilizadas según Alfa (2003) como refuerzo secundario en las placas de concreto, este posee un índice de fluidez a 230°C de 18 g/10 min, la resistencia máxima a la tracción (50mm/min.) es 5250 psi (36 Mpa). Se usó asfalto 60/70 proveniente de Barrancabermeja con ductilidad de 125 cm, viscosidad de 1500 y ablandamiento a 45°C.

Se desarrolló la investigación caracterizando el material pétreo, las fibras y el asfalto que se usó, después de esto se realizó el diseño Marshall con el cual determinaron el porcentaje óptimo del asfalto; posteriormente se modificaron las mezclas con las fibras en porcentajes de 0.15%, 0.30%, 0.45%, 0.60% y 0.75% respecto al peso de los agregados, y finalmente se construyeron probetas para los ensayos de modulo dinámico, ahuellamiento y Marshall. Para cada porcentaje de adición y ensayo se construyeron dos probetas a diferente densificación, 50 y 75 golpes.

En los resultados se observó que en la adición de 0.60% y 0.75% de fibra se presenta un incremento de estabilidad en las probetas compactadas a 50 y 75 golpes, este incremento alcanzo su máximo valor 26% y 28%

respectivamente. Por otro lado, se determinó que se presentó un descenso del 9% en para el porcentaje del 0.45% compactado con una energía de 75 golpes. Al analizar la densidad en la mezcla asfáltica, se determinó que esta disminuye gradualmente al adicionar fibras y de igual manera disminuye la cantidad de material a usar con un incremento proporcional de la mezcla asfáltica.

Para el análisis de la relación estabilidad flujo se tomó como base la mezcla sin adición de fibra para establecer los límites superior e inferior de la relación, esta relación se toma con el 0.9 del valor de la estabilidad y el 0.85 y 1.15 del valor del flujo. Se determinó el comportamiento positivo en la adición de 0.60% de fibras al estar en el rango donde la mezcla asfáltica no va a ser tan dúctil como para presentar problemas de deformación, y tampoco va a ser tan frágil para presentar fisuración prematura por una alta rigidez.

De acuerdo a los resultados se demostró que las fibras generan un efecto positivo en las mezclas asfálticas; se concluyó que la deformación permanente disminuye en 27.6% para una adición de fibras de 0.60% y 48.8% para la adición de fibras de 0.75%, respectivamente. El porcentaje de 0.60% es el porcentaje óptimo de adición. También se determinó que el porcentaje óptimo aumenta la estabilidad Marshall y así mismo este mantiene la rigidez en las mezclas[13].

En la investigación realizada por Panda et al en el año 2013, se utilizó fibra de coco en mezclas asfálticas SMA para determinar el comportamiento y la ventaja de utilizar estas fibras. En la investigación se evaluaron propiedades Marshall, características de resistencia a la tracción indirecta de carga estática y repetida y las características presentadas por el daño por humedad.

Para el estudio se usaron adoptaron agregados según la clasificación del Nacional Cooperative Highway Research Project (NCHRP); para el relleno se

utilizó cemento de escoria portland de grado 43, este fue obtenido del mercado local. Por otro lado, se utilizaron dos aglutinantes: un betún convencional con grado de viscosidad de 30 y un betún modificado con polímero (CRMB 60). Para la fibra de coco se recolectaron cascaras de coco maduro, se secaron y se retiraron manualmente las fibras limpias; las longitudes de estas estaban en un intervalo de 75 a 200 mm y el diámetro variaba entre 0.2 y 0.6 mm. Se procedió a determinar la resistencia a la tracción de la fibra la cual determino que la resistencia a la tracción promedio de este material es de 70.58 kN/ mm², debido a esto se cortaron pequeños trozos de fibra entre 20 a 35 mm de longitud, para así asegurar una adecuada mezcla más homogénea de los agregados y el betún.

Las muestras para este estudio se diseñaron de acuerdo a la metodología Marshall. Las concentraciones de aglutinante variaron del 4% al 7% y las concentraciones de fibra de coco del 0%, 0.3%, 0.5% y 0.7% para evaluar los requisitos óptimos de aglutinante y fibra respectivamente para obtener la mejor mezcla posible. Se procedió a realizar los ensayos mencionados anteriormente para analizar los resultados.

De acuerdo a los resultados se determinó que en la estabilidad de Marshall el valor de la estabilidad, en términos de penetración aumenta en general con la rigidez. Además, se observó que con el aumento de contenido de fibra en la mezcla el valor de la estabilidad aumentaba hasta un 0.5 % del contenido de fibra y posteriormente disminuye, independientemente del aglutinante utilizado, esto se debe a que a mayor contenido de fibra es más difícil obtener homogeneidad y se tiende a una conglomeración de fibras. Por otro lado, en el valor del flujo se observó que este aumenta con el aumento del contenido de aglutinante y disminuye con el aumento de rigidez de este. Según MORTH, se recomiendan valores de flujo de 2 mm a 4mm para mezclas SMA [14].

Al comparar las variaciones que se presentaron de peso unitario y vacío de aire en los aglutinantes se observó que CRMB ofrece un peso unitario más alto en comparación con el betún convencional. Por otro lado, se determinó que la adición de fibras en las mezclas da como resultado una disminución de peso unitario y un aumento en los vacíos de aire. Para determinar el contenido óptimo de aglutinante se tuvieron en cuenta los parámetros de estabilidad Marshall ya que el valor del flujo no puede ser un parámetro adecuado para determinar este contenido. Además, también se tuvo en cuenta que MORTH sugiere que los vacíos de aire se deben encontrar entre el 2% y el 4% [14]. Debido a lo anterior se estimó el porcentaje óptimo de aglutinante en base al 3% de vacíos de aire en la mezcla. Se observó que, tanto para el betún convencional como para el CRMB, las mezclas con 0.7% de contenido de fibra quedan fuera de los criterios prescritos para vacíos de aire y, por lo tanto, no se consideró el uso de 0.7% de fibra en mezclas con cualquier aglutinante. También observo que la adición de 0.3% de fibra reduce considerablemente los vacíos de aire, lo que puede deberse a la formación de una mejor matriz en los vacíos de la estructura de agregado graduada con vacíos y, por tanto, a la prevención del drenaje del aglutinante.

En el ensayo de resistencia a la tracción en las mezclas SMA esta disminuye con el aumento de la temperatura. En general, a cualquier temperatura, las mezclas con fibra tienen mayor resistencia a la tracción que sin fibra. A temperaturas más bajas, las mezclas con CRMB 60 y fibra tienen menor resistencia a la tracción que las mezclas con aglutinantes VG 30, pero a temperaturas más altas, la misma mezcla da como resultado una resistencia a la tracción comparativamente más alta.

Finalmente se concluyó que la fibra de coco aumenta la estabilidad y el valor del peso unitario, reduce el flujo y los vacíos de aire de la mezcla. Se determinó que la adición del 0.3 % de fibra de coco es suficiente para mejorar las características Marshall, también se encontró que el CRMB muestra un

mejor rendimiento en las mezclas con fibras o sin fibras en comparación con el betún convencional [15].

En la investigación realizada por Ugur Niyazi y Kofteci Sevil [16] de la universidad del Mediterráneo (Turquía) en el año 2016, con el objetivo de determinar el comportamiento de la HMA modificada con fibras de polipropileno en diferentes proporciones por medio de trabajos experimentales en condiciones ambientales extremas y agresivas.

El betún utilizado en el estudio tenía un grado de penetración 50/70. Los autores definen al polipropileno como un polímero termoplástico ligero y resistente que se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones en diversas industrias.

Para este estudio se agregaron fibras de polipropileno en proporciones variables del 0%, 5%, 7.5 % y 10%, a la mezcla, para el diseño de la mezcla usaron el método Marshall, las fibras utilizadas tenían una longitud de 12 mm.

Para la simulación de los ambientes agresivos usaron soluciones acidas y ciclos de congelación-descongelación, estos últimos debido a que se considera una de las principales causas de la degradación prematura del asfalto. En cuanto a qué soluciones usar, observaron cuales se podrían encontrar en aguas subterráneas o aguas que penetran el pavimento.

Determinando así tres soluciones:

- Cloruro de calcio.
- Cloruro de sodio.
- EDTA disódico.

Las soluciones se prepararon con una concentración del 20%, y las muestras estuvieron durante 30 días sumergidas en estas. Para los ciclos de congelación y descongelación utilizaron agua en un gabinete de -20°C a $+20^{\circ}\text{C}$ durante 20 ciclos completados en 4 días.

Los resultados que obtuvieron después de exponer las mezclas a los dos ambientes, arrojaron que la densidad aparente de las muestras reforzadas con fibras era más alta que la de las muestras sin fibras. La densidad aparente más alta se obtuvo de la muestra modificada con 5% de fibras. Luego, se observó una ligera reducción en las muestras modificadas con el 10%. Los valores de absorción de agua y porosidad de las muestras mostraron un paralelismo. Por medio de vistas de microscopio óptico pudieron afirmar que todas las fibras se recubrieron con betún. Este resultado puede ser una prueba que demuestre que las fibras de las muestras funcionaron correctamente sin presentar segregación y / o aglomeración.

Finalmente, los autores concluyeron lo siguiente:

- La densidad aparente de las muestras de asfalto aumenta con el aumento del contenido de fibra en porcentajes de 0 a 7.5%.
- Los valores de flujo disminuían a medida que la cantidad de fibra de polipropileno aumentaba de 0 a 7.5%.
- La estabilidad de Marshall de las muestras de asfalto aumentaba con el contenido de fibra y alcanzó un valor óptimo al 7.5% de contenido de fibra y luego se redujo en un 10%.
- El sulfato de sodio fue la solución que más daño causó a las muestras.

En la investigación realizada por Piotr Jaskuła, Marcin Stienss y Cezary Szydłowski [17] en el año 2016 de la Universidad Tecnológica de Gdansk (Polonia). Se usaron fibras de aramida, las cuales son conocidas por su resistencia al calor. Para el diseño y preparación de mezclas se usó un betún puro de 50/70 y de acuerdo con las recomendaciones del fabricante, se agregaron fibras al agregado caliente con una tasa de dosificación de 0.05% en peso de mezcla asfáltica (0.5 kg de fibras por 1000 kg de mezcla asfáltica) antes de añadir betún.

Las mezclas modificadas se evaluaron en términos de su influencia en la resistencia al corte triaxial y a la resistencia a la deformación permanente, medida por los resultados de la prueba de fluencia dinámica, módulo dinámico, vida de fatiga, agrietamiento térmico y propagación de grietas. Una vez obtenidos los resultados, se concluyó que las fibras de aramida mejoran las características de rendimiento de las mezclas asfálticas, como la resistencia al agrietamiento por baja temperatura.

Los resultados obtenidos indican que el uso de fibras evaluadas en mezclas asfálticas puede mejorar su desempeño, especialmente en términos de resistencia al agrietamiento por baja temperatura. Para cada mezcla asfáltica probada, aumento la resistencia a la flexión, deformación crítica y reducción del módulo de rigidez a la flexión. Todas las mezclas asfálticas probadas con aplicación de fibras presentaron mayor energía de fractura en comparación con las mezclas convencionales.

El estudio del módulo dinámico de la mezcla modificada, confirmó la capacidad de mejorar las propiedades a bajas temperaturas. Los valores de módulo dinámico de esta mezcla para altas frecuencias reducidas fueron significativamente más bajos que valores similares para la mezcla convencional.

- **COMPORTAMIENTO DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO ASFALTICO CON POLIETILENO RECUPERADO**

En esta investigación realizada en el año 2007 por Punith y Veeraragavan, se analizó el desempeño en las mezclas asfálticas densas modificadas con polietileno recuperado derivado de las bolsas de uso doméstico, con este estudio también se pretendía analizar la susceptibilidad que se tiene a la humedad y a la temperatura de las mezclas asfálticas modificadas con polietileno.

Además, se analizó la viabilidad de usar PE en la mezcla asfáltica densa, esto con el fin de ayudar a reducir el impacto ambiental que el polietileno genera ya que este es un material no biodegradable.

Para el estudio se usaron pruebas variando las proporciones de PE en la muestra; los contenidos de PE en las muestras fueron de 2.5, 5.0, 7.5, y 10%. El asfalto que se uso fue de grado de compactación 80/100. Se realizaron ensayos de laboratorio de tracción indirecta, módulo resiliente fluencia dinámica no confinada y huella de rueda de Hamburgo. También, se evaluaron propiedades como la cizalla giratoria, índice GSI y factor de cizallamiento giratorio GSF.

Los resultados obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio realizados a la mezcla asfáltica modificada con PE se compararon con muestras de mezclas convencionales. En la prueba de maquina giratoria se muestran una deformación plástica menor y también una mayor resistencia al cizallamiento en las mezclas asfáltica modificadas con PE a diferencia de las mezclas convencionales. En cuanto al módulo resiliente, este aumento en temperatura bajas de 5°C y también en temperaturas altas de 25°C debido al uso de PE en la mezcla asfáltica; la resistencia a la tracción también aumenta a bajas temperaturas, esto, puede llegar a reducir el potencial de agrietamiento.

También se determinó que las mezclas asfálticas modificadas con PE tienen una menor deformación comparado con la mezcla convencional.

Se concluyó que la inclusión de PE en la mezcla asfáltica densa mejora el daño por humedad; también se concluyó que las mezclas asfálticas modificadas con PE pueden llegar a ser una buena alternativa ya que es un material de costo razonable, fácil de encontrar y además se comprobó que aporta propiedades a la mezcla asfáltica; por otro lado, ayudan a reciclar y reducir el impacto que genera el PE en el medio ambiente[18].

- **MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON GRANO DE CAUCHO**

En la investigación realizada por Hugo Rondón, Yennifer Molano y Angélica Tenjo de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, se evaluó la influencia de temperatura en la compactación sobre la resistencia Marshall de mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado, bajo diferentes temperaturas, esta investigación se centra en la aplicación en la ciudad de Bogotá debido a que está reportado en obra la disminución de las temperaturas, desde su fabricación en planta hasta su extensión y compactación, de hasta 30°C. Las mezclas estudiadas fueron fabricadas por vía húmeda modificando los dos tipos de asfaltos que se producen en Colombia (CA 60-70 Y CA 80-100), para la caracterización de estos cementos asfálticos se realizaron ensayos exigidos por el INVIAS (2007) e IDU (2005). El grano de caucho reciclado (GCR) provenía de la empresa MUNDOLIMPIO, el material presentó coloración negra y este pasa por el tamiz N.40 en el ensayo de granulometría. Se usaron dos tipos de granulometría especificadas en la Resolución No. 3841 del IDU (2011).

Se fabricaron cinco briquetas compactadas a 75 golpes y se realizó el diseño Marshall para cada porcentaje de asfalto de 5.0; 5.5; 6.0 y 6.5%. La temperatura de mezcla y compactación fue de 150°C y 140°C, la temperatura de 150°C se toma como la temperatura de referencia para el análisis. Independientemente del CA utilizado se determinó que los porcentajes óptimos de las mezclas son de 5.5% y 6.0%. Al obtener los porcentajes óptimos se adiciono por vía húmeda el GCR en porcentajes de 13% y 15% con respecto al peso total de CA 60-70 Y CA 80-100. En total se analizaron cuatro mezclas.

De acuerdo a los resultados obtenidos para la relación estabilidad flujo se observó que las mezclas realizadas con la granulometría tipo 1 (convencionales y modificadas) experimentaron una mayor rigidez entre 10% y 25% superior en comparación con las mezclas realizadas con la granulometría tipo 2, esto se debe a que la granulometría tipo 1 presente mayor contenido de partículas gruesas; también se observó que la relación estabilidad flujo incremento al usar GCR. Por otro lado, la relación estabilidad flujo de las mezclas convencionales presentaron una disminución en 20%, 22%, 33% y 34% respectivamente, cuando decae la temperatura de compactación. 30°C con respecto a la de referencia.

Las mezclas modificadas con GCR presentaron un comportamiento diferente, ya que presentaron un incremento de 21%, 23%, 30% y 17% respectivamente, en la relación E/F cuando disminuye la temperatura de compactación 10°C con respecto a la de referencia.

En este estudio se concluyó que las mezclas convencionales presentaron una disminución notable de entre 20% y 34% de la disminución de temperatura de compactación sobre la resistencia mecánica bajo carga monotónica (Marshall) cuando esta disminuye la temperatura de compactación en 30°C con respecto a la temperatura de referencia. Para las mezclas modificadas

se concluyó que tres de las cuatro mezclas evaluadas presentaron una disminución promedio de solo el 10%, además también se observó un incremento en la resistencia entre 17% y 30%, cuando disminuye en 10°C la temperatura de compactación. La mezcla con granulometría tipo 1 modificada con GCR presento un ligero incremento en la resistencia del 6.7% [19].

- **MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON SBS**

Esta investigación fue realizada por Farsi Mansour, Hassani Kaveh y Ghanizadeh Ali Reza[20] de la universidad tecnológica de Sirjan (Irán) en el 2013, con el objetivo de determinar los efecto producidos por la frecuencia de cargas vehiculares, en este caso la fatiga en mezclas modificadas con SBS (estireno-butadieno-estireno) y compararlas con mezclas convencionales.

Se asumió que la temperatura de prueba era 20 °C a niveles de deformación constante de 500, 600, 800 y 1000 micro deformaciones para mezcla convencional y 800, 900, 1000 y 1200 micro deformaciones en el caso de mezclas modificadas con SBS a dos frecuencias de carga diferentes de 7.5 y 15 Hz. Estas dos frecuencias se seleccionaron en base a los resultados de estudios en un tramo de pavimento específico a dos velocidades diferentes de 30 y 60 km / h.

Se utilizó un 5% de polímero SBS para producir el bitumen modificado, se determinó la fatiga de las mezclas asfálticas utilizando la prueba de fatiga de la viga de flexión. Como resultados después de las pruebas encontraron que, en el caso de las mezclas convencionales, cuando la frecuencia de carga aumenta, la vida útil de estas mezclas a fatiga disminuye enormemente. Mientras que los resultados de las muestras modificadas con SBS, a medida que la frecuencia de carga aumenta, aumenta la vida útil a fatiga. En otras

palabras, las mezclas convencionales son más sensibles al cambio de frecuencia en comparación con las mezclas modificadas con SBS.

Finalmente, al terminar el estudio, concluyeron que la vida a fatiga de las mezclas modificadas con el polímero es hasta tres veces más que las muestras de betún convencionales, especialmente a frecuencias altas.

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1 MARCO TEÓRICO

5.1.1 Mezclas asfálticas.

Las mezclas asfálticas, también llamadas bituminosas, se componen de asfalto, el cual actúa como ligante y agregados pétreos de variado tamaño, se fabrican de forma mecánica en puntos fijos (plantas) y puntos móviles (maquinaria), se transportan, extienden y compactan en la obra, en la actualidad no solo se usan como pavimento en vías, su uso sea a extendiendo a otro tipo de proyectos de infraestructura, como pistas deportivas, pistas de aeropuertos entre otras, pero su principal uso es ser una de las capas que conforman la estructura de pavimento, ubicándose en la capa superior de este, se encarga de soportar y transmitir las cargas de tráfico, por tal motivo, estas mezclas deben ser diseñadas para funcionar óptimamente. El comportamiento de las mezclas asfálticas no solo depende de las magnitudes de carga que tienen que soportar y resistir, sino de otros factores como lo son las propiedades de flujo, es decir como la mezcla cambia debido a la temperatura y velocidad de aplicación, a esto se le conoce como reología, y es importante conocerlo puesto que de estos parámetros depende mucho el diseño de la mezcla. En unas determinadas condiciones como lo son altas temperaturas y velocidades elevadas, la mezcla adquiere un comportamiento elástico y lineal, en otras condiciones el comportamiento de estas es no elástico y no lineal, esto nos lleva a decir que las mezclas asfálticas poseen un comportamiento visco elástico, lo cual depende de variables como la temperatura y tiempo de aplicación de la carga.

Las propiedades reológicas del asfalto dependen en gran medida de las proporciones en las que se presentan sus componentes, los cuales varían de

acuerdo con el origen de los crudos de petróleo. El comportamiento reológico del ligante tiene una influencia significativa en las propiedades de la mezcla asfalto-agregado (ahuellamiento, fatiga susceptibilidad térmica y flexibilidad). [21].

Las mezclas al tener distintas características, permite que se le dé una variedad de aplicaciones, es ahí donde el ingeniero juega un rol muy importante pues debe razonar aspectos como materiales que las constituyen, dosificación de cada material y medios de fabricación; una buena mezcla asfáltica debe poseer las siguientes características, las cuales son las deseables:

- Resistencia al desplazamiento.
- Resistencia a la fatiga.
- Resistencia al deslizamiento.
- Resistencia La Deformación Plástica.
- Impermeables.
- Durables.
- Grado adecuado de flexibilidad.

El desempeño, durabilidad y resistencia de la mezcla asfáltica está directamente conectada a las propiedades del ligante y el agregado, su intercomunicación, y a los procesos de fabricación, colocación y compactación [22].

5.1.2 Componentes de la mezcla asfáltica.

Los elementos principales que constituyen la mezcla asfáltica son el ligante asfáltico o simplemente asfalto y el conjunto de áridos de diferentes granulometrías.

5.1.2.1 Asfalto.

El asfalto es un material visco elástico que se puede obtener de forma natural o al destilar el petróleo al vacío; su uso como material de construcción de carreteras data desde el 625 D.C en Babilonia [23]. Además, de esta civilización, los griegos también hicieron uso de él, la palabra “asfalto” proviene de la palabra griega “asphaltos” que expresa “seguro”; los romanos también lo utilizaron en la construcción de sus baños y acueductos como cemento para su mampostería; en las antiguas civilizaciones como Mesopotamia era utilizado como ligante en sus construcciones. En 1595 se descubrieron pozos naturales de asfaltos, el más conocido es el del lago Trinidad, el cual suplió el 90% del asfalto mundial durante los años de 1875 a 1900 aproximadamente. En 1955, se fundó la Asociación Nacional de Pavimentos (NAPA) que tiene como fin promover, apoyar y defender la industria del pavimento asfáltico[24].

El asfalto es un material bituminoso de color negro, este se compone de aceites y micelas, cada compuesto aporta una serie de propiedades a la mezcla; las micelas se dividen en dos compuestos los asfáltenos y máltenos, cada uno de ellos maneja en sí, unas ciertas propiedades, como por ejemplo los asfáltenos pueden aportar mayor resistencia a la mezcla en cambio los máltenos puede mejorar la adherencia entre los agregados y el asfalto.

5.1.2.2 Agregados pétreos.

La denominación técnica “agregados pétreos” en pavimentos se refiere a un conglomerado de partículas inertes de gravas, arenas, finos y/o files (naturales o triturados), utilizados ya sea para la fabricación de mezclas asfálticas, concretos hidráulicos y materiales estabilizados o para la construcción de capas de terraplén, afirmado, subbase y/o base granular [25].

5.1.3 Tipos de mezclas asfálticas.

Las mezclas asfálticas se pueden clasificar de la siguiente manera:

- En función a su granulometría y porcentaje de vacíos:
 - Mezcla Densa: Posee una granulometría de todos los tamaños, no supera un porcentaje de vacíos de 5%, se emplean en capas de rodadura, al tener un porcentaje de vacíos tan pequeños las hace impermeables.
 - Mezcla Uniforme: Solo tiene un tamaño de agregados usualmente pequeño, un ejemplo de estas son las lechadas asfálticas. posee un porcentaje de vacíos del 5 a 12%.
 - Mezcla Abierta: No tiene agregados de tamaño pequeño, esto causa que tenga una gran cantidad de vacíos el cual varía entre 12% a 20%. Son mezclas muy flexibles, se emplean en vías de poco tráfico como capa de rodadura o capa de base.
 - Mezcla Discontinua: Tiene poca cantidad de agregados de tamaño medio, se emplean como capa de rodadura, con aporte estructura, proporciona características superficiales como: resistencia al deslizamiento, rentabilidad superficial entre otras [26].

- Mezclas Porosas: Posee un porcentaje de vacíos del más de 20%, Las mezclas porosas se utilizan en capas de rodadura de pequeño espesor, con el fin de evacuar de forma rápida el agua lluvia.
- En función a su colocación en obra:
 - Mezcla Caliente: Su fabricación se realiza a altas temperaturas, alrededor de 150 grados centígrados, lo que hace que el ligante (asfalto), pueda fluir uniéndose con sus respectivos agregados, a la hora de colocarse en obra su temperatura debe ser mayor a la del ambiente, puesto si no se hace pierde la capacidad de poderse extender y compactar adecuadamente. Se emplean en vías urbanas, autopistas y carreteras comunes, casi siempre se colocan como capa de rodadura.
 - Mezclas Frías: Su ligante son las emulsiones asfálticas, se colocan en temperatura ambiente, su principal uso se da en el campo de conservación de vías. Se pueden aplicar como riego de liga, riego de imprimación, riego de curado y riego en negro.

5.1.4 Mezcla asfáltica densa caliente – HMA.

Estas mezclas se constituyen por materiales pétreos, ligante (asfalto) y agua, aunque a veces se les pueda agregar otros tipos de materiales que mejoren sus propiedades (aditivos), en la estructura de pavimento suele utilizarse como capa rodadura o base. Posee una granulometría pareja, lo que hace que tenga un porcentaje de vacíos hasta el 5%, su fabricación se realiza a altas temperaturas (110° a 120°), lo que permite que sea más maleable, adquiriendo propiedades como la flexibilidad, uniformidad y resistencia a la fatiga. En esta mezcla se ve la relación entre los agregados y el ligante puesto que los agregados deben tener una buena adherencia con el asfalto.

En Colombia las mezclas asfálticas densas, se conocen como MAC-75, MAC-63 y MAC-50, de acuerdo al Instituto Nacional de Vías (INVIAS)[27], el numero indica el tamaño máximo del agregado en mm. En el caso del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), la denominación de las mezclas cambia a MAC40, MAC50 y MAC 60.

Las mezclas asfálticas densas calientes (MDC) – Tipo INVIAS, al igual que las mezclas asfálticas calientes (MAC) indican en su número el tamaño máximo del agregado pétreo en mm:

- MDC-1: Es una base intermedia que normalmente va debajo de la rodadura y sobre la capa granular de la base, se diseña para que el pavimento tenga una buena capacidad estructural.
- MDC-2: Está diseñada para resistir la abrasión y efectos ambientales, presenta alta durabilidad y al desgaste, posee buena adherencia y resistencia a la deformación plástica.
- MDC-3: Su uso se basa en vías peatonales, canchas y centros de recreación no soportar mucha carga.
- MDC-10: Su uso se da más que todo en vías de bajo y medio tráfico, ciclo-rutas y canchas deportivas.
- MDC-10: Su uso se da más que todo en vías de bajo tráfico, ciclo-rutas y canchas deportivas.
- MDC-19: Su uso se da más que todo en vías de medio y alto tráfico.
- MDC-25: Comúnmente se usan para construir las capas de base e intermedias del pavimento en vías de medio y alto tráfico.

La mezcla densa en caliente más usada en Colombia es la MDC-2 [25].

Las ventajas al aplicar este tipo de mezclas en los pavimentos son:

- Presentan un bajo contenido de vacíos entre 3% a 9% comúnmente.
- Son mezclas de buena calidad, las cuales pueden ser utilizadas como capas asfálticas dentro del pavimento (Rodadura, base asfáltica y bases intermedios).

5.1.5 Aditivos.

Los aditivos son sustancias y/o materiales que modifican las propiedades químicas, físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica, son productos diseñados para superar las propiedades del asfalto original (las cuales dependen de su contenido de asfaltenos, máltenos, resinas y aceites); mejorando el desempeño de los pavimentos a mediano y largo plazo. Los aditivos tienen como objetivo hacer que el comportamiento físico de la mezcla no dependa tanto de la temperatura, el agua y otros factores.

El principal beneficio del uso de estos asfaltos de alto rendimiento es la mejora de la resistencia a la oxidación, con menos agrietamiento térmico (temperatura fría) y una mayor durabilidad [28].

Las principales razones para el uso de aditivos son[28]:

- Aumentar la rigidez de la mezcla.
- Suavizar y aumentar la elasticidad de la mezcla para minimizar el agrietamiento.
- Mejorar la resistencia a la fatiga de la mezcla.

- Mejorar la unión asfáltica-agregada para reducir la falta de desprendimiento o la sensibilidad a la humedad.
- Mejorar la resistencia a la abrasión para reducir los aglutinantes de asfalto.
- Reducir el lavado o sangrado.
- Mejorar la resistencia al envejecimiento por oxidación.
- Reducir el espesor estructural del pavimento.
- Reducir los costos del ciclo de vida de los pavimentos HMA.
- Mejorar el rendimiento general de los pavimentos HMA.

5.1.6 Tipos de aditivos.

Polímeros

Son moléculas formadas por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas llamadas monómeros. La mayor parte de los polímeros son materiales sintéticos con una gran variedad de aplicaciones. En general, los polímeros tienen una excelente resistencia mecánica debido a las grandes cadenas poliméricas que se atraen entre sí, gracias a la fuerza Van der Waals.

Los polímeros se pueden diseñar para obtener una amplia gama de propiedades físicas. Se pueden dividir en tres categorías generales: fibras, plásticos (plastómeros) y gomas (elastómeros).

Elastómeros (Gomas)

Los elastómeros son polímeros amorfos, es decir que no tienen una forma determinada. Mediante procesos físicos y químicos, los elastómeros son moldeados según las necesidades de la producción. Cuando están a temperatura ambiente, los elastómeros son blandos y fácilmente deformables. La estructura molecular de los elastómeros está formada por largas cadenas de monómeros y enlaces que están enredados cuando no se les somete a ninguna presión[29].

Los elastómeros más utilizados son los cauchos naturales como el estireno-butadieno-estireno (SBS), cauchos sintéticos derivados del petróleo y el grano de llanta reciclado y triturado (GCR) [30].

Grano de caucho reciclado (GCR)

Con las reservas de neumáticos de desecho en continuo crecimiento, en muchas partes del mundo se ha decidido transformar este material como aditivo de mezclas asfálticas, este caucho produce mezclas más resistentes a los fenómenos de fatiga y ahuellamiento, también aumenta la resistencia al envejecimiento y la oxidación del asfalto, puede también aumentar la resistencia de la mezcla en bajas temperaturas haciendo que esta no se agriete. Finalmente, al ser utilizado como aditivo disminuye el impacto negativo que tiene este material en el entorno.

Plastómeros (Plásticos)

La utilización de plastómeros en la modificación del asfalto es limitada. El polietileno, se puede encontrar en tres formas [28]:

- Polietileno de alta densidad (LDPE).

- Polietileno lineal de baja densidad (HDPE).
- Plástico común. (LLDPE).

El polietileno recuperado (PE) de bolsas domésticas, fue utilizado en un estudio donde se utilizó como aditivo en una mezcla asfáltica, agregándose en diferentes porcentajes 10%, 7.5%, 5.0% y 2.5%, como resultado, la mezcla modificada mostro mejora en sus propiedades mecánicas, además de eso redujo la susceptibilidad a la temperatura de la mezcla [18].

Agentes antideslizantes (Anti-stripping)

Los aditivos Anti-stripping, se utilizan para minimizar o eliminar el deterioro provocado por el agua en el interior de la mezcla asfáltica; el agua puede llegar a hacer que se pierda el ligante superficial de la mezcla, dejando expuesto a los agregados. Los aditivos antideslizantes actúan en la mezcla reduciendo la tensión superficial de esta, y de este modo mejorando la adhesión entre el ligante y el agregado.

La composición química de la mayoría de los agentes anti-stripping producidos comercialmente son compuestos químicos que contienen aminas. Entre estos aditivos podemos encontrar amidoaminas, imidazolinas, poliaminas, cal hidratada, órgano-metálicos, y ácidos. Los que usan con mayor frecuencia son las aminas y la cal hidratada, puesto que estos ayudan de una forma mejor a contrarrestar el daño por humedad.

Cal hidrata

La Cal resulta de la calcinación de rocas calizas, la cal hidratada se puede agregar a la HMA por varios métodos, usualmente se usan son los siguientes:

- Método de adición al tambor.
- Método de la lechada.

La cal hidratada reduce el índice de envejecimiento del pavimento, retardando la oxidación de muchos tipos de asfaltos. Esto es debido a que la cal reacciona con las moléculas altamente polares del asfalto, retrasando el índice de cambio de la química del asfalto, permitiendo que el pavimento este flexible a largo plazo, la cal hidratada también ayuda al agrietamiento que se da en el pavimento por envejecimiento. Las partículas de cal hidratada pueden interceptar y desviar estas micro fisuras cuando comienzan a formarse, la cal reacciona con los elementos dentro del asfalto, formando partículas más grandes que puedan ser capaces de interceptar y desviar mejor las micro fisuras, evitando que crezcan juntas en grietas más grandes, que contribuyen al deterioro del pavimento [31].

Fibras

Son materiales naturales o sintéticos, que tienen como fin mejorar la mezcla asfáltica, en la actualidad existe una amplia variedad de ellas, cada tipo de fibra mejora alguna propiedad de la mezcla como, se muestra a continuación:

- Fibras de poliéster mejoran el esfuerzo a tensión y la susceptibilidad a la humedad [32].
- Fibras acrílicas dan resistencia a la disgregación por el efecto abrasivo producido por el tráfico, son buenas para minimizar la propagación de grietas [33].
- Fibras de polipropileno controlan el agrietamiento en los pavimentos [34].

5.1.7 Ensayos experimentales.

Para determinar y conocer las características del asfalto se realizan los ensayos que se enuncian a continuación, cada uno de ellos mide una propiedad física de este:

- Ensayo de penetración: Indicador de rigidez, capacidad de resistir deformaciones plásticas.
- Ensayo de punto de ablandamiento: Indicador de rigidez, capacidad de fluencia.
- Ensayo de ductilidad: Indicador de fragilidad y propiedades cohesivas.
- Ensayo de Ignición e inflamación: Indicador de seguridad en procesos de almacenamiento y manejo.

5.1.8 Método Marshall.

Es un método de diseño de mezclas asfálticas en caliente, se basa en la estabilidad, flujo y contenido de vacíos, fue inventado por el americano Bruce Marshall, del departamento de carreteras del estado de Misisipi. El propósito de este método es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de granulometría; en este ensayo mecánico se rompen probetas cilíndricas, se compactan, luego se calientan y se les ensaya en la máquina de Marshall, mediante una carga axial, de este modo se determina que tan estable y que deformaciones puede tener la mezcla asfáltica. Este método es importante para conocer la cantidad de asfalto que requiere una mezcla para su óptimo funcionamiento.

5.2 MARCO LEGAL

De acuerdo a lo estipulado en el decreto 1735 del 2001, la red nacional de carreteras de Colombia estará a cargo del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), esta institución controlará y dictaminará la normas y procedimientos referentes al diseño, construcción y mantenimiento de las vías del país; por tal razón para el desarrollo del presente proyecto, se tomó como guía los ensayos y procedimientos vigentes establecidos por esta organización.

A continuación, se enlista la normatividad a consultada y aplicada:

- Artículo 450 -13 INVIAS. Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico) [35].
- Artículo 410-13 INVIAS. Suministro de cemento asfáltico [36].

Normas de ensayos:

- INV E-133-13. Equivalente de arena de suelos y agregados finos [37].
- INV E-218-13. Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½") por medio de la máquina de los Ángeles [38].
- INV E-220-13. Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio [39].
- INV E-222-13. Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso [40].
- INV E-227-13. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso [41].

- INV E-235-13. Valor de azul de metileno en agregados finos [42].
- INV E-238-13. Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato micro-Deval [43].
- INV E-239-13. Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciados por la forma de partículas, la textura superficial y la granulometría) [44].
- INV E-240-13. Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos [45].
- INV E-702-13. Ductilidad de los materiales asfálticos [46].
- INV E-706-13. Penetración de los materiales bituminosos [47].
- INV E-709-13. Puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta Cleveland [48].
- INV E-712-13. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola) [49].
- INV E-725-13 - Evaluación de susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta [50].
- INV E-736-13 - Porcentaje de vacíos con aires en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas [51].
- INV E-748-13 - Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall [52].
- INV E-760-13 - Caracterización de las mezclas asfálticas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste [53].

- INV E-799-13 – Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente [54].

6. OBJETIVOS

6.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el desempeño mecánico de distintos aditivos en la mezcla asfáltica densa (HMA).

6.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar una revisión literaria del desempeño mecánico de los aditivos más utilizados como refuerzo estructural de una mezcla asfáltica en caliente.
- Evaluar experimentalmente el impacto que tienen distintos aditivos en la mezcla asfáltica densa.
- Analizar y discutir los resultados con base a los resultados experimentales previamente obtenidos.

7. ALCANCES Y LIMITACIONES

7.1 ALCANCE

Esta investigación tiene como finalidad analizar el impacto que generan los distintos aditivos en una mezcla asfáltica densa por medio de ensayos experimentales. Para este análisis se hará un enfoque en el aspecto mecánico y económico. El análisis se limita a los ensayos experimentales llevados a cabo, como soporte de discusión de los mismos se tomará en cuenta la información encontrada en las bases de datos disponibles. Los ensayos experimentales se limitarán en función de los recursos en materia de equipos que disponga la universidad.

7.2 LIMITACIONES

- Se cuenta con tiempo limitado, es por eso que se espera determinar y analizar adecuadamente y sin contratiempos, el impacto que generan los aditivos en las mezclas asfálticas.
- La revisión literaria se limita a la información disponible en las bases de datos de libre acceso y a los recursos bibliográficos de la universidad.
- Los ensayos experimentales se limitan a los equipos disponibles en la universidad.
- Los aditivos son susceptibles a modificarse debido a la disponibilidad de estos en nuestro país.

8. METODOLOGÍA

8.1 CONTEXTUALIZACIÓN

Para alcanzar los objetivos mencionados en el proyecto, la metodología a usar se dividió en 5 etapas como se observa en la Figura 1.

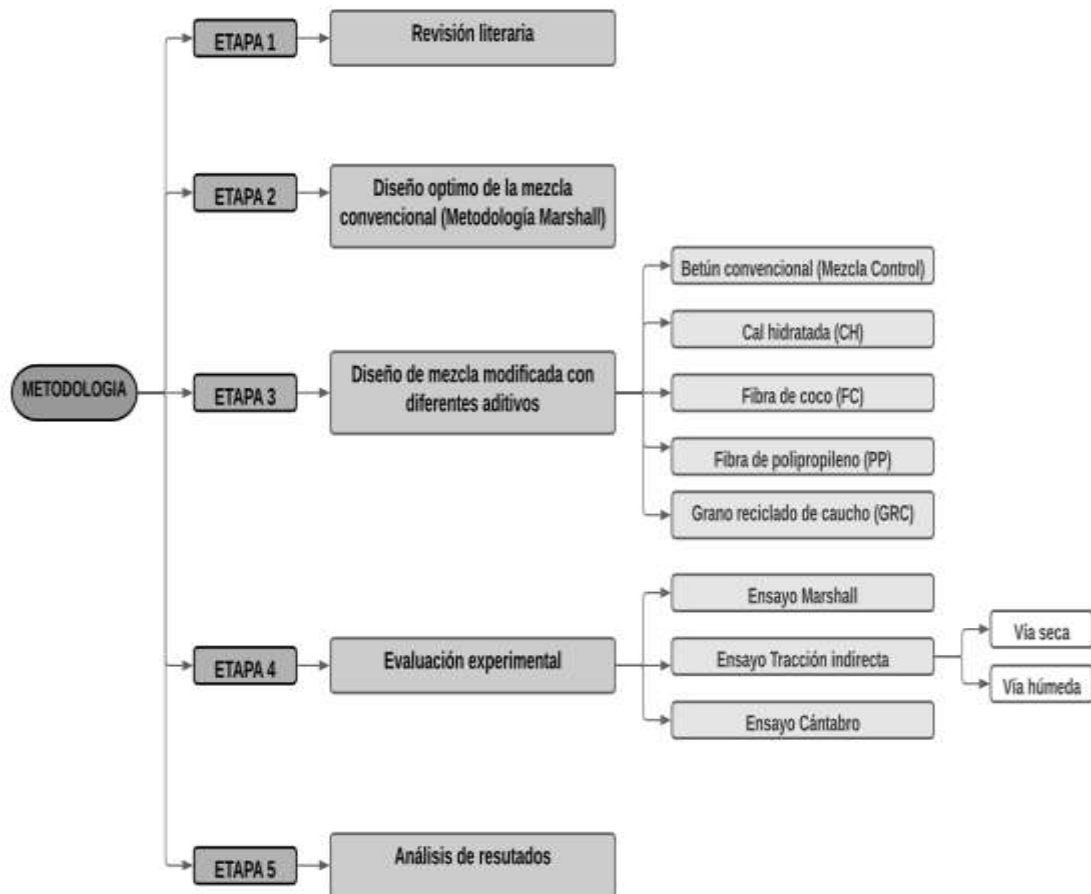


Figura 1. Metodología utilizada en la investigación.

Fuente: Autores.

A continuación, se especifica lo realizado en cada una de las etapas:

8.1.1 Etapa 1: Revisión literaria.

Se hizo una revisión literaria para estudiar los diferentes tipos de aditivos. Esto mediante el chequeo de bases de datos de acceso abierto y artículos científicos de alto impacto de acuerdo a los índices del Journal Citation Report web of Science [55].

De esta revisión se pretendió obtener información de cada una de las características físicas y mecánicas de los aditivos, así como sus componentes y métodos de aplicación. De igual forma, se estudiaron los tipos de aditivos que existen y se revisaron cuidadosamente las dosificaciones de estos en la mezcla; esto con el fin de determinar cuáles eran los aditivos más usados y en qué proporción estos mejoraban la mezcla asfáltica.

8.2.2 Etapa 2: Diseño óptimo de mezcla control (Método Marshall).

Se elaboraron 12 probetas cilíndricas con 101.6 mm (4") de diámetro y 63.5 mm (2½") de altura; gradación tipo 19 mm según lo descrito en el artículo 450-13[35] del INVIAS; una mezcla asfáltica con grado de penetración 60-70, temperatura de mezcla de 150°C, compactación de 75 golpes por cada cara y temperatura de compactación de aproximadamente 130°C a 140 °C. La dosificación de %CA de las probetas fue de 4.5%, 5%, 5.5% y 6%. Para la realización del ensayo se consideró lo descrito en la norma INV 748-13[52]. Los valores obtenidos de estabilidad y flujo y también las propiedades volumétricas de las probetas se tuvieron en cuenta para el cálculo del porcentaje óptimo de la mezcla.

8.3.3 Etapa 3: Diseño de mezcla modificada con diferentes aditivos.

Después de determinado el porcentaje óptimo de la mezcla se procedió a la realización de las probetas modificadas con los diferentes aditivos. Con base en la revisión literaria los aditivos seleccionados se señalan a continuación. Si bien es evidente que en la literatura se encontró una amplia variedad de aditivos que han sido utilizados en mezclas bituminosas, en esta investigación se seleccionó los más comunes para el refuerzo de las mismas.

Los aditivos usados en cada una de las mezclas modificadas fueron:

1. Cal hidratada (CH).
2. Fibra de coco (FC).
3. Fibra de polipropileno (PP)
4. Grano de caucho reciclado (GCR).
5. Betún convencional (Mezcla control).

8.3.4 Etapa 4: Evaluación experimental.

Los ensayos realizados para el análisis y evaluación experimental fueron:

- INV E-748-13. Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall [52.]
- INV E-725-13. Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta [50].

- INV E-760-13. Caracterización de las mezclas asfálticas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste [53].

8.3.5 Etapa 5: Análisis de resultados.

En esta última etapa se realizó una interpretación de los resultados obtenidos en los ensayos, así como también los análisis y comparaciones respectivas para determinar cuál era el mejor aditivo y el más prometedor en la mezcla asfáltica densa.

8.2 MATERIALES Y PREPARACIÓN DE ESPÉCIMENES

Para la fabricación de las probetas, se usó asfalto con grado de penetración 60-70 proveniente de la planta de Ecopetrol en Barrancabermeja, la caracterización de este se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización del asfalto.

CARACTERIZACIÓN DE ASFALTO			ASFALTO 60-70		
CARACTERÍSTICA	ENSAYO	RESULTADO	MI N	MA X	CUMPL E
Ductilidad (cm)	INV E - 702	140	100		SI
Índice de penetración (mm/10)	INV E - 706	69	60	70	SI
Punto de inflamación (°C)	INV E - 709	280	230		SI
Punto de ablandamiento (°C)	INV E - 712	48.9	48	54	SI
Densidad (g/cm ³)		1.012			

Fuente: Autores.

Como se observó el resultado obtenido para cada ensayo ,cumple con las especificaciones del INVIAS, mostradas en la tabla 410-1 Especificaciones del cemento asfáltico[36] . La densidad del asfalto que se uso fue de 1.012 g/cm³.

Por otro lado los agregados provenían del rio Guayuribe-Meta, la caracterización de los mismos se observa en la Tabla 2, estos cumplen con

los requisitos plasmados en la tabla 450- 3 Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua [35].

Para el ensayo de equivalente de arena, a pesar de que el valor mínimo es del 50%, el resultado se aceptara solo si este es mayor a 40% y así mismo el valor de azul de metileno es menor a 10%, por anterior se cumple con la condición. La densidad de los agregados combinados fue de 2.65 g/cm³.

Así mismo, en la Tabla 3 se presenta la granulometría de los agregados utilizados y en la Figura 2, se puede observar la respectiva curva granulométrica; esta cumple con los valores de franja granulométrica para una mezcla MDC-19 obtenidos en la tabla 450-6 del artículo 450-13 del INVIAS [35].

Tabla 2. Caracterización de los agregados.

CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS FINOS Y GRUESOS					
CARATERISTICA	ENSAYO	RESULTADO	CRITERIOS NT2	VALOR	CUMPLE
Dureza, agregado grueso					
Degaste en máquina de los Ángeles	INV E - 218	25	25	Máximo (%)	SI
500 revoluciones		4.0	5.0		SI
100 revoluciones					
Degradación por abrasión Micro -Deval	INV E - 238	11.6	25	Máximo (%)	SI
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos Relación húmedo/seco	INV E - 224	89	N/A	Mínimo (%)	SI
Durabilidad					
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio	INV E - 220	7.3	18	Máximo (%)	SI
Agregado Fino		5.8	18		SI
Agregado Grueso					
Limpieza , gradación combinada					
Equivalente de arena	INV E - 133	46	50	Mínimo (%)	SI
Valor azul de metileno	INV E - 235	5.5	10	Máximo (%)	SI
Geometría de las partículas, agregado grueso					
Partículas planas y alargadas	INV E - 240			Máximo (%)	SI
Índice de aplanamiento global		9.50	10		SI
Índice de alargamiento global		9.0	10		
Caras fracturadas	INV E - 227	98	75	Mínimo (%)	SI
Una cara		94	60		SI
Dos caras					
Geometría de las partículas, agregado fino					
Angularidad de la fracción fina, método A	INV E - 239	46	45	Mínimo (%)	SI

Fuente: Autores.

Tabla 3. Granulometría de los agregados.

Granulometría mezcla MDC-19.			
TAMIZ	Tamiz [mm]	% PASA	% RETENIDO
3/4"	19,00	100,0	0,0
1/2"	12,50	87,5	12,5
3/8"	9,50	79,0	8,5
4	4,75	57,0	22,0
10	2,00	37,0	20,0
40	0,43	19,5	17,5
80	0,18	12,5	7,0
200	0,075	6,0	6,5
FONDO		0,0	6,0
			100,0

Fuente: Autores.

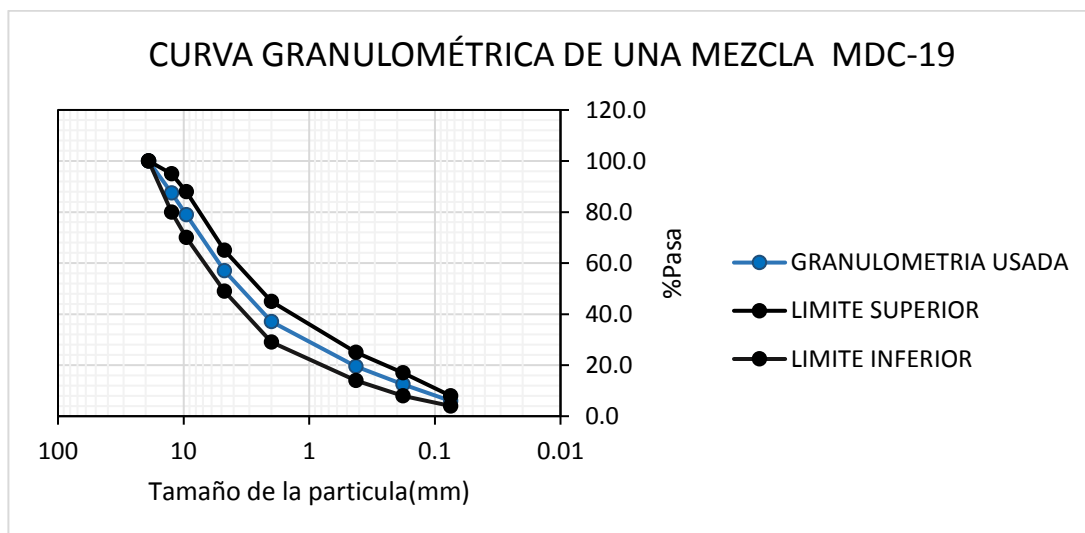






Figura 2. Curva granulométrica MDC-19.

Fuente: Autores.

Finalmente, las características de cada uno de los aditivos utilizados se observan en la Tabla 4.

Tabla 4. Características de los aditivos utilizados.

ADITIVO	CARACTERISTICAS	MUESTRA
<p>Cal hidratada</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Cal hidrata tipo N • Uso industrial. 	
<p>Fibra de coco</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones: 19 mm • Uso ornamental 	
<p>Fibra de polipropileno</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones: 19 mm • Densidad: 0.91 kg/l • Punto de fusión: 160 a 170 °C • Resistencia a tensión: 300 a 350 kg/cm² • Módulo de elasticidad a tensión: 15000 kg/cm² 	
<p>Grano de caucho reciclado</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Grano de llanta triturado • Pasa tamiz No. 80 	

Fuente: Autores.

8.3 DISEÑO DE MEZCLAS

Se realizaron sesenta (60) probetas modificadas con los diferentes aditivos y doce (12) para la obtención del porcentaje óptimo con el que se diseñaron todas. Todas las probetas se diseñaron bajo la metodología Marshall (ver Figura 3)



Figura 3. Probetas realizadas.

Fuente: Autores

En la Tabla 5, se describen los ensayos realizados, las normas para cada uno de ellos y así mismo, la cantidad de probetas fabricadas para cada ensayo.

Tabla 5. Resumen de ensayos a realizar.

ENSAYO	NORMA INV E	MEZCLAS					TOTAL
		MEZCLA CONTROL	PP	CH	FC	GCR	
Marshall	748-13	3	3	3	3	3	15
Tracción Indirecta	725-13	Vía húmeda	3	3	3	3	15
		Vía seca	3	3	3	3	15
Cántabro	760-13	3	3	3	3	3	15
						TOTAL	60

Fuente: Autores.

El porcentaje de aditivo para cada mezcla fue obtenido de la amplia consulta literaria, quedando como se muestra en la Tabla 6 el porcentaje de aditivo aplicado.

Tabla 6. Porcentaje de aditivos

MEZCLA		ADITIVO	% ADITIVO A AGREGAR
Mezcla control (sin aditivo)			0
Mezcla convencional	más	Cal hidratada	1.5
Mezcla convencional	más	Fibra de coco	0.3
Mezcla convencional	más	Fibra de polipropileno	0.3
Mezcla convencional	más	Grano de caucho reciclado	0.5

Fuente: Autores.

La adición de la cal hidratada se hizo con relación al peso de los agregados y se reemplazó en el filler; la adición de los demás aditivos se hizo en relación al peso total de la mezcla (1200g).

En la Tabla 7 se encuentra dosificación de las mezclas en porcentaje.

Tabla 7. Dosificación en porcentaje de cada mezcla

MEZCLA	% DE AGREGADOS	%CA	% ADITIVO A AGREGAR
Mezcla Control	94.7	5.3	0
CH	93.2	5.3	1.5
FC	94.4	5.3	0.3
PP	94.4	5.3	0.3
GCR	94.2	5.3	0.5

Fuente: Autores.

Finalmente, en la Tabla 8 se encuentra la dosificación de las mezclas en gramos.

Tabla 8. Dosificación en g de cada mezcla

MEZCLA	g DE AGREGADOS	g ASFALTO OPTIMO	g ADITIVO A AGREGAR
Mezcla Control	1136.4	63.6	0
CH	1118.4	63.6	18.0
FC	1132.8	63.6	3.6
PP	1132.8	63.6	3.6
GRC	1130.4	63.6	6.0

Fuente: Autores.

En la figura 4 se muestra el proceso de adición de los aditivos en cada una de las mezclas modificadas.



Figura 4. Adición de los aditivos en la mezcla.

Fuente: Autores.

8.4 ENSAYOS EXPERIMENTALES

A continuación, se describe cada ensayo realizado, estos siguen la normativa INVIAS:

- **ENSAYO MARSHALL**

Empleando el aparato Marshall se determinó la resistencia a la deformación plástica [52] de las mezclas asfálticas para pavimentación. Este método aplica para mezclas elaboradas con cemento asfáltico y agregados pétreos los cuales deben tener un tamaño máximo, menor o igual a 25.4 mm (1") [52].

Las muestras fueron puestas a baño María por aproximadamente 30 minutos con una temperatura controlada de 60°C según lo descrito en la norma INV E 748-13 [52]. Posteriormente, las muestras se sometieron al ensayo de Marshall para determinar los valores de estabilidad y flujo.

Por otro lado, se realizó el cálculo de VA teniendo en cuenta lo descrito en la norma INV E-799-13 – Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente [54]. Previamente se calcularon los valores de Gravedad máxima teórica (Gmm) y densidad Bulk (Gmb). Estos valores se determinan con las ecuaciones mencionadas a continuación:

$$G_{mm} = \frac{100}{\left(\frac{100 - \% \text{ Contenido de asfalto}}{\text{Peso específico AC}} \right) + \left(\frac{\% \text{ Contenido de asfalto}}{\text{Peso específico CA}} \right)}$$

Ecuación 1. Gravedad máxima teórica.

Fuente: INVIAS (2013) [54]

Donde:

Peso específico AC: Peso específico de los agregados combinados

Peso específico CA: Peso específico del asfalto 60 – 70

$$Gmb = \frac{\text{Peso seco}}{\text{Peso SSS} - \text{Peso Sumergido}}$$

Ecuación 2. Densidad Bulk.

Fuente: INVIAS (2013) [56]

Después de hallados los valores de Gravedad máxima teórica (Gmm) y densidad Bulk (Gmb), se calcula VAM y VFA con las siguientes ecuaciones:

$$VAM (\%) = \left(\frac{\text{Volumen de asfalto efectivo} + \text{Volumen aire}}{\text{Volumen probeta}} \right) \times 100\%$$

Ecuación 3. Calculo de Vacíos en el agregado mineral.

Fuente: INVIAS (2013) [54]

$$VFA (\%) = \left(\frac{VAM - VA}{VAM} \right) \times 100\%$$

Ecuación 4. Calculo de vacíos llenos de asfalto.

Fuente: INVIAS (2013) [54]

- **ENSAYO TRACCIÓN INDIRECTA**

El propósito de la realización de este ensayo fue medir el efecto del agua sobre la resistencia a la tracción indirecta. Este método es usado para determinar el daño por humedad que se presenta en una mezcla de concreto asfáltico, además determina si un aditivo adhesivo es efectivo o no y cuál es su punto óptimo para lograr su máxima efectividad.

Se deben hacer por lo menos seis probetas para cada prueba, debido a que se dividen en dos subgrupos, secas y húmedas; en este ensayo se usaron treinta (30) probetas en total, las cuales se dividieron en dos subgrupos: seco y húmedo. Para el subgrupo en condición seca se utilizaron quince (15) probetas, las quince (15) restantes fueron utilizadas para el grupo en condición húmeda.

El subgrupo que se probó en húmedo se saturo parcialmente con agua destilada, esto con el fin de calcular el grado de saturación, después de determinado el valor del grado de saturación se debe acondicionar las probetas parcialmente saturadas en un baño de agua destilada a $60 \pm 1.0^{\circ} \text{C}$ ($140 \pm 1.8^{\circ} \text{F}$) durante 24 horas; trascurridas las 24 horas se debe ajustar la temperatura de las probetas en un baño de agua a $25 \pm 1^{\circ} \text{C}$ ($77 \pm 1.8^{\circ} \text{F}$) durante 1 hora [50].

El subgrupo conservado en seco también se debe poner en un baño de agua a la misma temperatura, pero solamente durante 20 minutos. Finalmente, se determina la resistencia a la tensión de ambos subgrupos colocando cada briqueta aplicando una carga diametral a una rata de deformación 50 mm/min hasta que alcance la cargue máxima. Al desmontar la briqueta del aparato usado para el ensayo se abre y se observa el daño ocasionado por humedad.

Para el cálculo de la relación de resistencias a tensión se usa la expresión:

$$RRT = \left(\frac{R_{TH}}{R_{TS}} \right) \times 100$$

Ecuación 5. Relación de resistencias a tensión.

Fuente: INVIAS(2013)[50]

Donde:

RRT: Relación de resistencias a tensión (%).

R_{TH}: Resistencia promedio a la tensión, del subgrupo acondicionado al agua.

R_{TS}: Resistencia promedio a la tensión, del subgrupo mantenido en seco.

- **ENSAYO DE CÁNTABRO.**

El ensayo de cántabro permitió determinar el valor de la pérdida de desgaste de las mezclas asfálticas, esto por medio de la Máquina de Los Ángeles. Este procedimiento se realiza para mezclas asfálticas en caliente, el máximo tamaño de los agregados debe ser inferior a 25 mm [53].

Este ensayo consiste en introducir cada probeta a la máquina a temperatura ambiente. Después de un determinado número de revoluciones se pesa la muestra para así conocer el desgaste de los agregados en la parte superficial. Para determinar el valor de pérdida por desgaste se utilizó la expresión:

$$P = \frac{P1 - P2}{P1} \times 100$$

Ecuación 6. Cálculo pérdida de desgaste.

Fuente: INVIAS(2013) [53]



Donde:

P : Valor de la pérdida por desgaste de la probeta (%)

$P1$: Masa inicial de la probeta (g)

$P2$: Masa final de la probeta (g)

La realización de este ensayo se realiza generalmente en mezclas asfálticas porosas, sin embargo, se consideró la realización de este debido al limitante que se tenía con los equipos de laboratorio, además, nos brindó un indicador de durabilidad en las mezclas.

9. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

9.1 FASE PRELIMINAR

Para la realización de las probetas y la respectiva dosificación de los aditivos se tuvo en cuenta lo obtenido en las bases de datos disponibles para su consulta. Además, se realizó un estudio en donde se evaluaron cuáles han sido los aditivos más utilizados en las mezclas bituminosas para diferentes investigaciones realizadas en los últimos años. Las principales bases de datos consultadas para este estudio fueron: Elsevier[57], MDPI[58], Springer link[59] y Taylor & Francis[60]. En este estudio diversas investigaciones fueron analizadas en las cuales diferentes aditivos fueron empleados en las mezclas asfálticas, en la Tabla 9 se puede observar las investigaciones encontradas en los últimos cinco años de cada uno de los aditivos seleccionados.

Tabla 9. Investigaciones en los últimos años para los diferentes aditivos.

TÍTULO	EDITORIAL	REVISTA	AÑO	ADITIVO
Rejuvenation Mechanism of Asphalt Mixtures Modified with Crumb Rubber[58]	MDPI	CivilEng	2021	Grano de caucho reciclado
Influence of high-surface-area hydrated lime on cracking performance of open-graded asphalt mixtures[59]	Taylor & Francis	Road materials and Pavement Design	2020	Cal hidratada
Moisture susceptibility assessment of hydrated lime modified asphalt mixture and surface energy[60]	Taylor & Francis	International journal of pavement engineering	2020	Cal hidratada

Continuación de la tabla 9

Effect of Synthetic Fibers and Hydrated Lime in Porous Asphalt Mixture Using Multi-Criteria Decision-Making Techniques[61]	MDPI	Materials	2020	Fibras de polipropileno y Cal hidratada
Effect of Bagasse and Coconut Peat Fillers on Asphalt Mixture Workability[62]	MDPI	Coatings	2020	Fibra de coco
Effects of long-term aging on asphalt mixes containing SBS and PP-polymer [63]	Springer Link	International Journal of pavement Research and Technology	2020	SBS y Polipropileno
Viability of producing sustainable asphalt mixtures with crumb rubber bitumen at reduced temperatures[64]	Elsevier	Construction and building materials	2020	Betún modificado con grano de caucho reciclado
Investigation of Strength and Fatigue Life of Rubber Asphalt Mixture[65]	MDPI	Materials	2020	Grano de caucho reciclado
Study on Mechanical and Viscoelastic Properties of Asphalt Mixture Modified by Diatomite and Crumb Rubber Particles[66]	MDPI	Applied sciences	2020	Diatomina y Grano de caucho reciclado

Continuación de la tabla 9

Experimental study to determine the Most Preferred Additive for Improving Asphalt Performance Using Polypropylene, Crumb Rubber, and Tarpack Super in Medium and High-Temperature Range[67]	MDPI	Applied sciences	2019	Polipropileno y Grano de caucho reciclado
Effect of the recycled rubber grain in the rutting of an asphalt mixture type MD-12[68]	Reserchgate	Journal of engineering sciences	2019	Grano de caucho reciclado
Study on the Mechanical properties of Rubber Asphalt by Molecular Dynamics simulation[69]	Springer Link	Journal of molecular modeling	2019	Betún modificado con grano de caucho reciclado
Using thermodynamic parameters to study self-healing and interface properties of crumb rubber modified asphalt based on molecular dynamics simulation[70]	Springer link	Frontiers of structural and civil engineering	2019	Grano de caucho reciclado
Evaluating fracture properties of crumb rubber modified asphalt mixtures [71]	Springer link	International Journal of pavement Research and Technology	2019	Grano de caucho reciclado
Linear viscoelastic (LVE) properties of asphalt mixtures with different glass aggregates and hydrated lime content[71]	Taylor & Francis	International journal of pavement engineering	2018	Cal hidrata y agregados de vidrio

Continuación de la tabla 9

Evaluating the effect of laboratory aging on fatigue behavior of asphalt mixtures containing hydrated lime[72]	Elsevier	Construction and building materials	2018	Cal hidratada
Engineering behavior of aged polypropylene-modified asphalt pavements [73]	Elsevier	Construction and building materials	2018	Fibras de polipropileno
Performance characteristics of fiber modified hot mix asphalt [74]	Elsevier	Construction and building materials	2018	Fibras de polipropileno
Evaluating the effect of laboratory aging on fatigue behavior of asphalt mixtures containing hydrated lime[75]	Elsevier	Construction and building materials	2017	Cal hidrata
Case history study: field monitoring and performance prediction of a field-blended rubber asphalt mixture in Brazil[76]	Taylor & Francis	International journal of pavement engineering	2017	Grano de caucho reciclado
Performance evaluation of crumb rubber-modified Asphalt Mixtures Base on Laboratory and Field Investigations [77]	Springer link	Arabian journal for science and engineering	2017	Grano de caucho reciclado

Fuente: Autores.

La dosificación obtenida para esta investigación se determinó de acuerdo al a los resultados en las diferentes investigaciones encontradas en las bases de datos anteriormente mencionadas. De acuerdo a las investigaciones leídas, las que fueron de gran relevancia para la dosificación de las muestras se mencionan a continuación:

Cal hidratada (1.5%)

- *MATERIAL-SPECIFIC EFFECTS OF HYDRATED LIME ON THE PROPERTIES AND PERFORMANCE BEHAVIOR OF ASPHALT MIXTURES AND ASPHALTIC PAVEMENTS [61]*

En esta investigación se diseñaron dos mezclas diferentes: una solo con contenido de asfalto y la otra con el contenido de cal hidratada adicional (0.5-3.0%) que se reemplaza en el agregado fino. Los resultados obtenidos en este estudio, demostraron que con la adición del 1% de la cal hidratada mejora la rigidez en la mezcla HMA, además también mejora el desempeño general de la mezcla y disminuye el deterioro que este presenta.

- *EVALUATING THE EFFECT OF LABORATORY AGING ON FATIGUE BEHAVIOR OF ASPHALT MIXTURES CONTAINING HYDRATED LIME [62]*

En este estudio se analizó los efectos para diferentes cantidades de cal hidratada (respecto al peso del agregado). Se realizaron pruebas de fatiga por flexión envejecida y no envejecida. Los resultados mostraron que la vida útil a fatiga del asfalto es sensible dependiendo la cantidad de cal hidratada que esta contenga, de acuerdo a esto se demostró que la adición del 1.5% en la mezcla es la mejor debido a que disminuye los daños por fatiga en las mismas.

Fibra de coco (0.3 %)

- *UTILIZATION OF RIPE COCONUT FIBER IN STONE MATRIX ASPHALT MIXES [15]*

Para esta investigación se realizó un diseño de mezcla con porcentajes de fibra de coco al 0.3, 0.5 y 0.7% respecto al peso total de la muestra. Como conclusiones se llegó que el porcentaje óptimo de fibras de coco en la mezcla es de 0.3% mejorando la estabilidad de la mezcla, su densidad y disminuyendo el porcentaje de vacíos.

- *EFFECT OF BAGASSE AND COCONUT PEAT FILLERS ON ASPHALT MIXTURE WORKABILITY [63]*

En esta investigación se realizaron diseños con fibra de coco y bagazo (residuo de frutas después de extraído su jugo), esto con el fin de determinar si estos materiales aumentaban la trabajabilidad en la mezcla. Se llegó a la conclusión que el uso de rellenos naturales aumenta la estabilidad en la mezcla sin embargo se debe tener en cuenta factores como: tipo de aglutinante, tipo de agregado y gradación del agregado para así verificar el desempeño de la mezcla.

Fibra de polipropileno (0.3%)

- *MECHANICAL AND DYNAMICAL BEHAVIOR OF AN ASPHALT MIXTURE WITH ADDITION OF FIBERS [13]*

En este estudio se aplicó un porcentaje de modificante que variaba entre el 0.60 al 0.75%, respecto al peso del agregado, siendo el 0.60% el porcentaje óptimo, el cual mejoraba tanto la estabilidad, flujo y la relación entre estas dos de las mezclas realizadas.

- *REPEATED CREEP BEHAVIOR OF POLYPROPYLENE FIBER-REINFORCED BITUMINOUS MIXTURES [64]*

En esta investigación se utilizaron diferentes tres tipos de fibra de polipropileno diferentes: para el primer tipo se utilizaron fibras con una longitud de 3 mm, para el segundo se utilizaron las fibras con una longitud de 9 mm y finalmente, el tercer tipo de fibra usada fueron desechos de la misma. Para el primer tipo se aplicaron porcentajes de 0.3%, 0.45% y 0.6% de fibra respecto al peso de los agregados; por otro lado, para el segundo y tercer tipo solamente se utilizó un 0.3% de fibra respecto al peso de los agregados. Con esta investigación se determinó que al usar 0.3% de fibra en la mezcla se logra aumentar la vida útil aumentando la rigidez y la estabilidad en la misma.

Grano de caucho reciclado (0.5%)

- *EFFECT OF THE RECYCLED RUBBER GRAIN IN THE RUTTING OF AN ASPHALT MIXTURE TYPE MD-12 [65]*

En esta investigación se analizó el efecto del grano de caucho reciclado acondicionado por vía seca en una mezcla asfáltica MD-12, esto mediante el ensayo de resistencia a la deformación plástica usando metodología Marshall. Se usaron cuatro muestras: una sin adición de GCR (convencional) y las otras tres con diferentes porcentajes de adición de GCR de 0.5%, 1.5% y 2.5%, esto con respecto al peso total de la muestra. Los resultados obtenidos demostraron comportamientos favorables al agregar 0.5% de GCR ya que se presenta una disminución de hasta el 5.3% en el ahuellamiento, esto en comparación de la mezcla convencional. También, se presentó una mejora en la Resistencia a la deformación plástica y es por eso que se recomienda usar GCR en las mezclas asfálticas para obtener beneficios desde el punto de vista mecánico.

- *PROPERTIES OF ASPHALT-RUBBER BINDERS RELATED TO CHARACTERISTICS OF THE INCORPORATED CRUMB RUBBER* [66]

Para este estudio muestra los resultados de una serie de pruebas realizadas en mezclas modificadas con grano de caucho mediante proceso húmedo. Los resultados determinaron que se presentan mejoras en las mezclas modificadas en termino de ablandamiento y resiliencia cuanto mayor contenido de GCR se tenga, sin embargo, el comportamiento de estos depende de factores como: contenido y tipo de caucho, temperatura y tiempo empleado durante el proceso de digestión del caucho.

9.2 DISEÑO DE MEZCLA CONTROL MDC-19

Para la investigación se optó por diseñar una mezcla asfáltica tipo 19, este tipo de mezcla solo se usa para capas de rodadura en la estructura de pavimento, esto de acuerdo a la tabla 450-7 del artículo 450 del INVIAS[35].

En la Figura 5 se muestra el proceso de fabricación de las briquetas, requeridas para obtención del asfalto óptimo; este proceso es el mismo para todas lo único que varía es el porcentaje de asfalto que se aplica.



Figura 5. *Proceso de fabricación de briquetas.*

Fuente: Autores.

9.2.1 Propiedades volumétricas.

El cálculo de VA se realizó teniendo en cuenta lo descrito en la norma INV E-799 -13 - Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente[54]. Previamente se calcularon los valores de Gravedad máxima teórica (Gmm) y densidad Bulk (Gmb), teniendo en cuenta el peso específico de la mezcla asfáltica utilizada con valor de 1.012 g/cm^3 , así como también el peso específico de los agregados combinados con un valor de 2.65 g/cm^3 .

A continuación, en la Tabla 10 se presentan las propiedades volumétricas para cada uno de los contenidos de asfalto así como también los valores de gravedad máxima teórica y Densidad Bulk.

Tabla 10. *Propiedades volumétricas, gravedad máxima teórica y densidad Bulk para cada porcentaje de asfalto.*

%CA	Gmm	Densidad Bulk [g/cm³]	VA (%)	VAM (%)	VFA (%)
4.5	2.47	2.258	8.58	18.62	54.02
5.0	2.45	2.357	3.88	15.52	75.06
5.5	2.43	2.352	3.36	16.14	79.24
6.0	2.42	2.235	7.46	20.72	64.12

Fuente: Autores.

De acuerdo a los valores obtenidos de VA Y VFA para las probetas con contenidos de asfalto de 4.5 y 6.0% se observó que estos no cumplen con los parámetros establecidos por el INVIAS para categorías de tránsito NT2 y NT3. Por otro lado, todos los valores obtenidos en VAM cumplieron con el mínimo de 15.0% establecido por el INVIAS, esto tanto para categoría de tránsito NT2 como para NT3.

9.2.2 Ensayo Marshall.

Se analizó el comportamiento de las probetas mediante el ensayo Marshall de acuerdo los diferentes contenidos de asfalto (4.5%,5.0%, 5.5% y 6.0%).

Debido a que la altura de los especímenes es diferente a 6.35 cm, se debe realizar una corrección de la estabilidad, flujo y relación estabilidad flujo (E/F) multiplicándolo por el factor que corresponda según lo mencionado en la norma tabla 748-1 de la norma INV E-748-13[52].

En la Tabla 11, se muestran los valores finales de estabilidad, flujo y relación E/F corregidos.

Tabla 11. Valores de estabilidad, flujo y relación E/F corregidos.

%CA	Estabilidad (kN)	Flujo (mm)	E/F (kN/mm)
4.5	12.13	3.77	3.22
5.0	13.41	2.42	5.54
5.5	13.21	3.06	4.31
6.0	12.33	4.19	2.94

Fuente: Autores.

Los valores obtenidos para estabilidad cumplen con los parámetros mínimos para una categoría de tránsito NT2 y NT3. Por otro lado, al observar los valores de flujo se determinó que al contener un porcentaje de asfalto del 6.0% este excede los parámetros dados por el INVIAS para categorías de tránsito NT2 Y NT3, vale decir que la mezcla tiende a fluir más debido al exceso de asfalto que se tiene. Posteriormente, para la relación E/F se determinó que se cumple con una categoría de tránsito NT2 cuando se tienen contenidos de asfalto del 4.5% y 5.5% y al contener un 5.0% de asfalto en la mezcla se cumple con una categoría de tránsito NT3; por último, la relación E/F obtenida para la mezcla con 6.0% de contenido de asfalto no se encuentra dentro de los rangos establecidos por el INVIAS, es por eso que no cumple con ninguna de las categorías de tránsito.

9.2.3 Porcentaje óptimo de asfalto.

De acuerdo a los cálculos obtenidos anteriormente mediante en el ensayo Marshall se realizó un análisis para así determinar el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla utilizada.

En la Figura 6 se observa la tendencia de la Densidad Bulk calculada para cada uno de los porcentajes de asfalto utilizados.

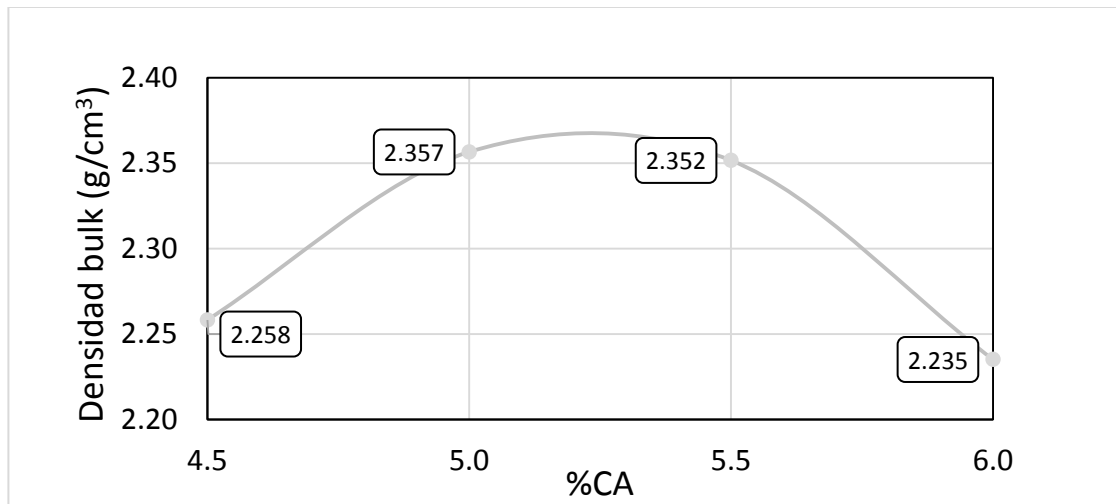


Figura 6 . Densidad Bulk vs Contenido de asfalto.

Fuente: Autores.

En la Figura 7, se observa el porcentaje de vacíos para cada porcentaje de asfalto utilizado en la mezcla, esto representa los vacíos de aire que contiene la mezcla después de compactada. Por otro lado, también se pueden observar vacíos en el agregado mineral (ver figura 7b), la cual indica que el valor máximo se obtiene para un porcentaje de asfalto de 6.0% y es del 20.72%.

Finalmente, se puede observar el porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA) para cada uno de los contenidos de asfalto.

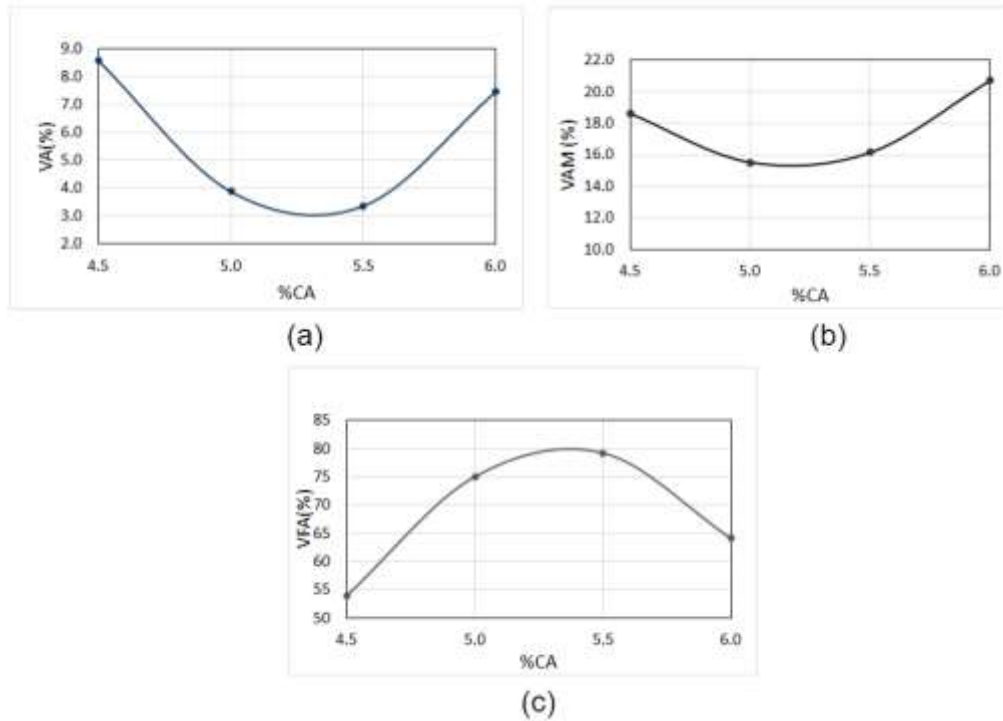


Figura 7. Vacíos de aire(a), vacíos del agregado mineral (b) y vacíos llenos de asfalto (c).

Fuente: Autores.

Para la estabilidad se obtiene un valor máximo 13.41 kN, así como también se determina que la deformación mínima obtenida es de 2.42 mm; para la relación E/F se presenta un valor máximo de 5.54 kN/mm. Todos estos valores para un contenido de asfalto de 5.0%. Los valores obtenidos se observan en la Figura 8.

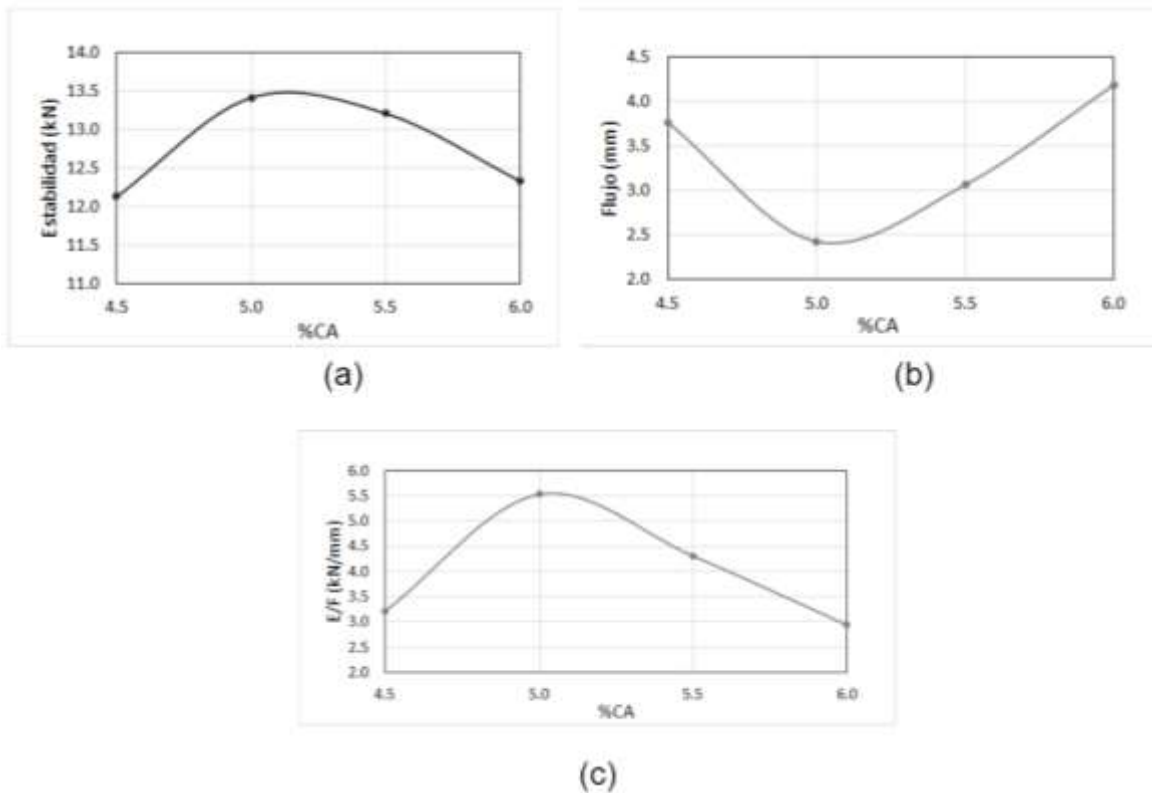


Figura 8. Estabilidad (a), flujo (b) y relación E/F (c).

Fuente: Autores

Al realizar el análisis de cada una de los valores obtenidos se determinó que se toma como porcentaje óptimo un 5.3% con el fin de mejorar las condiciones de la mezcla y así hacerla más flexible para que trabaje de una mejor manera al momento de adicionarle los aditivos con los cuales se va a trabajar. Las características del porcentaje óptimo de asfalto a utilizado (5.3% CA) se observan en la Tabla 12, estas fueron determinadas por medio de una interpolación.

Tabla 12. Características del porcentaje óptimo de asfalto.

5.3 %CA	
Estabilidad (kN)	13.29
Flujo (mm)	2.81
Relación E/F	4.80
VA (%)	3.57
VAM (%)	15.89
VFA (%)	77.57

Fuente: Autores.

De acuerdo a los datos obtenidos para el porcentaje óptimo de asfalto (5.3%), se procede a determinar la categoría de tránsito, para esto se tuvo en cuenta los valores de la tabla 450-10-Criterios para el diseño de una mezcla asfáltica con gradación continua por el método Marshall, artículo 450 -13 del INVIAS[35] para una compactación de 75 golpes por cara; estos se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Criterios para el diseño de una mezcla asfáltica con gradación continua por el método Marshall.

CARACTERÍSTICA	CATEGORIA DE TRÁNSITO	
	NT2	NT3
Compactación (golpes/cara)	75	75
Estabilidad min (N)	7500	9000
Flujo (mm)	2.0 a 4.0	2.0 a 3.5
Relación E/F(kN/mm)	3.0 a 5.0	3.0 a 6.0
VA (%)	3.0 a 5.0	3.0 a 6.0
VAM mínimo (%)	15	15
VFA (%)	65 a 78	65 a 75

Fuente: INVIAS (2013)[35]

De acuerdo a los valores dados por el INVIAS, se determina que se tiene una categoría de tránsito NT2 para la mezcla con el 5.3%CA ya que las características de esta se encuentran entre los valores establecidos. Cabe

recalcar que para la categoría de tránsito NT3 se cumplen con todos los parámetros a excepción de los vacíos llenos de asfalto

9.3 ENSAYOS EXPERIMENTALES DE MEZCLAS MODIFICADAS

A continuación, se muestran y analizan los resultados obtenidos en los diferentes ensayos aplicados para cada una de las mezclas.

9.3.1 Propiedades volumétricas.

Los valores de la densidad Bulk varían de acuerdo al tipo de mezcla, en la Tabla 14 se muestra el promedio las densidades Bulk obtenidas para cada tipo de mezcla.

Tabla 14. Densidades Bulk para cada tipo de mezcla.

MEZCLAS	DENSIDAD BULK (g/cm ³)
CONTROL	2.36
CH	2.33
FC	2.31
PP	2.28
GCR	2.31

Fuente: Autores.

Los vacíos de aire obtenidos para cada una de las mezclas se observan en la Figura 9. La mezcla modificada con polipropileno tiene mayor porcentaje de vacíos debido a su baja densidad Bulk, al contrario de la mezcla control que tiene un porcentaje de vacíos menor debido a una mayor densidad, lo cual nos relaciona que una mezcla al poseer una alta densidad Bulk, tendrá un menor porcentaje de vacíos de aire.

Los resultados obtenidos, establecen que los aditivos hacen que las mezclas posean densidades bajas, haciendo que todas tengan un alto porcentaje de

vacíos. Lo que conlleva a que los aditivos, si inciden en la estructura y composición de una mezcla convencional.

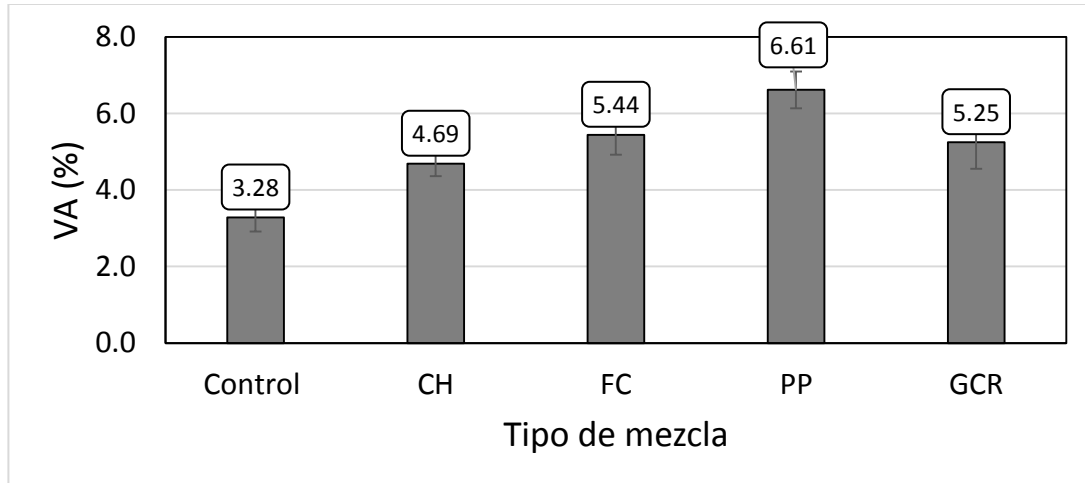


Figura 9. Vacíos de aire en cada una de las mezclas.

Fuente: Autores.

De las mezclas modificadas la que obtuvo el menor porcentaje fue la de cal hidratada, esto se puede deber a que, en esta mezcla, se reemplaza un porcentaje de filler por cal hidratada, lo cual hace que tenga cierto parecido en su composición a la mezcla control.

La adición de las fibras aumenta los vacíos en las mezclas, para esta investigación se dio en las fibras de polipropileno, el grano de caucho reciclado también arrojó un incremento de vacíos elevado dentro de la mezcla, previas investigaciones sugieren que la adición de polímeros incrementa los vacíos dentro de estas.

En la Figura 10, se observa que para los vacíos en el agregado mineral se presenta nuevamente, que la mezcla modificada con polipropileno tiene el porcentaje más alto con respecto a las diferentes mezclas, así como también que la mezcla control presenta el porcentaje más bajo.

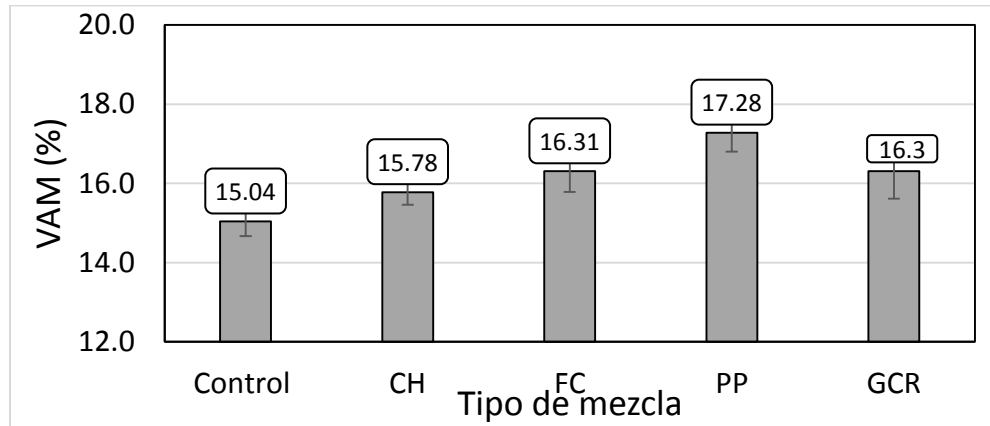


Figura 10. Vacíos en el agregado mineral en las diferentes mezclas.

Fuente: Autores.

En la Figura 11, se presentan los vacíos llenos de asfalto, la mezcla control es la de mayor porcentaje, por otro lado, la mezcla que menor porcentaje posee es la mezcla modificada con polipropileno.

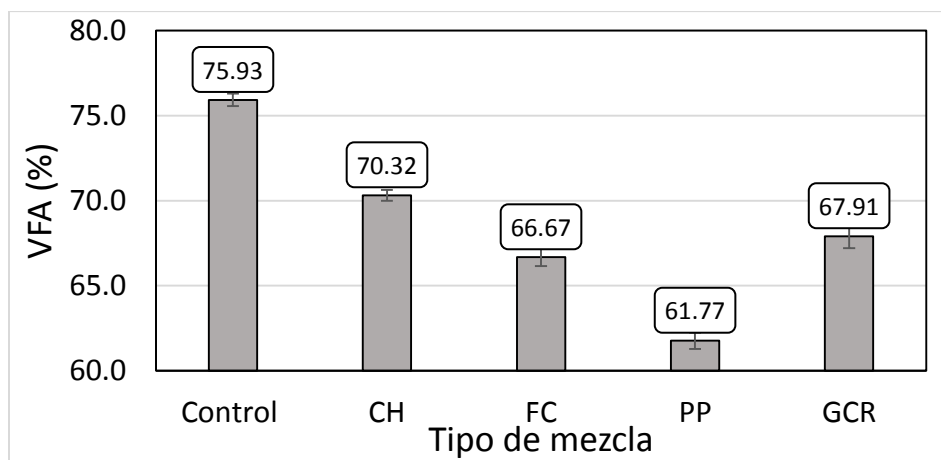


Figura 11. Vacíos llenos de asfalto en las diferentes mezclas.

Fuente: Autores.

La mezcla control tiene el porcentaje de vacíos llenos de asfalto más alto debido a que tiene un porcentaje vacíos de aire muy bajo en comparación con las demás mezclas y esto hace que haya una mayor cantidad de vacíos llenos de asfalto.

De acuerdo a las gráficas anteriores, se considera analizar si los resultados obtenidos cumplen con los criterios de la tabla 450 - 10 Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall [35], de las especificaciones INVIAS, respecto a las propiedades volumétricas.

En la Tabla 15, se muestra la verificación que se hizo teniendo cuenta que, para la investigación, el nivel de tránsito según el diseño óptimo es de categoría NT2.

Tabla 15. Verificación de los criterios de VA, VAM Y VFA para un NT2.

MEZCLAS	CRITERIOS NT2 3.0 a 5.0%	CRITERIOS NT2 mínimo 15%	CRITERIOS NT2 65 a 78%
	VA (%)	VAM (%)	VFA (%)
CONTROL	SI	SI	SI
CH	SI	SI	SI
FC	NO	SI	SI
PP	NO	SI	NO
GCR	NO	SI	SI

Fuente: Autores.

Las mezclas que cumplen con el porcentaje de vacíos de aire son las mezcla control y la mezcla modificada con cal hidratada.

Todas las mezclas cumplen con el porcentaje mínimo de vacíos en los agregados minerales.

Las mezclas que se encuentran en el rango de porcentaje de vacíos llenos de asfalto son la mezcla control y las modificadas con cal hidrata, fibra de coco y grano de caucho reciclado.

Las mezclas que cumplen con todos los criterios son las mezcla control y la mezcla modificada con cal hidratada. Las mezclas modificadas con fibra de coco y grano de caucho reciclado cumplen con dos (2) de los tres (3) criterios.

La mezcla con polipropileno es la que por norma seria la menos útil, pues solo cumple con una de estas características.

9.3.2 Ensayo Marshall.



Figura 12. Probetas después del ensayo Marshall.

Fuente: Autores.

Se emplearon un total de quince (15) probetas, tres (3) por tipo de mezcla ensayada (ver Figura 12) Se realizó la corrección por altura de acuerdo a lo mencionado en la tabla 748-1 [52]del INVIAS.

En la Figura 13 se muestran los valores de estabilidad para cada tipo de mezcla corregidos.

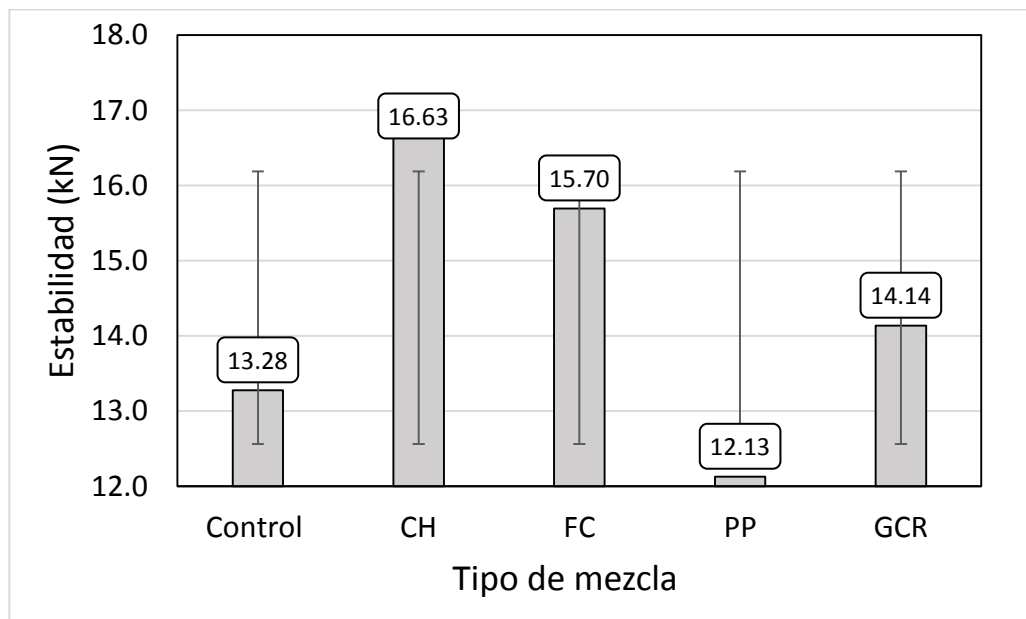


Figura 13. Estabilidad en las diferentes mezclas.

Fuente: Autores.

La mezcla que presento mayor estabilidad fue la de cal hidratada, las mezclas modificadas con fibra de coco y grano de caucho reciclado poseen muchos vacíos, pero sin embargo tienen una mayor estabilidad, a la mezcla control, lo que hace es que estos aditivos mejoren la mezcla.

Esto no sucede en todas las mezclas modificadas puesto que la de fibra de polipropileno presenta una estabilidad mucho menor que las demás mezclas modificadas y sobre todo a la mezcla control, esto se debe a que, en el análisis volumétrico realizado anteriormente, esta fue la que obtuvo el mayor

porcentaje de vacíos llenos de aire, y menor porcentaje de vacíos llenos de asfalto, lo que hace que no obtenga una buena estabilidad.

En la Figura 14 se presentan los valores de flujo corregidos para cada tipo de mezcla.

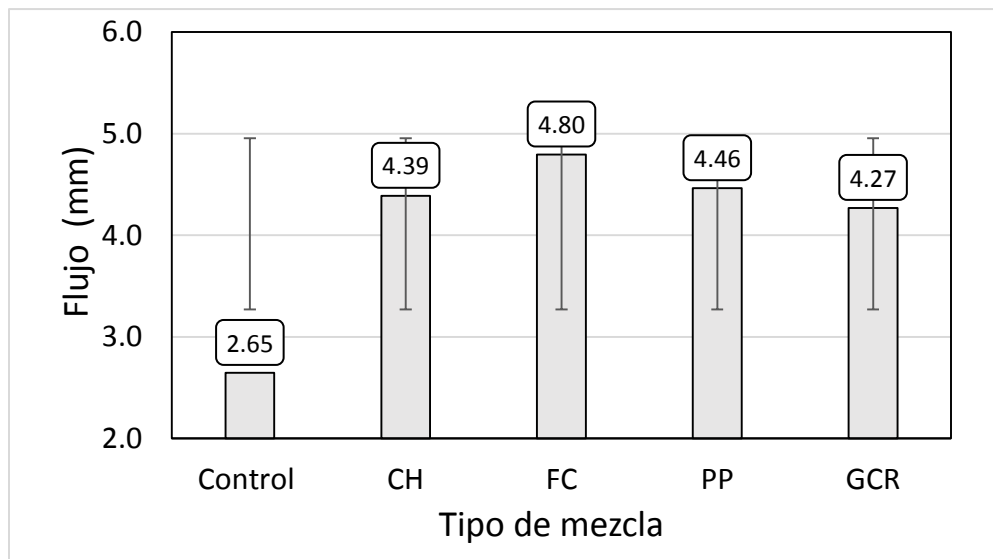


Figura 14. Flujo en las diferentes mezclas.

Fuente: Autores.

La mezcla que produjo mayor deformación fue la mezcla modificada con fibra de coco, seguida de las mezclas modificadas con fibra de polipropileno, cal hidratada y grano de caucho respectivamente. Todas las mezclas modificadas presentan un mayor flujo.

La mezcla control presentó la menor deformación, pues esta mezcla contiene un porcentaje de vacíos de aire muy bajo y un alto porcentaje de vacíos llenos de asfalto, es una mezcla más rígida, lo que hace que tenga menor desplazamiento y sea más cerrada, por lo tanto, no va a fluir tanto.

Finalmente, en la Figura 15 se plasma la relación estabilidad – flujo (E/F) para cada tipo de mezcla.

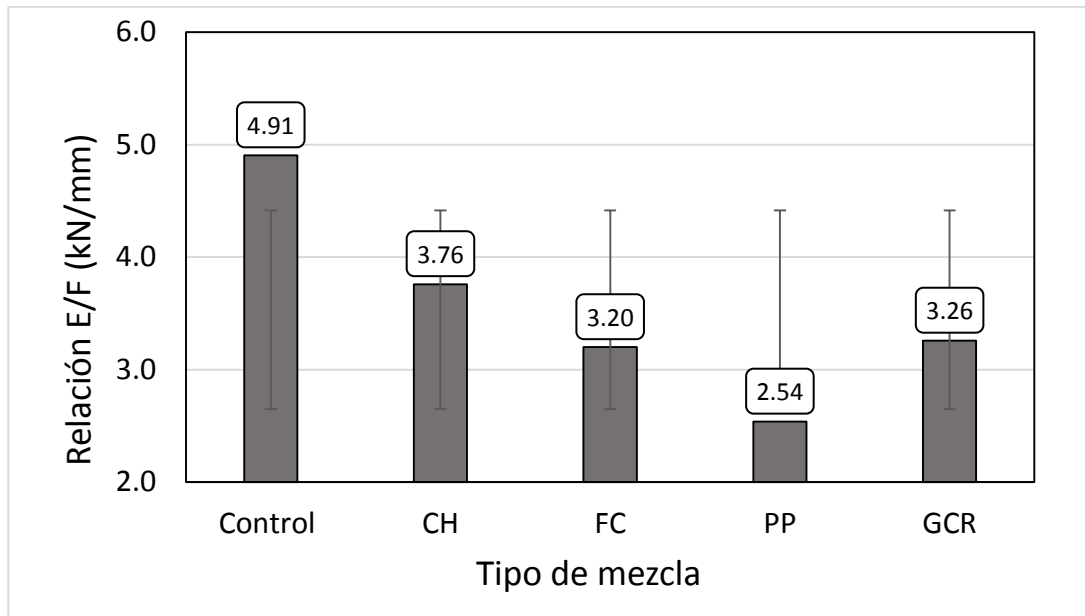


Figura 15. Relación E/F en las diferentes mezclas.

Fuente: Autores.

La mezcla control y la de cal hidratada son la que mejor rigidez presentan, conociendo que son las mezclas con menor porcentaje de vacíos de aire, las mezclas con los valores de rigidez más bajos son las que contienen un porcentaje de vacíos de aire mucho mayor.

La mezcla control obtuvo un mejor desempeño en cuanto a estabilidad y flujo, poniéndose por encima de las mezclas modificadas. La mezcla modificada con polipropileno, obtuvo el desempeño más bajo debido a que los porcentajes de vacíos de aire son mayores en esta mezcla.

De acuerdo a las gráficas anteriores, se considera analizar si los resultados obtenidos cumplen con los criterios de la tabla 450 - 10 Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall[35], de las especificaciones INVIAS.

En la Tabla 16, se muestra la verificación de los resultados obtenidos para la estabilidad, flujo y relación estabilidad - flujo, para una categoría de tránsito NT2.

Tabla 16. Verificación de los criterios de estabilidad, flujo y relación estabilidad flujo para un NT2.

MEZCLAS	CRITERIOS NT2 mínimo 7500 N	CRITERIOS NT2 2.0 a 4.0 mm	CRITERIOS NT2 3.0 a 5.0 (kN/mm)
	ESTABILIDAD	FLUJO	RELACIÓN E/F
CONTROL	SI	SI	SI
CH	SI	NO	SI
FC	SI	NO	SI
PP	SI	SI	NO
GCR	SI	SI	SI

Fuente: Autores

Todas las mezclas cumplen con el criterio de estabilidad mínima. Las mezclas que cumplen con criterio de flujo son las mezcla control, y las modificadas con polímeros, estas dos últimas tienen un flujo mayor a 4.0 mm, pero según la norma las mezclas modificadas con algún tipo de polímero pueden llegar a tener una máxima deformación de 5.0 mm. Finalmente las mezclas que cumplen con el criterio de rigidez, son la mezcla control y las modificadas con cal hidratada, fibra de coco y grano de caucho reciclado.

Las mezclas que cumplen con todos los criterios de estas características son la mezcla control y la de grano de caucho reciclado. Las demás cumplen con dos (2) de los tres (3) criterios establecidos por la norma.

9.3.3 Ensayo de Tracción Indirecta.

Como se mencionó en la metodología, para la realización de este ensayo se usaron treinta (30) probetas en total, las cuales se dividieron en dos

subgrupos: seco y húmedo. Para el subgrupo en condición seca se utilizaron quince (15) probetas, las quince (15) restantes fueron utilizadas para el grupo en condición húmeda; en la Figura 16 se observa lo realizado en el ensayo.



Figura 16. Ensayo de tracción indirecta.

Fuente: Autores.

Con los valores obtenidos de carga máxima se calculó la resistencia a la tensión, así como también la relación de resistencias a la tensión para las diferentes mezclas. Los valores obtenidos son graficados en la Figura 17

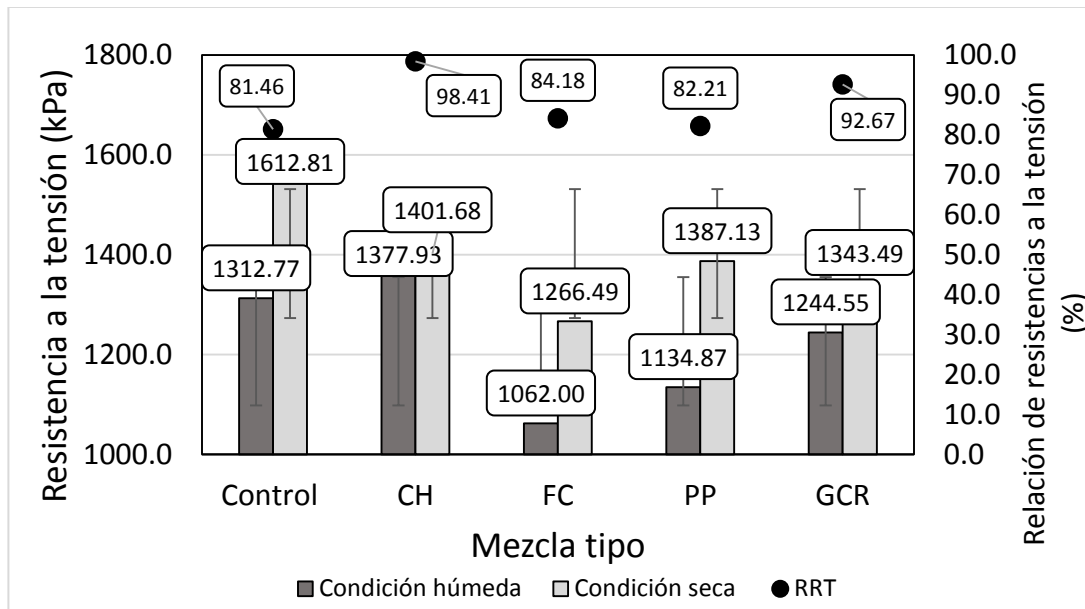


Figura 17. Resistencia a la tensión y relación de resistencias a la tensión en las diferentes mezclas.

Fuente: Autores

Se observó que las mejoras con adición de aditivos en las mezclas se presentan más en condiciones húmedas que secas. Para la resistencia a la tensión en condición húmeda, se observó que la mezcla modificada CH presenta un aumento del 4% en la resistencia en comparación con la mezcla control, esto significa que al estar en condiciones de humedad, la mezcla se hace más resistente y el desempeño de la misma no se ve afectada por la presencia de agua (ver Figura 18); en otras investigaciones realizadas se observó que esto también se presenta y se debe principalmente a que la mezcla al contar con presencia de agua hace que se presente una unión entre agregados y que el aglutinante se incremente y en consecuencia se aumenta la resistencia a la tensión [67].

- Unión de los agregados
- Incremento del aglutinante
- Mayor resistencia a la tensión (condición húmeda)



Figura 18. Daño por humedad en la mezcla con adición de cal hidratada.

Fuente: Autores.

Por otro lado, la mezcla que mostro una mayor susceptibilidad a la humedad fue la modificada FC, esto se debe a que ocurrió el llamado efecto “stripping” en el cual se presenta un desprendimiento del agregado pétreo y el asfalto en la mezcla debido a la acción del agua (ver Figura 19).

Desprendimiento del agregado pétreo, la fibra de coco y el asfalto en la mezcla →



Figura 19. Daño por humedad en la mezcla de fibra de coco.

Fuente: Autores.

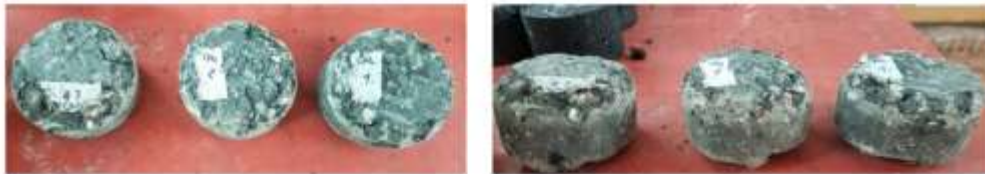
En cuanto a la relación de resistencias se observó que, estas tienen una mejor relación cuando se tiene en la mezcla algún aditivo que la modifique; la mejor relación de resistencias presentada fue en la mezcla CH seguida de la mezcla GCR. Este aumento en la relación es debido a que se presentó una buena adherencia en las mezclas haciendo que llegue a aumentar su cohesión y así mismo la durabilidad de estas.

9.3.4 Ensayo Cántabro.

MEZCLA CONTROL



CAL HIDRATADA



FIBRA DE COCO



FIBRA DE POLIPROPILENO



GRANO DE CAUCHO RECICLADO



Figura 20. Pérdida por desgaste en las diferentes mezclas.

Fuente: Autores.

Para la aplicación del ensayo se usaron tres (3) especímenes por tipo de mezcla siendo ensayadas un total de quince (15) briquetas (ver Figura 20). Según la norma INV E-760-13[53], el ensayo se debe realizar a 300 RPM (revoluciones por minuto), pero para un mayor análisis se realizó a cuatro frecuencias diferentes (50 RPM, 100 RPM, 200 RPM y 300 RPM).

El tiempo equivalente para cada frecuencia es:

- 50 RPM – 1.56 minutos
- 100 RPM – 3.13 minutos
- 200 RPM – 6.26 minutos
- 3000 RPM – 9.39 minutos

Es importante recalcar de nuevo que este ensayo se realiza generalmente en mezclas asfálticas porosas. Pero se hizo con el fin de usar los equipos disponibles de la universidad y conocer que tanto daño por desgaste recibe una mezcla densa en caliente.

En la Figura 21 se observan los resultados obtenidos para cada una de las mezclas a las distintas revoluciones.

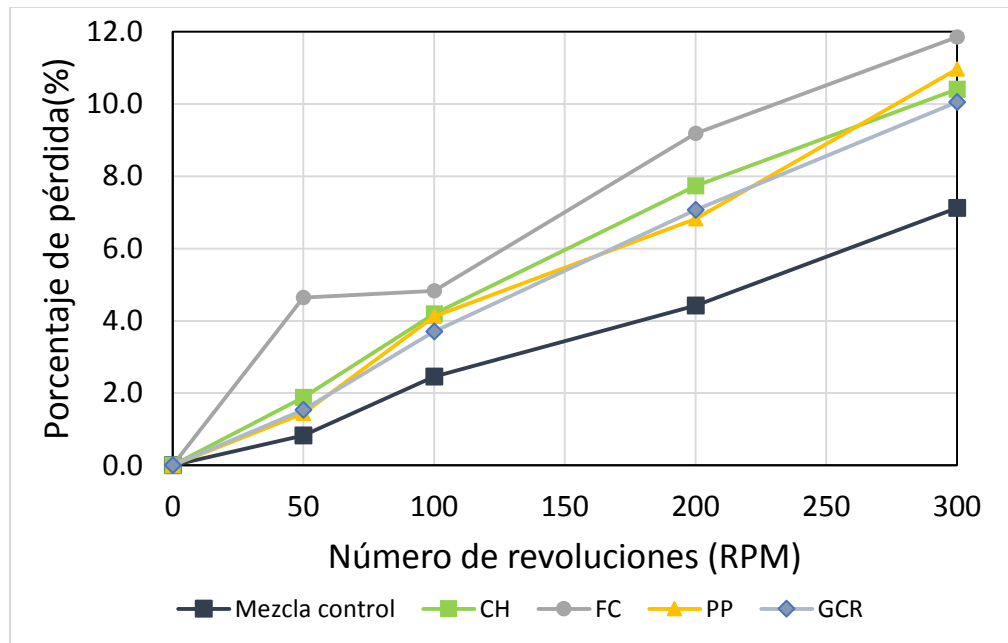


Figura 21. *Porcentaje de pérdida a diferentes revoluciones por minuto.*

Fuente: Autores.

La mezcla con mayor porcentaje de pérdida por desgaste a una frecuencia de 50 RPM fue la mezcla de coco con 4.64%, la mezcla que presentó el menor porcentaje de pérdida en esta frecuencia fue la mezcla control con 0.83%.

Para la frecuencia de 100 RPM se presentó nuevamente que la mezcla que tuvo mayor pérdida de partículas fue la mezcla modificada con fibra de coco; así mismo nuevamente la mezcla con el valor más bajo es la mezcla control.

Para la frecuencia de 200 RPM la mezcla modificada con fibra de coco sigue siendo la que más porcentaje de partículas pierde con 9.19%; en este caso la mezcla control sigue siendo la que menos partículas pierde con un porcentaje de 4.42%.

Finalmente, en la Figura 22 se plasman los resultados obtenidos a la frecuencia de 300 RPM.

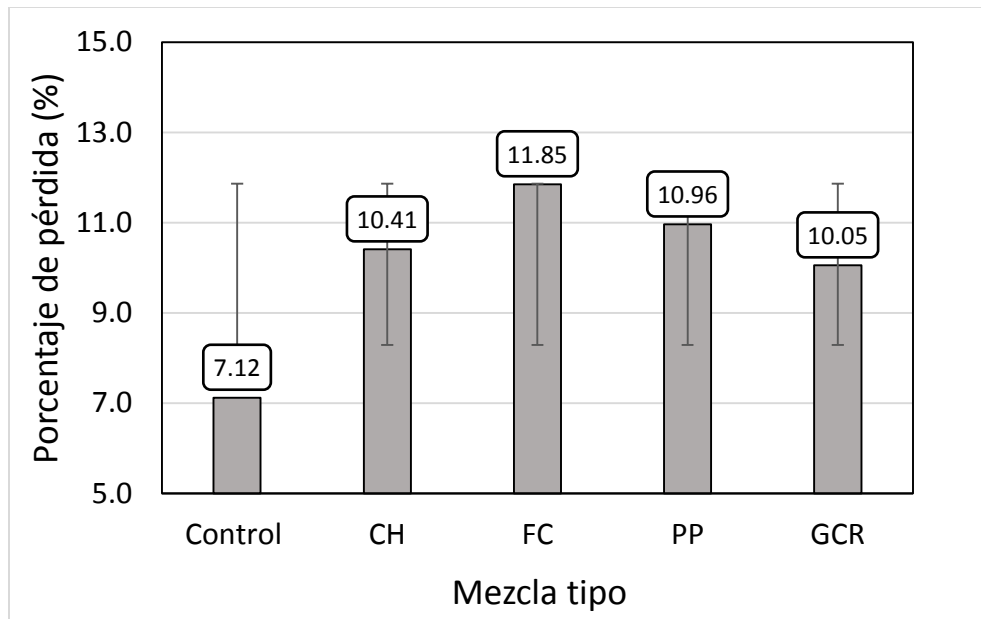


Figura 22. Porcentaje de pérdida a 300 RPM en las diferentes mezclas.

Fuente: Autores.

La mezcla que presenta mayor porcentaje de pérdida sigue siendo la mezcla modificada con coco, seguida de las mezclas de polipropileno, cal hidratada y grano de caucho reciclado, respectivamente. La mezcla control es la que menos porcentaje de pérdida tiene a una frecuencia de 300 RPM.

Se observa también que la mezcla de fibras de polipropileno a esta frecuencia llega a perder mayor cantidad de partículas que la de cal hidratada, puede ser que a medida que se aumente la frecuencia, esta mezcla llegue a perder más que la mezcla modificada con cal.

Además, se observó que la mezcla que perdió mayor cantidad de partículas durante todas las frecuencias, fue la de coco, esto se puede deber a que no hubo una buena cohesión de las fibras con los agregados y el asfalto.

Finalmente, podemos ver que los aditivos no mejoran la mezcla significativamente en cuanto a la mezcla control según los resultados

obtenidos para este ensayo, sin embargo, la adición de estos aditivos no afecta el comportamiento de estas mezclas ya que en los resultados obtenidos para los otros ensayos los aditivos si mejoran las mezclas.

10. CONCLUSIONES

En esta investigación distintos aditivos fueron evaluados de manera experimental en una mezcla densa en caliente de tamaño máximo nominal de 19 mm (MDC-19). Inicialmente se hizo un diseño de una mezcla control, posterior a ello se realizaron mezclas con los distintos aditivos evaluados, las dosificaciones de estas se hicieron con base en una evaluación de la literatura científica previamente establecida. Los ensayos experimentales llevados a cabo fueron: estabilidad Marshall, tracción indirecta y pérdida de partículas mediante el ensayo cántabro. Las conclusiones que se pueden establecer a partir de esta investigación se denotan a continuación:

1. Para la mezcla control se obtuvo un porcentaje óptimo de betún del 5.3%, con este contenido se dieron valores óptimos para el ensayo estabilidad Marshall, este porcentaje fue adecuado para una categoría de tránsito NT2 según la normativa INVIAS.
2. En cuestión de contenido de vacíos en mezcla, la mezcla modificada con CH arrojó un contenido de vacíos ligeramente superior a la mezcla control. Por otro lado, la mezcla modificada con PP fue la que denotó mayor contenido de vacíos en lo que respecta a todos los aditivos en la mezcla.
3. En el ensayo de estabilidad Marshall las mezclas modificadas con los diferentes aditivos presentaron un aumento significativo de estabilidad en comparación a la mezcla control, excepto por la mezcla modificada con PP que presentó disminución en la estabilidad. Por otro lado, todas las mezclas modificadas presentaron un mayor flujo en comparación a la mezcla control. Finalmente, en la relación estabilidad-flujo la mezcla modificada con CH presentó un buen desempeño y por eso se le atribuye mejor rigidez con respecto a las demás mezclas modificadas.

4. Para el ensayo de tracción indirecta se determinó que las mezclas con adición de aditivos presentan un mejor desempeño en condiciones húmedas. La mezcla modificada con CH presento un aumento en la resistencia, esto debido a que se presenta mayor unión entre agregados haciendo que aumente el aglutinante y en consecuencia aumente la resistencia; la mezcla modificada con GCR también se destacó al tener mayor resistencia en condiciones húmedas. Al contrario, la mezcla modificada con FC, presento el llamado efecto stripping el cual hace se desprenda el agregado pétreo y el asfalto debido a la acción del agua en la mezcla.
5. En el ensayo de cántabro, las fibras obtuvieron un mayor porcentaje de pérdidas en comparación con los demás aditivos, esto se puede atribuir que no se presentó buena adherencia en la mezcla. Las mezclas con aditivo que se destacaron por tener los menores porcentajes de pérdidas fueron la de CH y la de GCR.

En síntesis, se puede concluir que el aditivo más favorable y prometedor en la mezcla asfáltica para esta investigación es la CH ya que presenta mejoras en el comportamiento mecánico de la mezcla, esta presenta una mayor resistencia a la deformación, menor daño por humedad además de una buena estabilidad. La adición de CH resulta una buena alternativa para mejorar el desempeño general de la mezcla teniendo en cuenta los diferentes factores que afectan a la misma; los beneficios aportados de este aditivo se deben a que esta trabaja como llenante sustituyendo un porcentaje del filler que contiene la mezcla lo cual hace que tenga un comportamiento similar a la mezcla control. Cabe recalcar que los resultados obtenidos para la mezcla modificada con CH cumplen con todos los parámetros establecidos por el INVIAS para una categoría de tránsito NT2.

11. RECOMENDACIONES

De acuerdo los resultados obtenidos en la presente investigación y en la consulta literaria, se recomienda:

- Fabricar mezclas con diferentes dosificaciones de aditivos, así como también con otros tipos de asfalto, esto con el fin de generar más datos de estudios para así compararlos con los resultados obtenidos en esta investigación
- Evaluar los aditivos en diferentes tipos de mezclas como las porosas, abiertas, continuas y discontinuas, con el fin de conocer el efecto que estos generan en las mismas
- Realizar ensayos experimentales de otro tipo sobre estas mezclas modificadas como, el ensayo de fatiga y el ensayo de ahuellamiento, los cuales son esenciales para el pre dimensionamiento y diseño de las diferentes capas que conforman la estructura del pavimento.
- Probar los aditivos usados en esta investigación en diferentes tipos de compuestos como suelo y cemento portland, con el fin de conocer la mejora que estos presentan en sus propiedades.
- Aumentar la cantidad de réplicas realizadas para cada ensayo hecho, esto con el fin de reducir la variabilidad obtenida entre cada resultado.
- Realizar el diseño de las mezclas por el método Superpave, un método que estudia y analiza a mayor fondo las propiedades reológicas del asfalto. Esto para conocer si existen variaciones en los resultados con las mezclas diseñadas por la metodología Marshall.

12. REFERENCIAS

- [1] V. Yepes, “Evolución histórica de la fabricación de mezclas bituminosas,” (Online) *Avalaible*, 2014.
<https://victoryepes.blogs.upv.es/2014/04/17/evolucion-historica-de-la-fabricacion-de-mezclas-bituminosas/>.
- [2] M. A. del V. Carlos Kraemer, Jose M. Pardillo, Sandro Rocci, Manuel G. Romana. Victor Sanchez Blanco, *Ingenieria de Carreteras*, Mc Graw Hi. España, 2004.
- [3] K. Schwab and World Economic Forum - WEF, *Insight Report - World Economic Forum*. 2019.
- [4] *Estudios Económicos de la OECD: Colombia 2019*. OECD, 2019.
- [5] Ministerio de transporte, “Crecimiento del PIB 2019,” (Online) *Avalaible*.
<https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/8127/sector-de-infraestructura-aporto-107-en-el-crecimiento-del-pib-2019/>.
- [6] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “Estado de la Red Vial.”
<https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/2-principal/57-estado-de-la-red-vial>.
- [7] C. J. Slebi-Acevedo, P. Lastra-González, P. Pascual-Muñoz, and D. Castro-Fresno, “Mechanical performance of fibers in hot mix asphalt: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 200, pp. 756–769, 2019.
- [8] L. Brasileiro, F. Moreno-Navarro, R. Tauste-Martínez, J. Matos, and M. del C. Rubio-Gámez, “Reclaimed polymers as asphalt binder modifiers for more sustainable roads: A review,” *Sustain.*, vol. 11, no. 3, pp. 1–20, 2019.
- [9] D. (1987). Button, J., & Little, “Mechanistic evaluation of selected

asphalt additives,” pp. 62–90, 1987.

- [10] M. I. Al-Jarallah and K. W. Lee, “Evaluation of Hydrated Lime As an Antistripping Additive for Asphalt Mixtures.,” *J. Eng. Sci.*, vol. 13, no. 1, pp. 65–83, 1987.
- [11] Sterns et al, “United States Patent : 7413882 United States Patent : 7413882,” *October*, vol. 183, no. 8, pp. 551–565, 2010.
- [12] A. U. Ravi Shankar, G. Sarang, B. M. Lekha, and C. Carlton-Carew, “Investigation on the Effect of Anti Stripping Additives on the Moisture Sensitivity of Bituminous Concrete,” no. February, pp. 228–239, 2018.
- [13] O. J. Reyes Ortiz and F. A. Reyes Lizcano, “Comportamiento Mecanico Y Dinamico De Una Mezcla Asfaltica Con Adicion De Fibras,” no. 15, pp. 12–28, 2005.
- [14] Ministry of Road Transport and Highways (MORTH, “Manual for Construction and Supervision of Bituminous Works,” 2001.
- [15] M. Panda, A. Suchismita, and J. Giri, “Utilization of Ripe Coconut Fiber in Stone Matrix Asphalt Mixes,” *Int. J. Transp. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 4, pp. 289–302, 2013, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1260/2046-0430.2.4.289>.
- [16] N. U. Koçkal and S. Köfteci, “Aggressive Environmental Effect on Polypropylene Fibre Reinforced Hot Mix Asphalt,” *Procedia Eng.*, vol. 161, pp. 963–969, 2016.
- [17] P. Jaskuła, M. Stienss, and C. Szydłowski, “Effect of Polymer Fibres Reinforcement on Selected Properties of Asphalt Mixtures,” *Procedia Eng.*, vol. 172, pp. 441–448, 2017.
- [18] P. P. N. : 05/PRT/M/2007, “Behavior of Asphalt Concrete Mixtures with

- Reclaimed Polyethylene as Additive,” *Ятыатат*, vol. вы12у, no. 235, p. 245, 2007.
- [19] H. A. Rondón-Quintana, Y. Molano-Mora, and A. M. Tenjo-Lancheros, “Influencia de la temperatura de compactación sobre la resistencia bajo carga monotonica de mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado de llantas,” *Tecnológicas*, no. 29, p. 13, 2012.
- [20] M. Fakhri, K. Hassani, and A. R. Ghanizadeh, “Impact of Loading Frequency on the Fatigue behavior of SBS Modified Asphalt Mixtures,” *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 104, pp. 69–78, 2013, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.099>.
- [21] J. Cárdenas and E. Fonseca, “Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura,” *Rev. EIA*, vol. 12, no. 2, pp. 125–137, 2009.
- [22] G. A. Hube, T. W. Kennedy, and M. Anderson, *The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays*. 1994.
- [23] Constructora Arquintex, “HISTORIA DE ASFALTO,” (Online) Available. <http://arquintex.com/historia-de-asfalto.html>.
- [24] NAPA, “National Asphalt Pavement Association (NAPA) - National Asphalt Pavement Association,” Online- Available. <https://www.asphaltpavement.org/>.
- [25] R. Q. H. Reyes Lizcano Fredy, *Pavimentos: Materiales, construcción y diseño*, 1RA. EDICI. 2015.
- [26] B. Vargas, “Introduccion a la Tecnologia de los Microaglomerados Asfálticos Discontinuos en Caliente,” p. 11.

- [27] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “ARTÍCULO 451 – 13- MEZCLA ABIERTA EN CALIENTE,” pp. 50–150, 2012.
- [28] W. H. Daly, *Relationship Between Chemical Makeup of Binders and Engineering Performance*. 2017.
- [29] QuimiNet, “Los elastómeros y sus principales aplicaciones en la industria,” *Online- Available*. https://www.quiminet.com/articulos/los-elastomeros-y-sus-principales-aplicaciones-en-la-industria-2668514.htm?mkt_source=22&mkt_medium=1018031224&mkt_term=66&mkt_content=&mkt_campaign=1.
- [30] E. Alfonso Brindis, “Propiedades Básicas De Los Polímeros,” pp. 4–42, 2002.
- [31] Berta García, “Cal hidratada Un aditivo probado para la durabilidad de los pavimentos asfálticos Oxidación y Envejecimiento,” pp. 1–4, 1999.
- [32] M. Shukla, D. Tiwari, and K. Sitaramanjaneyulu, “Performance Characteristics of Fiber Modified Asphalt Concrete Mixes,” *Int. J. Pavement Eng. Asph. Technol.*, vol. 15, no. 1, pp. 38–50, 2015.
- [33] C. H. Fonseca, “Estudio De Deformaciones Plásticas Permanentes (Rutting) En Mezclas Asfálticas Elaboradas Con Materiales De La Zona Noreste De México Mediante La Máquina De Pista (Wheel Tracking),” *Rev. Ing. Construcción*, vol. 15, no. 2, pp. 83–89, 2011.
- [34] Y. Jiang and R. S. McDaniel, “APPLICATION OF CRACKING AND SEATING AND USE OF FIBERS TO CONTROL REFLECTIVE CRACKING,” (*Online*) *Available*, 1993. <https://trid.trb.org/view/382544>.
- [35] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “Articulo 450-13.Mezclas Asfálticas En Caliente De Gradación Continua (Concreto Asfáltico),” pp. 1–8, 2013.

- [36] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “Artículo 410-13. Suministro De Cemento Asfáltico,” pp. 1–7, 2013, [Online]. Available: http://giv.com.co/invias2013/410_SUMINISTRO_DE_CEMENTO_ASFALTICO.pdf.
- [37] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “INV E-133-13.Equivalente de arena de suelos y agregados finos.,” pp. 1–22, 2013.
- [38] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “INV E-218-13. Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm(1 1/2”) por medio de la maquina de los Ángeles.,” pp. 1–8, 2013.
- [39] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “INV E-220-13. Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o magnesio.,” pp. 1–12, 2013.
- [40] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “INV E-222-13. Densidad, densidad relativa (Gravedad especifica) y absorción del agregado fino.,” pp. 1–17, 2013.
- [41] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “INV E-227-13. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso.,” pp. 1–7, 2013.
- [42] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “INV E-235-13. Valor de azul de metileno en agregados finos.,” no. 4, pp. 1–9, 2013.
- [43] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “INV E-238-13. Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato micro-deval.,” pp. 1–10, 2013.
- [44] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “INV E-239-13. Determinación del contenido de vacios en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría),” pp. 1–12, 2013.

- [45] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “INV E-240-13. Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos.,” pp. 1–9, 2013.
- [46] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “INV E-702-13. Ductilidad de los materiales asfálticos,” pp. 1–7, 2013.
- [47] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “INV E-706-13. Penetración de los materiales bituminosos,” pp. 1–9, 2013.
- [48] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “INV E-709-13. Puntos de inflamación y de combustión mediante la copa abierta cleveland.,” *Invias*, pp. 1–19, 2013.
- [49] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “INV E-712-13. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos(Aparato de anillo y bola),” pp. 1–9, 2013.
- [50] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “INV E-725-13 Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta,” pp. 1–13, 2013.
- [51] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “INV E-736-13. Porcentaje de vacios en mezclas asfálticas densas y abiertas.,” pp. 1–6, 2013.
- [52] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “INV E-748-13 Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall,” pp. 1–20, 2013.
- [53] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “INV E-760-13 Caracterización de las mezclas asfálticas abiertas por medio del ensayo cantabro de pérdida por desgaste,” pp. 1–5, 2013.
- [54] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “INV E-799-13. ANálisis volumétrico

de mezclas asfálticas compactadas en caliente.,” pp. 50–150, 2013.

- [55] W. science Group, “Journal Impact Factor - Journal Citation Reports.”
<https://clarivate.com/webofsciencegroup/solutions/journal-citation-reports/>.
- [56] INVIAS Instituto Nacional de Vías, “INV E-733-13. Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos.,” pp. 50–150, 2013.
- [57] Elsevier, “Elsevier | An Information Analytics Business | Empowering Knowledge,” 2021. <https://www.elsevier.com/>.
- [58] MDPI, “MDPI - Publisher of Open Access Journals,” 2021. <https://www.mdpi.com/>.
- [59] S. Link, “Home - Springer,” 2021. <https://link.springer.com/>.
- [60] T. & Francis, “Taylor & Francis Online: Peer-reviewed Journals,” 2021. <https://www.tandfonline.com/>.
- [61] F. T. S. Aragão, J. Lee, Y. R. Kim, and P. Karki, “Material-specific effects of hydrated lime on the properties and performance behavior of asphalt mixtures and asphaltic pavements,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 4, pp. 538–544, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.005.
- [62] A. Rasouli, A. Kavussi, M. J. Qazizadeh, and A. H. Taghikhani, “Evaluating the effect of laboratory aging on fatigue behavior of asphalt mixtures containing hydrated lime,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 164, pp. 655–662, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.003.
- [63] K. Mongkol, P. Chaturabong, and A. Suwannaplai, “Effect of bagasse and coconut peat fillers on asphalt mixture workability,” *Coatings*, vol.

10, no. 12, pp. 1–15, Dec. 2020, doi: 10.3390/coatings10121262.

- [64] S. Tapkin, Ü. Uşar, A. Tuncan, and M. Tuncan, “Repeated creep behavior of polypropylene fiber-reinforced bituminous mixtures,” *J. Transp. Eng.*, vol. 135, no. 4, pp. 240–249, 2009, doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2009)135:4(240).
- [65] C. H. Higuera Sandoval, B. N. Olarte Riaño, and R. D. Soler Sánchez, “Effect of the recycled rubber grain in the rutting of an asphalt mixture type MD-12,” *Respuestas*, vol. 24, no. 1, pp. 86–97, 2019, doi: 10.22463/0122820x.1810.
- [66] S. A. Dantas, N. Márcio, M. F. Jorge, P. Paulo, and A. A. P. L. Picado, “Properties of Asphalt-Rubber Binders Related to Characteristics of the Incorporated Crumb Rubber,” no. January, 2003.
- [67] A. M. O. and H. Y. A. Aboelkasim DIAB, Zhanping YOU, “Effect of Hydatres Lime Application Method on Mechanical and Fatigue,” *CICTP*, pp. 3327–3334, 2012.

13. ANEXOS

ANEXO A- REGISTRO FOTOGRAFICO

- **Diseño de mezclas**

	
<p>Figura 1. Preparación de aditivos</p>	<p>Figura 2. Fibra de coco</p>
	
<p>Figura 3. Adición de cal hidratada</p>	<p>Figura 4. Adición de grano de caucho reciclado</p>



Figura 5. Adición de fibra de coco



Figura 6. Adición de fibra de polipropileno



Figura 7. Proceso de mezcla



Figura 8. Aditivo incorporado en la mezcla



Figura 9. Colocación de mezclas en molde



Figura 10. Compactación de briquetas



Figura 11. Briquetas compactadas



Figura 12. Briquetas terminadas

- Toma de densidades



Figura 13. Toma de alturas



Figura 14. Toma de diámetros



Figura 15. Toma de pesos secos



Figura 16. Toma de pesos sumergidos

- Ensayo Cantabro



Figura 17. Máquina de los ángeles



Figura 18. Toma de peso inicial



Figura 19. Carga de briqueta en la máquina



Figura 20. Briquetas desgastadas

- Ensayo Marshall



Figura 21. Briquetas en baño de maría



Figura 22. Montaje de briqueta



Figura 23. Briqueta fallada



Figura 24. Briquetas al final del ensayo

- Ensayo Tracción Indirecta

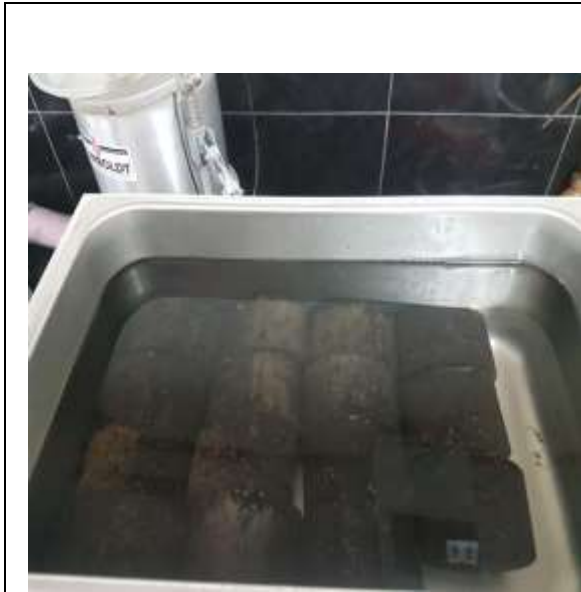


Figura 25. Briquetas en baño de maría



Figura 26. Montaje de briqueta



Figura 27. Briqueta fallada



Figura 28. Briquetas al final del ensayo

ANEXO B- DATOS REGISTRADOS Y OBTENIDOS.

1. DISEÑO DE MEZCLA CONTROL (MDC-19)

	CA	Altura	Peso Seco	Peso Sumergido	Peso SSS* (Saturado y superficialmente seco)	Estabilidad	Flujo	Flujo	Relación Estabilidad / Flujo	Gravedad máxima teórica Gmm	Densidad Bulk Gmb I NVE 733	%Vacíos VA I NVE 736	Vacíos en el agregado mineral VAM (%) I NVE 799	Vacíos llenos de asfalto VFA (%) I NVE 799
Consecutivo	[%]	[cm]	[g]	[g]	[g]	[kN]	[in/100]	[mm]	[kN/mm]					
1	4.5	6.41	1187	666	1189	12.11	145	3.683	3.29	2.47	2.27	8.12	18.21	55.42
2		6.44	1189	668	1191	12.56	150	3.81	3.30		2.27	7.96	18.07	55.94
3		6.42	1194	661	1196	12.34	150	3.81	3.24		2.23	9.65	19.57	50.70
PROMEDIOS		6.4233	1190	665	1192	12.34	148.33	3.77	3.27		2.26	8.58	18.62	54.02
4	5	6.35	1185	689	1189	13.50	140	3.556	3.80	2.45	2.37	3.33	15.04	77.87
5		6.4	1188	684	1190	13.55	142	3.6068	3.76		2.35	4.23	15.83	73.27
6		6.39	1190	688	1194	13.47	140	3.556	3.79		2.35	4.07	15.69	74.05
PROMEDIOS		6.38	1187.7	687	1191	13.51	140.67	3.57	3.78		2.36	3.88	15.52	75.06
7	5.5	6.38	1193	690	1194	13.28	120	3.048	4.36	2.43	2.37	2.73	15.59	82.52
8		6.36	1191	685	1192	13.15	122	3.0988	4.24		2.35	3.46	16.23	78.66
9		6.35	1195	687	1198	13.27	125	3.175	4.18		2.34	3.90	16.61	76.53
		6.363	1193	687.3	1194.7	13.23	122.3	3.11	4.26		2.35	3.36	16.14	79.24
10	6	6.36	1192	654	1195	12.56	165	4.191	3.00	2.42	2.20	8.78	21.84	59.80
11		6.35	1190	660	1192	12.18	165	4.191	2.91		2.24	7.39	20.66	64.21
12		6.35	1187	666	1190	12.24	165	4.191	2.92		2.27	6.22	19.65	68.36
PROMEDIOS		6.4	1189.7	660.0	1192.3	12.3	165.0	4.2	2.9		2.24	7.46	20.72	64.12



2. PROPIEDADES VOLUMETRICAS

- MEZCLA CONTROL

Briqueta N.	CANTABRO											
	1	2	3	4*	5*	6*	7*	8*	9*	10*	11*	12*
Tipo de asfalto	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19
% Asfalto	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
Diámetro (cm)	10.16	10.25	10.25	10.19	10.21	10.17	10.19	10.18	10.18	10.35	10.19	10.20
Altura de briqueta (cm)	6.28	6.21	6.40	6.38	6.47	6.43	6.43	6.50	6.33	6.13	6.27	6.32
Peso seco (g)	1181.4	1186.4	1198.9	1192.5	1186.7	1185.6	1184.3	1175.5	1187.4	1188.6	1173	1172.2
Peso SSS(g)				1193.4	1187.6	1186.2	1185	1175.9	1187.7	1188.8	1173.5	1172.4
Peso en el agua (g)				687.7	683	683.5	681.6	678.5	686.6	689.5	675.8	674.1

* Briquetas seleccionadas para realizar tracción indirecta (vía seca)

*Briquetas seleccionadas para realizar tracción indirecta(vía húmeda)

*Briquetas para Marshall



Consecutivo	Gravedad máxima teórica Gmm	Densidad Bulk Gmb I NVE 733	Densidad de cada briqueta	Volumen total de cada briqueta [cm³]	%Vacíos VA I NVE 736	Volumen de Vacíos	Gravedad específica del agregado Gse I NVE 799	Asfalto absorbido I NVE 799	Volumen de Asfalto	Masa Asfalto (g)	Volumen de Asfalto absorbido Vba	Volumen Asfalto Efectivo Vbe	Vacíos en el agregado mineral VAM (%) I NVE 799	Vacíos llenos de asfalto VFA (%) I NVE 799	
			[g/cm³]			[cm³]			[cm³]		[cm³]	[cm³]			[cm³]
1	2.44	0.00	0.00	509.08	0.00	0.00	2.44	0.00	61.87	62.61	0.00	0.00	0.00	0.00	
2	2.44	0.00	0.00	512.37	0.00	0.00	2.44	0.00	62.13	62.88	0.00	0.00	0.00	0.00	
3	2.44	0.00	0.00	527.93	0.00	0.00	2.44	0.00	62.79	63.54	0.00	0.00	0.00	0.00	
4	2.44	2.36	2.35	520.55	3.38	17.60	2.44	3.88	62.45	63.20	2.42	60.03	14.91	77.33	
5	2.44	2.35	2.34	529.31	3.64	19.27	2.44	4.18	62.15	62.90	2.60	59.55	14.89	75.55	
6	2.44	2.36	2.35	522.77	3.37	17.60	2.44	3.86	62.09	62.84	2.40	59.69	14.79	77.23	
7	2.44	2.35	2.35	524.80	3.61	18.93	2.44	4.14	62.02	62.77	2.57	59.45	14.94	75.85	
8	2.44	2.36	2.36	529.20	3.17	16.77	2.44	3.63	61.56	62.30	2.24	59.33	14.38	77.96	
9	2.44	2.32	2.32	515.28	4.81	24.79	2.44	5.57	62.19	62.93	3.46	58.72	16.21	70.32	
10	2.44	2.38	2.37	516.37	2.68	13.84	2.44	3.07	62.26	63.01	1.91	60.35	14.37	81.35	
11	2.44	2.33	2.32	511.89	4.47	22.87	2.44	5.16	61.46	62.20	3.17	58.29	15.85	71.82	
12	2.44	2.35	2.35	516.13	3.62	18.66	2.44	4.15	61.39	62.13	2.55	58.84	15.02	75.92	
PROMEDIOS					3.64								PROMEDIOS	15.04	75.93

- **MEZCLA MODIFICADA CON CH.**

<i>Briqueta N.</i>	CANTABRO											
	1	2	3	4*	5*	6*	7*	8*	9*	10*	11*	12*
Tipo de asfalto	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19
% Asfalto	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
Diámetro (cm)	10.28	10.20	10.23	10.30	10.17	10.33	10.22	10.20	10.19	10.19	10.24	10.17
Altura de briqueta (cm)	6.45	6.48	6.58	6.41	6.53	6.35	6.40	6.32	6.40	6.37	6.53	6.66
Peso seco (g)	1184.2	1183.4	1184.3	1180.6	1185.3	1183.8	1181.3	1177.9	1171.1	1184	1185.8	1189.6
Peso SSS(g)				1183.1	1187.2	1185	1183.4	1180	1173.3	1188.2	1188	1192.6
Peso en el agua (g)				673.2	677.3	676.9	676.1	672	667.9	679.9	678.9	679.4

* Briquetas seleccionadas para realizar tracción indirecta (vía seca)

*Briquetas seleccionadas para realizar tracción indirecta(vía húmeda)

*Briquetas para Marshall



N.	Gravedad máxima teórica Gmm	Densidad Bulk Gmb I NVE 733	Densidad de cada briqueta	Volumen total de cada briqueta	%Vacíos VA I NVE 736	Volumen de Vacíos	Gravedad específica del agregado Gse I NVE 799	Asfalto absorbido I NVE 799	Volumen de Asfalto	Masa Asfalto	Vba	Vbe	Vacíos en el agregado mineral VAM (%) I NVE 799	Vacíos llenos de asfalto VFA (%) I NVE 799	
			[g/cm³]	[cm³]		[cm³]			[cm³]						
1	2.44	0.00	0.00	534.95	0.00	0.00	2.44	0.00	62.02	62.76	0.00	0.00	0.00	0.00	
2	2.44	0.00	0.00	529.01	0.00	0.00	2.44	0.00	61.98	62.72	0.00	0.00	0.00	0.00	
3	2.44	0.00	0.00	541.21	0.00	0.00	2.44	0.00	62.02	62.77	0.00	0.00	0.00	0.00	
4	2.44	2.32	2.31	534.68	5.13	27.44	2.44	5.96	61.83	62.57	3.68	58.15	16.01	67.94	
5	2.44	2.32	2.32	530.40	4.76	25.22	2.44	5.50	62.08	62.82	3.42	58.66	15.81	69.93	
6	2.44	2.33	2.32	531.58	4.54	24.13	2.44	5.24	62.00	62.74	3.25	58.75	15.59	70.89	
7	2.44	2.33	2.32	524.49	4.59	24.07	2.44	5.30	61.87	62.61	3.28	58.58	15.76	70.87	
8	2.44	2.32	2.31	516.22	5.00	25.79	2.44	5.79	61.69	62.43	3.57	58.12	16.25	69.26	
9	2.44	2.34	2.34	522.08	4.01	20.95	2.44	4.62	62.01	62.75	2.86	59.14	15.34	73.84	
10	2.44	2.33	2.32	520.09	4.56	23.72	2.44	5.27	62.01	62.75	3.27	58.74	15.85	71.24	
11	2.44	2.33	2.32	537.25	4.57	24.53	2.44	5.28	62.10	62.85	3.28	58.83	15.51	70.57	
12	2.44	2.32	2.31	541.11	5.02	27.19	2.44	5.83	62.30	63.05	3.63	58.67	15.87	68.33	
PROMEDIOS					4.69								PROMEDIOS	15.78	70.32

- **MEZCLA MODIFICADA CON FC.**

<i>Briqueta N.</i>	CANTABRO											
	1	2	3	4*	5*	6*	7*	8*	9*	10*	11*	12*
Tipo de asfalto	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19
% Asfalto	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
Diámetro (cm)	10.20	10.21	10.19	10.20	10.17	10.35	10.21	10.17	10.22	10.21	10.19	10.28
Altura de briqueta (cm)	6.59	6.50	6.56	6.55	6.44	6.41	6.53	6.58	6.58	6.47	6.42	6.63
Peso seco (g)	1181.8	1187.2	1183.3	1183.4	1173.9	1188	1181.1	1185.6	1182.5	1183.3	1185	1181.3
Peso SSS(g)				1185.2	1175.2	1189.3	1183.4	1188.4	1184.2	1184.3	1186.7	1183.8
Peso en el agua (g)				674.1	669	676.5	666	678.3	669.4	670.5	674.7	669.3

* Briquetas seleccionadas para realizar tracción indirecta (vía seca)

*Briquetas seleccionadas para realizar tracción indirecta(vía húmeda)

*Briquetas para Marshall



Consecutivo	Gravedad máxima teórica Gmm	Densidad Bulk Gmb I NVE 733	Densidad de cada briqueta	Volumen total de cada briqueta [cm³]	%Vacíos VA I NVE 736	Volumen de Vacíos	Gravedad específica del agregado Gse I NVE 799	Asfalto absorbido I NVE 799	Volumen de Asfalto (cm3)	Masa Asfalto (g)	Volumen de Asfalto absorbido Vba (cm³)	Volumen Asfalto Efectivo Vbe (cm³)	Vacíos en el agregado mineral VAM (%) I NVE 799	Vacíos llenos de asfalto VFA (%) I NVE 799	
			[g/cm³]			[cm³]									
1	2.44	0.00	0.00	538.18	0.00	0.00	2.44	0.00	61.89	62.64	0.00	0.00	0.00	0.00	
2	2.44	0.00	0.00	532.70	0.00	0.00	2.44	0.00	62.18	62.92	0.00	0.00	0.00	0.00	
3	2.44	0.00	0.00	534.61	0.00	0.00	2.44	0.00	61.97	62.71	0.00	0.00	0.00	0.00	
4	2.44	2.32	2.31	534.77	5.13	27.44	2.44	5.95	61.98	62.72	3.69	58.29	16.03	67.99	
5	2.44	2.32	2.31	523.66	4.98	26.09	2.44	5.77	61.48	62.22	3.55	57.93	16.04	68.95	
6	2.44	2.32	2.31	538.86	5.08	27.36	2.44	5.89	62.22	62.96	3.66	58.55	15.94	68.15	
7	2.44	2.28	2.28	534.73	6.47	34.59	2.44	7.59	61.86	62.60	4.70	57.16	17.16	62.30	
8	2.44	2.32	2.32	533.96	4.77	25.46	2.44	5.52	62.09	62.84	3.43	58.67	15.76	69.73	
9	2.44	2.30	2.29	539.91	5.82	31.43	2.44	6.79	61.97	62.71	4.21	57.76	16.52	64.76	
10	2.44	2.30	2.30	529.37	5.64	29.84	2.44	6.57	61.97	62.71	4.07	57.90	16.58	65.99	
11	2.44	2.31	2.31	523.02	5.17	27.04	2.44	6.00	62.06	62.81	3.72	58.34	16.32	68.33	
12	2.44	2.30	2.29	550.02	5.93	32.59	2.44	6.92	61.87	62.61	4.28	57.59	16.40	63.86	
PROMEDIOS					5.44								PROMEDIOS	16.31	66.67

- **MEZCLA MODIFICADA CON PP**

<i>Briqueta N.</i>	CANTABRO											
	1	2	3	4*	5*	6*	7*	8*	9*	10*	11*	12*
Tipo de asfalto	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19
% Asfalto	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
Diámetro (cm)	10.19	10.27	10.20	10.19	10.19	10.18	10.18	10.18	10.18	10.16	10.21	10.20
Altura de briqueta (cm)	6.63	6.49	6.61	6.66	6.49	6.58	6.80	6.66	6.52	6.61	6.52	6.57
Peso seco (g)	1185.1	1187.2	1186.6	1186.6	1191.3	1185	1190.2	1184.5	1191.2	1188.4	1189.9	1185.7
Peso SSS(g)				1188.1	1193.2	1186.8	1191.5	1185.8	1192	1189.7	1191.8	1187.3
Peso en el agua (g)				669.5	670.4	665.5	663.3	668.5	672.7	667.3	668.3	669.1

* Briquetas seleccionadas para realizar tracción indirecta (vía seca)

*Briquetas seleccionadas para realizar tracción indirecta(vía húmeda)

*Briquetas para Marshall



Consecutivo	Gravedad máxima teórica Gmm	Densidad Bulk Gmb I NVE 733	Densidad de cada briqueta	Volumen total de cada briqueta [cm³]	%Vacíos VA I NVE 736	Volumen de Vacíos [cm³]	Gravedad específica del agregado Gse I NVE 799	Asfalto absorbido I NVE 799	Volumen de Asfalto (cm³)	Masa Asfalto (g)	Volumen de Asfalto absorbido Vba (cm³)	Volumen Asfalto Efectivo Vbe (cm³)	Vacíos en el agregado mineral VAM (%) I NVE 799	Vacíos llenos de asfalto VFA (%) I NVE 799	
			[g/cm3]												
1	2.44	0.00	0.00	540.76	0.00	0.00	2.44	0.00	62.07	62.81	0.00	0.00	0.00	0.00	
2	2.44	0.00	0.00	537.07	0.00	0.00	2.44	0.00	62.18	62.92	0.00	0.00	0.00	0.00	
3	2.44	0.00	0.00	540.14	0.00	0.00	2.44	0.00	62.14	62.89	0.00	0.00	0.00	0.00	
4	2.44	2.29	2.28	543.84	6.25	33.99	2.44	7.32	62.14	62.89	4.55	57.59	16.84	62.89	
5	2.44	2.28	2.27	529.92	6.64	35.16	2.44	7.80	62.39	63.14	4.86	57.53	17.49	62.06	
6	2.44	2.27	2.27	535.87	6.86	36.77	2.44	8.08	62.06	62.81	5.01	57.05	17.51	60.81	
7	2.44	2.25	2.25	554.14	7.67	42.53	2.44	9.11	62.33	63.08	5.68	56.66	17.90	57.12	
8	2.44	2.29	2.28	541.89	6.18	33.49	2.44	7.23	62.03	62.78	4.49	57.55	16.80	63.21	
9	2.44	2.29	2.29	530.22	6.01	31.89	2.44	7.03	62.38	63.13	4.38	58.00	16.95	64.53	
10	2.44	2.27	2.27	535.94	6.79	36.40	2.44	7.99	62.24	62.99	4.97	57.26	17.48	61.14	
11	2.44	2.27	2.27	534.66	6.87	36.73	2.44	8.09	62.32	63.06	5.04	57.28	17.58	60.93	
12	2.44	2.29	2.28	536.12	6.25	33.50	2.44	7.32	62.10	62.84	4.54	57.55	16.98	63.21	
PROMEDIOS					6.61								PROMEDIOS	17.28	61.77



- MEZCLA MODIFICADA CON GCR

Briqueta N.	CANTABRO											
	1	2	3	4*	5*	6*	7*	8*	9*	10*	11*	12*
Tipo de asfalto	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19
% Asfalto	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
Diametro (cm)	10.23	10.24	10.22	10.17	10.29	10.25	10.17	10.19	10.17	10.21	10.18	10.20
Altura de briqueta (cm)	6.50	6.45	6.52	6.49	6.43	6.44	6.37	6.51	6.49	6.41	6.46	6.38
Peso seco (g)	1190.2	1184.2	1182.8	1189.4	1176	1184.4	1181.8	1190.2	1186.8	1187.4	1183.6	1181.4
Peso SSS(g)				1191.8	1188.8	1182.5	1183.7	1192.3	1188.8	1189.3	1185.5	1182.8
Peso en el agua (g)				677.3	670	674.1	674.4	678	677.1	677.8	673.7	672.8

* Briquetas seleccionadas para realizar tracción indirecta (vía seca)

*Briquetas seleccionadas para realizar tracción indirecta(vía húmeda)

*Briquetas para Marshall



Consecutivo	Gravedad máxima teórica Gmm	Densidad Bulk Gmb I NVE 733	Densidad de cada briqueta	Volumen total de cada briqueta [cm³]	%Vacíos VA I NVE 736	Volumen de Vacíos	Gravedad específica del agregado Gse I NVE 799	Asfalto absorbido I NVE 799	Volumen de Asfalto	Masa Asfalto (g)	Volumen de Asfalto absorbido Vba	Volumen Asfalto Efectivo Vbe	Vacíos en el agregado mineral VAM (%) I NVE 799	Vacíos llenos de asfalto VFA (%) I NVE 799
			[g/cm³]			[cm³]			[cm³]		(cm³)	(cm³)		
1	2.44	0.00	0.00	534.36	0.00	0.00	2.44	0.00	62.33	63.08	0.00	0.00	0.00	0.00
2	2.44	0.00	0.00	530.85	0.00	0.00	2.44	0.00	62.02	62.76	0.00	0.00	0.00	0.00
3	2.44	0.00	0.00	534.50	0.00	0.00	2.44	0.00	61.95	62.69	0.00	0.00	0.00	0.00
4	2.44	2.31	2.30	527.02	5.28	27.83	2.44	6.13	62.29	63.04	3.82	58.47	16.37	67.75
5	2.44	2.27	2.26	534.29	7.12	38.06	2.44	8.41	61.59	62.33	5.18	56.41	17.68	59.71
6	2.44	2.33	2.32	531.53	4.55	24.17	2.44	5.25	62.03	62.77	3.26	58.77	15.60	70.86
7	2.44	2.32	2.31	517.41	4.92	25.48	2.44	5.71	61.89	62.64	3.53	58.36	16.20	69.61
8	2.44	2.31	2.31	530.51	5.18	27.48	2.44	6.01	62.33	63.08	3.75	58.58	16.22	68.07
9	2.44	2.32	2.31	527.66	4.97	26.23	2.44	5.76	62.15	62.90	3.58	58.57	16.07	69.07
10	2.44	2.32	2.31	525.20	4.88	25.66	2.44	5.66	62.19	62.93	3.52	58.67	16.06	69.57
11	2.44	2.31	2.31	525.75	5.24	27.58	2.44	6.09	61.99	62.73	3.78	58.21	16.32	67.86
12	2.44	2.32	2.31	521.59	5.09	26.53	2.44	5.90	61.87	62.61	3.65	58.22	16.25	68.69
PROMEDIOS					5.25							PROMEDIOS	16.31	67.91



3. ENSAYO MARSHALL

- MEZCLA CONTROL

	CA	Altura	Estabilidad	Estabilidad	Flujo	Flujo	Relación Estabilidad / Flujo
Consecutivo	[%]	[cm]	[kN]	[kg]	[in/100]	[mm]	[kN/mm]
5	5.3	6.47	13.35	1361.3	105	2.67	5.01
6	5.3	6.43	12.86	1311.3	110	2.79	4.60
7	5.3	6.43	14.57	1485.7	105	2.67	5.46
		Promedio	13.59			2.71	5.02

- MEZCLA MODIFICADA CON CH.

	CA	Altura	Estabilidad	Estabilidad	Flujo	Flujo	Relación Estabilidad / Flujo
Consecutivo	[%]	[cm]	[kN]	[kg]	[in/100]	[mm]	[kN/mm]
5	5.3	6.53	16.03	1634.6	160	4.06	3.94
6	5.3	6.35	17.32	1766.1	170	4.32	4.01
8	5.3	6.32	17.18	1751.8	195	4.95	3.47
		Promedio	16.84			4.45	3.81

- **MEZCLA MODIFICADA CON FC.**

	CA	Altura	Estabilidad	Estabilidad	Flujo	Flujo	Relación Estabilidad / Flujo
Consecutivo	[%]	[cm]	[kN]	[kg]	[in/100]	[mm]	[kN/mm]
5	5.3	6.44	16.28	1660.1	195	4.95	3.29
10	5.3	6.47	16.12	1643.8	185	4.70	3.43
11	5.3	6.42	15.81	1612.1	200	5.08	3.11
		Promedio	16.07			4.91	3.28

- **MEZCLA MODIFICADA CON PP.**

	CA	Altura	Estabilidad	Estabilidad	Flujo	Flujo	Relación Estabilidad / Flujo
Consecutivo	[%]	[cm]	[kN]	[kg]	[in/100]	[mm]	[kN/mm]
4	5.3	6.66	13.83	1410.2	170	4.32	3.20
7	5.3	6.80	12.17	1241.0	205	5.21	2.34
10	5.3	6.61	13.33	1359.3	195	4.95	2.69
		Promedio	13.11			4.83	2.74

- **MEZCLA MODIFICADA CON GCR.**

	CA	Altura	Estabilidad	Estabilidad	Flujo	Flujo	Relación Estabilidad / Flujo
Consecutivo	[%]	[cm]	[kN]	[kg]	[in/100]	[mm]	[kN/mm]
5	5.3	6.43	14.60	1488.8	190	4.83	3.03
10	5.3	6.41	13.72	1399.0	155	3.94	3.48
11	5.3	6.46	14.98	1527.5	170	4.32	3.47
		Promedio	14.43			4.36	3.33



4. ENSAYO TRACCION INDIRECTA

- MEZCLA CONTROL

TOMA DE DATOS RESISTENCIA DE UNA MEZCLA BITUMINOSA COMPACTADA AL DAÑO CAUSADO POR HUMEDAD

Fecha de ensayo	22/05/2021
Tipo de mezcla:	CONTROL

1. Resistencia a la tensión indirecta

GRUPO HUMEDO

Briqueta N.	Lectura de carga (kN)	Lectura de carga (N)	Altura(mm)	Diametro(mm)	RTH(kPa)
8	13.54	13540	65.00	101.80	1302.68
11	13.2	13200	62.70	101.90	1315.26
12	13.37	13370	63.20	102.00	1320.37
PROMEDIO	13.37				1312.77

RRT(%)
80.62
84.64
79.13

GRUPO SECO

Briqueta N.	Lectura de carga (kN)	Lectura de carga (N)	Altura(mm)	Diametro(mm)	RTS(kPa)
4	16.5	16500	63.80	101.90	1615.73
9	15.73	15730	63.30	101.80	1554.02
10	16.63	16630	61.30	103.50	1668.67
PROMEDIO	16.287				1612.81

PROMEDIO	81.46
----------	--------------



• **MEZCLA MODIFICADA CON CH**

TOMA DE DATOS RESISTENCIA DE UNA MEZCLA BITUMINOSA COMPACTADA AL DAÑO CAUSADO POR HUMEDAD

Fecha de ensayo	22/05/2021
Tipo de mezcla:	MOD. CAL

1. Resistencia a la tensión indirecta

GRUPO HUMEDO

Briqueta N.	Lectura de carga (kN)	Lectura de carga (N)	Altura(mm)	Diametro(mm)	RTH(kPa)
4	13.86	13860	64.10	103.00	1336.44
7	14.9	14900	64.00	102.20	1450.23
9	13.8	13800	64.00	101.90	1347.12
PROMEDIO	14.187				1377.93

GRUPO SECO

Briqueta N.	Lectura de carga (kN)	Lectura de carga (N)	Altura(mm)	Diametro(mm)	RTS(kPa)
10	14.76	14760	63.70	101.90	1447.61
11	14.47	14470	65.30	102.40	1377.64
12	14.68	14680	66.60	101.70	1379.78
PROMEDIO	14.637				1401.68

RRT(%)

92.32

105.27

97.63

PROMEDIO

98.41



• MEZCLA MODIFICADA CON FC

TOMA DE DATOS RESISTENCIA DE UNA MEZCLA BITUMINOSA COMPACTADA AL DAÑO CAUSADO POR HUMEDAD

Fecha de ensayo	22/05/2021
Tipo de mezcla:	MOD. COCO

1. Resistencia a la tensión indirecta

GRUPO HUMEDO					
Briqueta N.	Lectura de carga (kN)	Lectura de carga (N)	Altura(mm)	Diametro(mm)	RTH(kPa)
7	11.38	11380	65.30	102.10	1086.63
9	11.52	11520	65.80	102.20	1090.58
12	10.8	10800	66.30	102.80	1008.78
PROMEDIOS	11.23				1062.00

GRUPO SECO

Briqueta N.	Lectura de carga (kN)	Lectura de carga (N)	Altura(mm)	Diametro(mm)	RTS(kPa)
4	13.74	13740	65.50	102.00	1309.26
6	12.23	12230	64.10	103.50	1173.57
8	13.84	13840	65.80	101.70	1316.65
PROMEDIOS	13.27				1266.49

RRT(%)	
83.00	
92.93	
76.62	
PROMEDIO	84.18



• **MEZCLA MODIFICADA CON PP**

TOMA DE DATOS RESISTENCIA DE UNA MEZCLA BITUMINOSA COMPACTADA AL DAÑO CAUSADO POR HUMEDAD

Fecha de ensayo	22/05/2021
Tipo de mezcla:	MOD. PP

1. Resistencia a la tensión indirecta

GRUPO HUMEDO					
Briqueta N.	Lectura de carga (kN)	Lectura de carga (N)	Altura(mm)	Diametro(mm)	RTH(kPa)
6	12.47	12470	65.80	101.80	1185.15
8	11.81	11810	66.60	101.80	1108.94
12	11.69	11690	65.70	102.00	1110.53
PROMEDIO	11.99				1134.87

GRUPO SECO

Briqueta N.	Lectura de carga (kN)	Lectura de carga (N)	Altura(mm)	Diametro(mm)	RTS(kPa)
5	13.42	13420	64.90	101.90	1291.85
9	15.48	15480	65.20	101.80	1484.76
11	14.48	14480	65.20	102.10	1384.76
PROMEDIO	14.46				1387.13

RRT(%)	
91.74	
74.69	
80.20	
PROMEDIO	82.21

- **MEZCLA MODIFICADA CON GCR**

TOMA DE DATOS RESISTENCIA DE UNA MEZCLA BITUMINOSA COMPACTADA AL DAÑO CAUSADO POR HUMEDAD

Fecha de ensayo	22/05/2021
Tipo de mezcla:	MOD. GCR

1. Resistencia a la tensión indirecta

GRUPO HUMEDO

Briqueta N.	Lectura de carga (kN)	Lectura de carga (N)	Altura(mm)	Diametro(mm)	RTH(kPa)
6	12.25	12250	64.40	102.50	1181.43
7	13.06	13060	63.70	101.70	1283.40
12	12.97	12970	63.80	102.00	1268.82
PROMEDIO	12.76				1244.55

GRUPO SECO

Briqueta N.	Lectura de carga (kN)	Lectura de carga (N)	Altura(mm)	Diametro(mm)	RTS(kPa)
4	13.76	13760	64.90	101.70	1327.19
8	14.53	14530	65.10	101.90	1394.41
9	13.57	13570	64.90	101.70	1308.86
PROMEDIO	13.953				1343.49

RRT(%)	
89.02	
92.04	
96.94	
PROMEDIO	92.67

5. ENSAYO CANTABRO

- **MEZCLA CONTROL**

CARACTERIZACION DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS ABIERTAS POR MEDIO DEL ENSAYO CANTABRO DE PERDIDA POR DESGASTE INV E 760-13												
TIPO DE MEZCLA	MDC -19		% ASFALTO		5.3		MUESTRA	CONTROL		FECHA DE ENSAYO		21/05/2021
Briqueta N.	1				2				3			
RPM	50	100	200	300	50	100	200	300	50	100	200	300
Masa muestra inicial (g)	1181.4				1186.4				1198.9			
Masa muestra final (g)	1172.4	1158.9	1141.3	1108.1	1176.1	1160.3	1133.6	1092.5	1188.7	1159.8	1134.1	1112.1
Perdida (g)	9	22.5	40.1	73.3	10.3	26.1	52.8	93.9	10.2	39.1	64.8	86.8
Porcentaje de pérdida	0.76	1.90	3.39	6.20	0.87	2.20	4.45	7.91	0.85	3.26	5.40	7.24

- **MEZCLA MODIFICADA CON CH**

CARACTERIZACION DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS ABIERTAS POR MEDIO DEL ENSAYO CANTABRO DE PERDIDA POR DESGASTE INV E 760-13													
TIPO DE MEZCLA	MDC -19		% ASFALTO		5.3		MUESTRA	MODIFICADA CAL HIDRATADA		FECHA DE ENSAYO		20/05/2021	
Briqueta N.	1				2				3				
RPM	50	100	200	300	50	100	200	300	50	100	200	300	
Masa muestra inicial (g)	1184.2				1183.4				1184.3				
Masa muestra final (g)	1164.5	1137.2	1097.6	1066.2	1159.6	1138.3	1088.3	1052	1161	1127.5	1091.4	1064	
Perdida (g)	19.7	47	86.6	118	23.8	45.1	95.1	131.4	23.3	56.8	92.9	120.3	
Porcentaje de pérdida	1.66	3.97	7.31	9.96	2.01	3.81	8.04	11.10	1.97	4.80	7.84	10.16	

- **MEZCLA MODIFICADA CON FC**

CARACTERIZACION DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS ABIERTAS POR MEDIO DEL ENSAYO CANTABRO DE PERDIDA POR DESGASTE INV E 760-13												
TIPO DE MEZCLA	MDC -19		% ASFALTO		5.3		MUESTRA	MODIFICADA FIBRA DE COCO		FECHA DE ENSAYO		20/05/2021
Briqueta N.	1				2				3			
RPM	50	100	200	300	50	100	200	300	50	100	200	300
Masa muestra inicial (g)	1181.8				1187.2				1183.3			
Masa muestra final (g)	1149.1	1108.2	1038.1	1004.3	1170.3	1145.8	1097.7	1068.2	1068.2	1127	1090.3	1058.9
Perdida (g)	32.7	73.6	143.7	177.5	16.9	41.4	89.5	119	115.1	56.3	93	124.4
Porcentaje de pérdida	2.77	6.23	12.16	15.02	1.42	3.49	7.54	10.02	9.73	4.76	7.86	10.51

- **MEZCLA MODIFICADA CON PP**



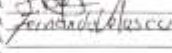
CARACTERIZACION DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS ABIERTAS POR MEDIO DEL ENSAYO CANTABRO DE PERDIDA POR DESGASTE INV E 760-13												
TIPO DE MEZCLA	MDC -19		% ASFALTO		5.3		MUESTRA	MODIFICADA POLIPROPILENO		FECHA DE ENSAYO		08/04/2021
Briqueta N.	1				2				3			
RPM	50	100	200	300	50	100	200	300	50	100	200	300
Condición de la muestra												
Masa muestra inicial (g)	1185.1				1187.2				1186.6			
Masa muestra final (g)	1170.9	1149.6	1092.1	1054.1	1169.8	1123.9	1083.7	1045.5	1167.1	1138.7	1140.5	1069.2
Perdida (g)	14.2	35.5	93	131	17.4	63.3	103.5	141.7	19.5	47.9	46.1	117.4
Porcentaje de pérdida	1.20	3.00	7.85	11.05	1.47	5.33	8.72	11.94	1.64	4.04	3.89	9.89

- **MEZCLA MODIFICADA CON GCR**

CARACTERIZACION DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS ABIERTAS POR MEDIO DEL ENSAYO CANTABRO DE PERDIDA POR DESGASTE INV E 760-13													
TIPO DE MEZCLA	MDC -19		% ASFALTO		5.3		MUESTRA		MODIFICADA GCR		FECHA DE ENSAYO		20/05/2021
Briqueta N.	1				2				3				
RPM	50	100	200	300	50	100	200	300	50	100	200	300	
Masa muestra inicial (g)	1190.2				1184.2				1182.8				
Masa muestra final (g)	1170.5	1157	1125.5	1085.5	1163.9	1125.1	1080.7	1040	1168.1	1143.5	1099.8	1074.1	
Perdida (g)	19.7	33.2	64.7	104.7	20.3	59.1	103.5	144.2	14.7	39.3	83	108.7	
Porcentaje de pérdida	1.66	2.79	5.44	8.80	1.71	4.99	8.74	12.18	1.24	3.32	7.02	9.19	



ANEXO C- FORMATO DE ESTIMACIÓN DE TIEMPOS.

		Código: F 053 U 111	
Formato Estimación de Consumo de Laboratorio para Proyectos		Fecha de emisión: 03/05/2020	
FACULTAD DE INGENIERÍA LABORATORIOS		Versión: 02	
PROGRAMA:	Ingeniería Civil		LABORATORIO SOLICITADO: Pavimentos
TÍTULO DEL PROYECTO:	Evaluación experimental aditivos aplicados en una mezcla MDC-14		
NOMBRE ESTUDIANTE:	Stepany Aniba fana	CÓDIGO: 505844	FIRMA: 
NOMBRE ESTUDIANTE:	Elisa Fernanda Velasco Diaz	CÓDIGO: 506932	FIRMA: 
NOMBRE DOCENTE A CARGO:			FIRMA:
CONSECUTIVO	ACTIVIDAD (O SUJETO) A REALIZAR	DURACIÓN (HORAS)	
1	Estimación de tiempos	2	
2	Densidad y Marshall de 12 banquetas (óptimo)	2	
3	Densidad 60 banquetas	4	
4	Ensayo Marshall	2	
5	Ensayo Cantabro	4	
6	Ensayo tracción indirecta (vía seca)	4	
7	Ensayo tracción indirecta (vía húmeda)	8	
8	Imprevistos	2	
		TOTAL 28	




Nombre y firma del tutor Nombre y firma del estudiante Nombre y firma del coordinador de laboratorio

NOTA 1: Recuerde que copia de este formato, totalmente diligenciado y firmado, debe ser anexado a la Propuesta de Proyecto de grado.
 NOTA 2: Otros aspectos a considerar: Valores anómalos, interrupción de laboratorio, cantidad de maestros, cantidad de estudiantes, espacio de almacenamiento, disponibilidad de equipos, OPI, etc.