

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA DENSA EN
CALIENTE CON ADICIÓN DE POLIPROPILENO



EDWIN CAMILO MODERA TOVAR
COD: 504191

ALTERNATIVA:
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
TRABAJO DE GRADO
BOGOTÁ
2018

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA DENSA EN
CALIENTE CON ADICIÓN DE POLIPROPILENO



EDWIN CAMILO MODERA TOVAR
COD: 504191

Director:
Ing. Juan Gabriel Bastidas Martínez, PhD

Trabajo presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
TRABAJO DE GRADO
BOGOTÁ
2018



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Ing. Juan Gabriel Bastidas Martínez, PhD
DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN

JURADO

JURADO

REVISOR METODOLÓGICO

Bogotá, 22 de mayo 2018

En primera instancia a Dios, quien con sus bendiciones me ayudo a no desfallecer, en segunda instancia a mis padres que, aunque uno no está conmigo fue el cómplice y motor de este logro, por ultimo a mi esposa e hija quien con sus sonrisas y palabras de apoyo pusieron el saldo para cumplir esta meta tan importante en nuestras vidas.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	14
1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	15
2. OBJETIVOS.....	18
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	18
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICO.....	18
3. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	19
3.1. ANTECEDENTES	19
4. METODOLOGÍA.....	21
5. MARCO CONCEPTUAL.....	22
5.1. PAVIMENTO FLEXIBLE	22
5.1.1. Carpeta Asfáltica	22
5.1.2. Base granular:.....	22
5.1.3. Sub base granular:	23
5.2. Caracterización de los agregados.....	24
5.2.1. Agregado Grueso.....	25
5.2.2. Agregado Fino.	25
5.3. ENSAYOS DE AGREGADOS PÉTREOS SEGÚN LAS NORMAS INVIAS 2013. 26	
5.4. MEZCLAS ASFÁLTICAS	28
5.5. AGREGADO PÉTREOS.....	29
5.5.1. Ensayos de Laboratorio Agregados Pétreos.....	29
5.6. CEMENTO ASFALTICO.....	32
5.6.1. ENSAYOS	34
5.6.2. ESTRUCTURA FÍSICO-QUÍMICA	35
5.7. MEZCLA ASFÁLTICA.....	36
5.8. ESTABILIDAD Y FLUJO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL EQUIPO MARSHALL INV E 748-13.....	39
5.8.1. EQUIPO	39
5.8.2. ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS	40
5.8.3. ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO	41
5.9. EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA INV E-725-13.....	42
5.9.1. EQUIPO	42
5.9.2. ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES PARA ENSAYO EN EL LABORATORIO.....	43

5.9.3. PROCEDIMIENTO.....	43
5.10. CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS ABIERTAS POR MEDIO DEL ENSAYO CANTABRO DE PÉRDIDA POR DESGASTE	45
5.10.1. EQUIPO.....	45
5.10.2. PROCEDIMIENTO.....	45
5.11. ASFALTOS MODIFICADOS.....	46
5.11.1. POLISOMBRA	47
5.11.2. POLIMERO TERMOPLASTICO.....	49
6. FASE EXPERIMENTAL.....	54
6.1. PROCEDIMIENTO	54
6.1.1. Ensayo de Marshall Mezcla densa en caliente convencional y mezcla con modificación de polisombra.....	54
6.1.2. Ensayo de susceptibilidad al agua, prueba tracción indirecta a la mezcla densa en caliente convencional y con modificación de polisombra.	61
6.1.3. Caracterización de las mezclas asfálticas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste.....	62
7. ANALISIS DE RESULTADO.....	65
7.1. Ensayo Marshall	65
7.1.1. Resultados contenido óptimo de asfalto MDC 19 control.....	65
7.1.2. Resultados mezcla asfáltica MDC 19, 5% CA, con modificación de polisombra.	67
7.2. Ensayo Tracción Indirecta.	70
7.3. Resultados ensayo perdida por desgaste.	72
8. CONCLUSIONES.....	75
9. RECOMENDACIONES.....	76
BIBLIOGRAFÍA.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Máquina de abrasión de los Ángeles	30
Figura 2 Estructura físico-química del asfalto, esquema coloidal de Pfeiffer.	36
Figura 3 Corte tiras de Polisombra.....	54
Figura 4 Lavado de material y secado de material granular	56
Figura 5 Tamizado de material granular.....	56
Figura 6 Dosificación de material granular cuerpos de prueba	56
Figura 7 Dosifiación material granular Probetas.	57
Figura 8 Mezcla agregado pétreo y Cemento Asfaltico	57
Figura 9 Adición de Polisombra a la mezcla asfaltica y mezclado de materiales.....	58
Figura 10 Proceso de compactación de probetas	58
Figura 11 Clasificación probetas asfalto modificado	59
Figura 12 Toma de masa seca, sss, sumergida y altura de cuerpos de prueba	59
Figura 13 Baño de agua probetas previo al ensayo	60
Figura 14 Falla de probetas y toma de lecturas	60
Figura 15 Acondición de probetas saturadas y secas para carga.	61
Figura 16 Prensa Lottman para carga TSR.	62
Figura 17 Falla de probetas TSR.....	62
Figura 18 Preparación cuerpos de prueba.....	63
Figura 19 Maquina de los angeles y cuerpo de prueba convencional.....	63
Figura 20 Cuerpo de prueba 0.5% y 1.0% posterior a ensayo de desgaste.	63
Figura 21 Cuerpo de prueba 1.5% y 2.0% posterior a ensayo de desgaste.	64
Figura 22 Estabilidad Vs % Asfalto Convencional	66
Figura 23 Flujo Vs % Asfalto Convencional.....	66
Figura 24 Relación E/F Vs % Asfalto Convencional.....	66
Figura 25 Vacíos Vs % Asfalto Convencional	66
Figura 26 Estabilidad Vs Contenido de Polisombra	68
Figura 27 Flujo Vs Contenido de Polisombra	68
Figura 28 Relación E/F Vs Contenido de Polisombra.....	68
Figura 29 Vacíos Vs % Contenido de Polisombra	68
Figura 30 Estabilidad Vs VacíosFuente. El Autor.	69
Figura 31 Resistencia a la tracción Vs Contenido de polisombra Fuente. El Autor.	71
Figura 32 Relación resistencia a la tensión Vs Contenido de polisombra Fuente. El Autor.	71
Figura 33 Relación resistencia a la tensión Vs VacíosFuente. El Autor.	71
Figura 34 # Golpes Vs Contenido de Polisombra Fuente. El Autor.	71
Figura 35 # Golpes Vs Vacíos Fuente. El Autor.	72
Figura 36 Porcentaje de perdida a 300 vueltas Vs Contenido de polisombra	73
Figura 37 Porcentaje de perdida Vs Contenido de polisombra	74

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Franjas granulométricas del material de base granular.	23
Tabla 2 Franjas granulométricas del material de sub-base granular.	24
Tabla 3 Especificaciones del Cemento Asfáltico	33
Tabla 4 Granulometrías Típicas para Mezclas Densas en Caliente	37
Tabla 5 Criterios de Selección del Cemento Asfáltico	37
Tabla 6 Diseño de Mezcla y Obtención de la Fórmula de Trabajo.....	38
Tabla 7 Comparación especificaciones caracterización del material granular.	55
Tabla 8 Tabla resumen ensayo de contenido óptimo de asfalto.....	65
Tabla 9 Verificación de criterios por el método Marshall, asfalto convencional óptimo 5%.....	65
Tabla 10 Tabla resumen resultados modificación con polisombra.....	67
Tabla 11 Verificación de criterios por el método Marshall, asfalto modificado 0.5% de polisombra.	67
Tabla 12 Resultados TSR Asfalto convencional y modificado.	70
Tabla 13 Verificación del diseño Marshall, Contenido de polipropileno.	70
Tabla 14 Resumen ensayo de cántabro perdida por desgaste.....	73

GLOSARIO

PAVIMENTO: “Es una estructura formada por una o más capas de materiales técnicamente seleccionados, sobre la que actúan cargas repetidas provenientes de los vehículos en su superficie y que debe ser capaz de transmitir durante su vida útil las tensiones provocadas por el tráfico hacia la sub-rasante y hacia los materiales constitutivos de sus capas, de tal forma que no superen las tensiones y deformaciones específicas admisibles del suelo de cimentación”¹.

PAVIMENTOS FLEXIBLES: “Consisten de una superficie de desgaste o carpeta relativamente delgada construida sobre unas capas (base y sub-base), apoyándose este conjunto sobre la sub-rasante compactada, de manera que la sub-base, base y superficie de desgaste o carpeta son los componentes estructurales de este tipo de pavimento”².

MATERIAL GRANULAR: “Es aquella que está formada por un conjunto de partículas macroscópicas sólidas lo suficientemente grandes para que la fuerza de interacción entre ellas sea la de fricción, la materia granular tiende a disipar rápidamente la energía de sus partículas debido a la fuerza de fricción. Esto da lugar a fenómenos de gran importancia como las naturales, entre otras”³.

POLÍMERO: “Es una sustancia que consiste en grandes moléculas formadas por muchas unidades pequeñas que se repiten, llamadas monómeros”⁴.

CEMENTO ASFALTICO: “Son asfaltos obtenidos del proceso de destilación del petróleo para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites. Su viscosidad varía con la temperatura y entre sus componentes, las resinas producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelente ligante, pues al ser calentados se licúan, lo que les permite cubrir totalmente las partículas del material pétreo”⁵.

¹ ESPE. Definición moderna de los parámetros para el diseño de pavimentos [en línea]. Sangolquí. [citado 12 Octubre, 2017] Disponible en internet: < URL: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/1578/1/T-ESPE-014822.pdf>>

² ISUU. Fallas presentes en los pavimentos flexibles que afectan la vialidad del estado Mérida. [en línea]. Mérida. [citado 12 Octubre, 2017] Disponible en internet: < URL: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/1578/1/T-ESPE-014822.pdf>>

³ ACADEMIC. Materia granular. [en línea] Bogotá. [citado 12 de Octubre de 2017] Disponible en internet: < URL: <http://www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/1372172>>

⁴ ESPE. Análisis comparativo de mezclas asfálticas modificadas con polímeros sbr y sbs, con agregados provenientes de la cantera guayllabamba. [en línea]. Sangolquí. [citado 12 Octubre, 2017] Disponible en internet: < URL: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/6471/1/AC-CIVIL-047105.pdf>>

⁵ UPCOMMONS. Características de los materiales. [en línea] Barcelona. [citado 12 de Octubre de 2017] Disponible en internet: < <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-25.pdf>>

POLIPROPILENO: “Es un termoplástico que es obtenido por la polimerización del propileno, subproducto gaseoso de la refinación del petróleo. Todo esto desarrollado en presencia de un catalizador, bajo un cuidadoso control de temperatura y presión. El Polipropileno se puede clasificar en tres tipos (homopolímero, copolímero rándom y copolímero de alto impacto), los cuales pueden ser modificados y adaptados para determinados usos”⁶.

RIGIDEZ: “Es la capacidad de un objeto sólido o elemento estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones o desplazamientos. Normalmente la rigidez se calcula como la razón entre una fuerza aplicada y el desplazamiento obtenido por la aplicación de esa fuerza”⁷.

MEZCLA DENSA EN CALIENTE: “Se define como mezcla asfáltica (o bituminosa) en caliente a la combinación de áridos (incluido el polvo mineral) con un ligante. Las cantidades relativas de ligante y áridos determinan las propiedades físicas de la mezcla. El proceso de fabricación implica calentar el agregado pétreo y el ligante a alta temperatura, muy superior a la ambiental. Enseguida esta mezcla es colocada en la obra”⁸.

⁶ Coursehero. Ciencias metodológicas. [en línea]. [citado 12 de Octubre de 2017] Disponible en internet: URL < <https://www.coursehero.com/file/p2s7ibp/Su-gran-resistencia-al-impacto-y-sus-propiedades-%C3%B3pticas-extraordinarias-han/> >

⁷ Academic. Rigidez. . [en línea]. [citado 12 de Octubre de 2017] Disponible en internet: URL < <http://www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/1011837> >

⁸ Vialidad. Mezcla asfáltica en caliente. [en línea]. [citado 12 de Octubre de 2017] Disponible en internet: URL< <http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/Mezclas%20Asf%C3%A1lticas.pdf>>

RESUMEN

Este trabajo muestra una caracterización mecánica en laboratorio de la mezcla asfáltica densa en caliente MDC-19 con adición de polipropileno, comúnmente conocido como polisombra en tiras de longitud de 10 cm. La estructura del documento se encuentra dividida en 8 capítulos, en los primeros 3 se encuentran las bases y elementos que se deben conocer sobre el pavimento flexible, su estructura y específicamente la constitución de la capa de rodadura en relación a los tipos de mezclas; de manera particular las mezclas asfálticas densas revisando sus usos clasificación y de manera individual la Mezcla Densa Caliente MDC-19, para conocer su constitución y los requisitos mínimos que deben cumplir los materiales que la conforman y bajo el método de diseño Marshall, los criterios mínimos que debe cumplir.

La fase experimental capítulo 3, se divide en tres partes principales. (i) La primera fase consiste en el diseño de la mezcla asfáltica por medio del ensayo Marshall para identificar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico en la mezcla implementando los valores de 4.5, 5.0, 5.5, y 6.0 % de cemento asfáltico con respecto al peso. (ii) La segunda etapa, después de conocido el valor óptimo del ligante, se procede a modificar la mezcla con el polipropileno, comúnmente conocido como polisombra, en tiras de 10 cm, con adiciones en porcentaje del peso total del 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0%. (iii) La tercera etapa, consiste en evaluar las características mecánicas y de adherencia, por medio del ensayo de la resistencia a la tracción y el ensayo cántabro.

Los resultados presentados indican que la técnica de la adición de polipropileno de la forma propuesta es viable desde el punto de vista técnico, a pesar que los parámetros mecánicos ante la acción de la carga monotónica desde el punto de estabilidad Marshall disminuyen, la relación resistencia a la tensión aumenta y el desgaste a la abrasión disminuye, se observa un aumento de la tenacidad en la mezcla asfáltica, pudiendo probablemente aumentar la vida útil del pavimento en la condición de fisuración.

Palabras Claves: Agregado pétreo, Cemento Asfáltico, Concreto Asfáltico, polisombra, Tela Verde, Polímero, Ligante Asfáltico, Grado de desempeño.

ABSTRACT

This work shows a mechanical characterization in the laboratory of the hot dense asphalt mixture MDC-19 with the addition of polypropylene, commonly known as polisombra strips of length of 10 cm. The structure of the document is divided into 8 chapters, in the first 3 are the bases and elements that should be known about the flexible pavement, its structure and specifically the constitution of the rolling layer in relation to the types of mixtures; in particular dense asphalt mixtures reviewing their classification uses and individually MDC-19 Hot Dense Mixture, to know its constitution and the minimum requirements that must be met by the materials that comprise it and under the Marshall design method, the minimum criteria what you must accomplish

The experimental phase chapter 3, is divided into three main parts. (i) The first phase consists in the design of the asphalt mixture by means of the Marshall test to identify the optimum percentage of asphalt cement in the mixture, implementing the values of 4.5, 5.0, 5.5, and 6.0% of asphalt cement with respect to the weight. (ii) The second stage, after knowing the optimal value of the binder, we proceed to modify the mixture with the polypropylene, commonly known as polisombra, in strips of 10 cm, with additions in percentage of the total weight of 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0%. (iii) The third stage consists in evaluating the mechanical and adhesion characteristics, by means of the tensile strength test and the Cantabrian test.

The presented results indicate that the technique of the addition of polypropylene of the proposed form is viable from the technical point of view, although the mechanical parameters before the action of the monotonic load from the point of Marshall stability decreased, the resistance ratio to the tension increase and abrasion wear decreased, an increase in the tenacity in the asphalt mix is observed, probably increasing the useful life of the pavement in the cracking condition.

Key words: Stone Aggregate, Asphaltic Cement, Asphalt Concrete, Polysameth, Green Fabric, Polymer, Asphalt Binder, Degree of performance.

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto se basa en el ensayo de mezcla asfáltica en caliente con Polisombra, con el fin de evaluar su comportamiento mecánico, el objetivo de valorar si es posible que la implementación de este tipo de mezcla asfáltica modificada, puede llegar a mejorar el estado de las vías en Colombia partiendo de los requisitos mínimo especificados por las entidades nacionales.

Es necesario resaltar que el país cuenta con rezago importante en tema de infraestructura vial, lo cual se ve reflejado en la poca competitividad que ofrecemos ante los mercados extranjeros, que cuentan con estructuras internas organizadas y con herramientas para competir en mercados internacionales y poder ofrecer sus productos a un portafolio de diversos clientes.

Es de observar que una de las ventajas que se tienen en cuanto a variedad de productos que se procesan y son cosechados en el territorio, se vuelven una desventaja, ya que no se cuenta con las herramientas para poder ofrecer la calidad de los productos de una manera competitiva, debido a que los costos de transporte con elevados y aumentan los valores unitarios de cada insumo y genera que no se pueda llegar a competir a mercados extranjeros, sino que por el contrario nos invadan con todas sus ofertas.

El ejercicio de verificar la modificación del concreto asfáltico MDC-19, busca una mejora en cuanto a la duración de las mallas viales, obteniendo vías con una mayor vida de operación y reducción en los costos de mantenimiento, ya que el volumen de vehículos de tráfico pesado que transitan por el territorio generan un desgaste considerable sobre cada una de ellas; esto en aras de que el transporte de mercancías pueda realizarse de una manera más ágil y se puedan reducir los tiempos de transporte, los costos de operación de los vehículos y por consiguiente el importe final del valor de peajes al reducir los montos de mantenimiento en las concesiones viales.

Los ensayos a realizar se ejecutaran de acuerdo a la normatividad vigente, usando el método de diseño Marshall para mezcla asfáltica en caliente, tracción indirecta y desgaste a la abrasión cántabro; en primera instancia para hallar el valor de asfalto óptimo para los agregados y ligante asfáltico que se tienen para los ensayos, para una vez obtenido el valor de su óptimo se proceda a realizar la modificación de la muestra con adición de polipropileno y observar y comparar los datos obtenidos con los criterios mínimos estipulados por las entidades para estas mezclas, y concluir si proporcionan o no un resultado positivo que sume a las propiedades de las muestras convencionales.

1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Las vías en Colombia actualmente se dividen en primarias, secundarias y terciarias, con una red total para el año 2016 de 206.500 km, contando con 19.079 km primarias, 45.137 km secundarios y 142.284 km terciarias. Las redes primarias se encuentran a cargo de la nación, concesionadas a la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) en 10.155 km y en manejo del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) 8924 km (MINTRANSPORTE, 2016).

Para el segundo semestre del año 2017, según reportes del INVIAS, se observa el decremento de 458.36 km de las vías que se encontraban en un estado muy bueno a bueno, al igual que el aumento del 4.68% entre los estados de regular, malo y muy malo, solo en las vías manejada por esta entidad (Invias, 2017), tal como se presenta en las Tablas 1 a 3.

Lo anterior arroja con preocupación el deterioro exponencial de la malla vial del país, generado por las inclemencias del clima, aumento de las cargas del parque automotor, la falta de mantenimiento y otros factores que ayudan al daño y disminución de calidad de servicio de las vías.

Estos factores generan la necesidad de la evaluación de nuevas tecnologías en los pavimentos, siendo los flexibles el tipo de pavimento con mayor uso en las carreteras actualmente y en los que se incursiona con más fuerza en el uso de modificadores que ayuden a mejorar las propiedades del ligante asfáltico y los materiales granulares que lo componen.

Los polímeros según estudios previos arrojan resultados positivos, inicialmente para la mejora de las propiedades físicas y químicas del pavimento, actualmente buscando a su vez que, con la adición de desechos a base de este material, se pueda minimizar el impacto ambiental con la utilización de recursos no reciclables.

Tabla 1. Estado red primaria, vías pavimentadas

PAVIMENTADO (KMS)				
MUY BUENO	BUENO	REGULAR	MALO	MUY MALO
2016				
1466.35	2161.15	1805.66	923.81	30.27
22.96%	33.84%	28.27%	14.46%	0.47%
2017				
1007.99	2622.74	2223.37	1047.01	65.79
14.47%	37.65%	31.91%	15.03%	0.94%

Fuente. Instituto nacional de vías - Invías.

Tabla 2. Estado red primaria, vías sin pavimentar

SIN PAVIMENTAR (KMS)				
MUY BUENO	BUENO	REGULAR	MALO	MUY MALO
2016				
15.39	203.93	925.49	1101.27	156.96
0.64%	8.49%	38.51%	45.83%	6.53%
2017				
94.87	155.47	812.07	1126.03	123.41
4.1%	6.72%	35.13%	48.71%	5.34%

Fuente. Instituto nacional de vías - Invías.

Tabla 3. Estado red primaria, red calificada

RED TOTAL CALIFICADA			
PAVIMENTADA	SIN PAVIMENTAR	INTERVENIDA	TOTAL
2016			
6387.24	2403.04	50.21	8840.49
72.25%	27.18%	57.00%	
2017			
6966.89	2311.86	18.85	9297.60
74.93%	24.87%	0.20%	

Fuente. Instituto nacional de vías - Invías.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el comportamiento mecánico de la mezcla densa en caliente (MDC-19) para tráfico pesado, con adición en polipropileno en forma de polisombra en tiras de 10cm.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICO

- Caracterizar los agregados pétreos y del cemento asfáltico CA 60-70 provenientes de la cantera Concescol para uso de mezclas asfálticas para pavimentos de carreteras.
- Determinar el contenido de cemento asfáltico óptimo para una mezcla asfáltica densa en caliente (MDC-19) según la metodología Marshall y los lineamientos del INVIAS.
- Evaluar el comportamiento mecánico ante la acción de cargas monotónica (estabilidad Marshall y resistencia a la tracción) y de adherencia (ensayo de desgaste cántabro) de una mezcla MDC-19 convencional y con adiciones de polipropileno en forma de polisombra.

3. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

3.1. ANTECEDENTES

(Arenas, 2005) a través del tiempo se ha podido evidenciar que existen casos en que las características de las mezclas asfálticas, con cementos convencionales no logran resistir en conjunto las cargas ejercidas por los vehículos y la acción simultánea del clima, por lo cual se ha investigado continuamente con modificadores para ligante asfálticos, con el fin de mejorar la vida de operación de los pavimentos

(Kortschot & Woodhams, 1984) en 1984 se investiga el comportamiento de los cauchos líquidos como plastificantes, encontrando la mejora del rendimiento de los bitúmenes del cemento asfáltico, debido a que contribuye a la ductilidad y reducción de la fragilidad del betún a -30°C , valores evaluados con concentraciones de 10% y 20%, relacionando la reducción de la fragilidad del betún con la transición vítrea del caucho agregado. El resultado, la tendencia a reducir las grietas del pavimento asfáltico en climas fríos

(Jew, Shimizu, Svazic, & Woodhams, 1986) las fisuras transversales de los pavimentos asfálticos se presenta en regiones frías, en 1986 se evalúa la modificación con polietilenos, realizando mediciones entre -40 y 0°C , con óptimos resultados al adicionar el 8% en peso de polietileno; luego de pruebas de flexión practicadas en vigas rectangulares, se obtiene aumento en el módulo de flexión, alargamiento y mayor energía de fractura a temperaturas cercanas a -30°C , aumento en el flujo y estabilidad de Marshall al igual que en el módulo elástico.

(Leonenko & Safonov, 2001) posterior se modifican los bitúmenes con polímeros, mejorando las características reológicas de las mezclas, hallando que el envejecimiento de los aglomerantes es fuertemente dependiente del tipo de polímero implementado. Los polímeros de estudio se centraron en termoplásticos divididos en elastómeros y plastómeros (Lu & Isacson, 2000). La modificación de asfaltos de petróleo con materiales poliméricos demostró, que el contenido máximo total de asfalto en el polímero y la fase dispersa no debería exceder el 25%.

(Airey, 2002) con el aumento de los niveles de tráfico, camiones más grandes, nuevos diseños de ejes, aumento en la presión de los neumáticos y las demandas de carga y ambiente en el sistema de carreteras, llevo a la validación de los polímeros para la mejora encaminada a estas necesidades, obteniendo incremento en la deformación permanente, térmica y fatiga. Los plastómeros modifican el betún formando una red tridimensional rígida y los elastómeros tienen alta respuesta elástica, logrando resistencia y buen comportamiento al estirar y recuperar.

(Fang, Li, Zhang, & Jing, 2008) en los últimos años surgió el enfoque de buscar las mejoras del rendimiento del asfalto y a su vez aportar con la reducción de la contaminación con subproductos del polietileno, se realizan investigaciones con residuos de elementos construidos de polímeros, con buenos resultados como los obtenidos con bolsa de leche recuperada. El asfalto se modificó con 1, 3, 6 y 9% en peso de residuos de polietileno, resultando una forma ideal para resolver el problema de contaminación y mejorar el rendimiento del asfalto.

(Fang, Zhou, Zhang, & Zhao, 2009) en 2009 se estudió el reciclaje de envases de poli (cloruro de vinilo), en lugar de un polímero ordinario, para la modificación de una membrana impermeabilizante de asfalto. Los resultados mostraron que el punto de ablandamiento del asfalto modificado se incrementó, mientras que el grado de penetración se redujo. Las propiedades a bajas temperaturas mejoraron significativamente

(Wang, You, Mills-Beale, & Hao, 2012) sumado al aporte para minimizar el impacto ambiental se observa el desecho de neumáticos a grandes escalas por el aumento del parque automotor, llevando la necesidad de estudios que busquen mejoras que pueden aportar estos residuos siendo modificante de las mezclas asfálticas, encontrando evidencia que la adición de miga de caucho al ligante del asfalto mejora la viscosidad del aglutinante a alta temperatura y disminuye la rigidez a fluencia en baja temperatura, lo cual es beneficioso para mejorar la estabilidad y el agrietamiento.

A través de los años se observa el buen comportamiento de los polímeros como modificador del asfalto, en mezclas calientes se ha encontrado incremento en la estabilidad de Marshall, resistencia a la tracción indirecta, módulo de rigidez y fatiga, dando mejoras en las propiedades reológicas de los asfaltos (Alataş & Yilmaz, 2013), lo cual se ve convertido en mayores tiempos de servicio y disminución en daños por envejecimiento e impacto de factores climáticos, lo cual genera la expectativa de encontrar buenos resultados en el proyecto.

El presente trabajo forma parte de una macro investigación iniciada en el año 2016, desde el que se ha variado el tamaño y porcentajes del contenido de modificante, los ensayos realizados y la profundidad en el análisis, buscando obtener el valor óptimo que mejore la resistencia mecánica de las mezclas asfáltica MDC-19, midiendo su adherencia y resistencia ante la acción de la carga monotónica.

4. METODOLOGÍA

- **FASE I.** El punto de referencia para comenzar con el proyecto se basará en la revisión y construcción del estado del arte del mismo, con el fin de validar la evolución de los pavimentos modificados, el estado actual de investigación y el avance que se ha tenido en el tema de modificadores; apoyados en la bibliografía que se encuentra en la biblioteca de la universidad, revisando artículos científicos en fuentes confiables, partiendo de lo antiguo a lo actual.
- **FASE II.** Selección material granular y cemento asfáltico, validando que los materiales a usar cumplan con la caracterización especificada por el INVIAS apoyados con los ensayos específicos que se solicita para que la mezcla cumpla con los requerimientos de la entidad.
- **FASE III.** Corte de material modificador, buscando que la longitud sea aproximada a los 10cm para cumplir con la condición del proyecto, recolectando la cantidad necesaria para poder hacer el reemplazo en la mezcla.
- **FASE IV.** Mezcla del asfalto convencional en 12 probetas de ensayo, con el fin de encontrar el asfalto óptimo y partiendo de esta dosificación, realizar la modificación de la mezcla.
- **FASE V.** Con el valor del asfalto óptimo, se procede a realizar la modificación del agregado pétreo de la mezcla óptima encontrada, con el fin construir 50 probetas con los porcentajes de polisombra del 0.5%, 1%, 1.5% y 2%; realizando el ensayo de Marshall con 10 cuerpos de prueba, 30 para tracción indirecta y 10 para desgaste en máquina de los ángeles.
- **FASE VI.** Revisión de los valores encontrados con el asfalto óptimo y el modificado, comparando con los rangos solicitados por el INVIAS, para hacer análisis de resultado y observar si los resultados obtenidos se encuentran en el rango solicitado por el INVIAS y si se obtienen valores de mejora o decremento de las propiedades físico mecánicas del asfalto.

5. MARCO CONCEPTUAL

5.1. PAVIMENTO FLEXIBLE

“Formados por una carpeta asfáltica, además presenta una o varias capas de gran flexibilidad (materiales granulares no ligados). Los esfuerzos se transmiten al terreno de fundación mediante un mecanismo de disipación de tensiones, las cuales van disminuyendo paulatinamente con la profundidad”.⁹

Está conformada normalmente por las siguientes capas y espesores promedios:

- Carpeta de rodadura (3-8 cm)
- Riego de liga
- Base asfáltica (10 – 15cm)
- Imprimación
- Capas granulares no tratadas (0-80 cm) Base y sub-base.
- Sub-rasante.

5.1.1. Carpeta Asfáltica

“La carpeta asfáltica está conformada por la carpeta de rodadura y la base asfáltica, es una serie de capas de materiales granulares seleccionados ligados con asfalto que conforman la superficie de rodadura del pavimento; su función principal es estructural y proporcionar una superficie de rodadura suave y segura, adicional impermeabilizar el pavimento”.¹⁰

5.1.2. Base granular:

La base granular es la capa de la estructura de pavimento que por lo general subyace a la carpeta asfáltica, esta capa está compuesta por materiales granulares no tratados, la función principal de esta capa en pavimentos flexibles es transmitir las cargas impuestas por el tránsito con intensidades adecuadas, adicional mente ayuda al drenaje y facilita los procesos constructivos.”¹¹

⁹ RONDON QUINTANA, Hugo Alexander. Pavimentos: Serie Guías: 1 Fundamentos. 1 ed. Bogotá: Stella Valbuena García, 2009. Pag.31.

¹⁰ *Ibíd.*; pág. 32.

¹¹ RONDON QUINTANA, Hugo Alexander. Pavimentos: Materiales, construcción y diseño. 1 ed. Bogotá: Ecoe Ediciones, 2015. Pag.340

Tabla 1 Franjas granulométricas del material de base granular.

Tamiz		Porcentaje que pasa			
		Gradación Fina		Gradación Gruesa	
		BG-38	BG-25	BG-40	BG-27
1 ½ “	37.5 mm	100	-	100	-
1”	25 mm	70-100	100	75-100	100
¾”	19 mm	60-90	70-100	65-90	75-100
3/8 “	9.5 mm	45-75	50-80	45-68	52-78
No. 4	4.75 mm	30-60	35-65	30-50	35-59
No.40	2.0mm	20-45	20-45	15-32	20-40
No.80	0.425mm	10-30	10-30	7-20	8-22
No.100	0.075mm	5-15	5-15	0-9	0-9

Fuente. Instituto nacional de vías - Invías. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículo 400. Bogotá: Invías, 2013. p. 3.

5.1.3. Sub base granular:

Se denomina sub base granular a la capa granular localizada entre la sub-rasante y la base granular en los pavimentos asfálticos o la que sirve de soporte a los pavimentos de concreto hidráulico, sin perjuicio de que los documentos del proyecto le señalen otra utilización. Se usa también como material de soporte de sardineles y bordillos y de otros elementos que no estarán sometidos a tráfico vehicular, tales como escaleras; también se utiliza como capa subyacente a la capa de base granular en pavimentos con adoquines. Los materiales que se utilicen como sub base granular deben cumplir con las siguientes granulometrías.¹²

¹² RONDON QUINTANA, op. Cit, pag.341

Tabla 2 Franjas granulométricas del material de sub-base granular.

Tamiz		Porcentaje que pasa	
		SBG -50	SBG -38
2"	50mm	100	-
1 2/1"	37.5mm	70-95	100
1"	25mm	60-90	75-95
1/2"	12.5mm	45-75	55-85
3/8"	9.5mm	40-70	45-75
No.4	4.75mm	25-55	30-60
No.10	2.0mm	15-40	20-45
No.40	0.425mm	6-25	8-30
No.200	0.075mm	2-15	2-15

Fuente. Instituto nacional de vías - Invías. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículo 400. Bogotá: Invías, 2013. p. 2.

5.2. Caracterización de los agregados

La caracterización de los agregados se hace con el fin de cumplir con los parámetros exigidos por la normatividad INVIAS, sin embargo, hay características que definen el tipo de mezcla asfáltica, como lo es el caso de la gradación, también se realiza para verificar que cumpla con la dureza, la reacción ante algunos elementos químicos, el análisis de las caras fracturadas y los contenidos de arena y materia orgánica.

Es de gran importancia realizar esta caracterización ya que nos permite controlar la relación de porosidad de la muestra, además prevenir la segregación en la mezcla y garantizar los niveles de compactación y buen comportamiento del concreto asfáltico ante condiciones de servicio y temperatura.

La mezcla asfáltica está compuesta por agregados pétreos de varios tamaños, esto se le conoce como granulometría la cual tiene una curva con umbral máximo y mínimo definido por el instituto nacional de vías en el artículo 450 en la tabla 450-6 y de acuerdo con el tamaño, se dividen en tres:

5.2.1. Agregado Grueso.

El agregado grueso es la fracción de material comprendido entre el material que pasa el tamiz 1 ½" pulgada siendo este el tamaño máximo para unos de los tipos de mezclas asfálticas y el retenido en el tamiz N° 4, es decir partículas comprendidas entre los 37.5 mm y los 4.7 mm. Teniendo en cuenta que es una piedra artificial, el agregado grueso es la materia prima para fábricas el concreto. En consecuencia, se debe usar la mayor cantidad posible del tamaño mayor, teniendo en cuenta los requisitos de colocación y resistencia.

Hasta para la resistencia de 250 kg/cm² se debe usar el mayor tamaño posible del agregado grueso; para resistencias mayores investigaciones recientes han demostrado que el menor consumo de concreto para mayor resistencia dada (eficiencia), se obtiene con agregados de menor tamaño; se llama eficiencia del concreto a la relación entre la resistencia del concreto y el contenido de cemento. En concreto de alta resistencia, mientras más alta sea esta, menor deberá ser el tamaño máximo para que la eficiencia sea máxima.

Para cada resistencia existe un margen estrecho del valor del tamaño máximo por debajo del cual es necesario aumentar el contenido del cemento. En concretos de mediana y baja resistencia mientras mayor sea el tamaño mayor es la eficiencia.¹³

5.2.2. Agregado Fino.

El agregado fino es la fracción de material comprendido entre el material que pasa el tamiz N° 4 y el retenido en el tamiz N° 200, es decir partículas menores de 4.75 mm y mayores o iguales a 0.075 mm, para mejorar las propiedades de la mezcla plástica, facilitar el acabado, promover la uniformidad e impedir la segregación. Estas mejoras se logran, en gran parte, por la composición granulométrica, el tamaño, la forma y la textura de la superficie de las partículas. Con excepción del agregado ligero, el agregado fino para concreto debe consistir en arena natural, arena manufacturada o una combinación de ambas"¹⁴.

¹³ Autor Agregados finos <https://es.scribd.com/doc/89657969/Agregado-Fino>

¹⁴ Autor Agregados finos <https://es.scribd.com/doc/89657969/Agregado-Fino>

5.3. ENSAYOS DE AGREGADOS PÉTREOS SEGÚN LAS NORMAS INVIAS 2013.

A continuación, enuncian los ensayos de laboratorios que se deben realizar al material granular.

- **Desgaste en la Máquina de los Ángeles.** Este ensayo se usa para analizar la composición mineralógica del agregado, mide la resistencia al desgaste que puede tener el agregado.
- **Desgaste Micro deval.** Este ensayo se usa para conocer el comportamiento a la abrasión del agregado grueso en presencia de agua, ya que en presencia de agua algunos materiales cambian sus propiedades.
- **Resistencia a los Sulfatos Sodio y Magnesio.** Se usa para determinar la solidez ya que los agregados usados en los pavimentos asfálticos no se deben disgregar bajo la acción de los agentes atmosféricos.
- **Partículas Fracturadas.** El objetivo principal de este ensayo es medir la fractura de las partículas y así maximizar la resistencia al corte, incrementando la fricción entre las partículas.
- **Angularidad Método A.** Lo que se quiere medir es la angularidad de las partículas a través de la medición del contenido de vacíos, cuando se tiene valores altos de vacíos esto indica que hay mayor angulosidad, menor esfericidad y por ende mayor superficie áspera que se traduce en mejor comportamiento al deslizamiento.
- **Coeficiente de Pulimiento Acelerado.** Este ensayo se hace con el fin de medir la resistencia del agregado a perder aspereza en su textura superficial, es lo que garantiza la seguridad de los usuarios.
- **Partículas Planas y Alargadas.** Este ensayo se realiza para medir la cantidad de partículas planas y alargadas ya que partículas con estas características pueden afectar la colocación, compactación y comportamiento de la mezcla.

Equivalente de Arena. Se hace con el fin de limitar la cantidad de finos que pueden ser nocivos en una mezcla.

- **Contenido de Impurezas.** Este ensayo consiste en lavado de la muestra y separar mediante un tamiz las partículas adheridas al agregado grueso con un tamaño menor a 0.5mm el cual es considerado como impureza”¹⁵

¹⁵ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículo 400. Bogotá: INVIAS, 2013. p.121.

5.4. MEZCLAS ASFÁLTICAS

“Las mezclas asfálticas son la combinación de agregados pétreos y un ligante asfáltico. Se elaboran normalmente en plantas mezcladoras”.¹⁶

“Los diferentes tipos de mezclas asfálticas están conformadas por agregados pétreos con granulometría y requisitos mínimos de calidad diferentes. Asimismo, presentan diferencias en cuanto a su función dentro de la estructura de pavimento y al tipo de material asfáltico o ligante que utilizan”.¹⁷

Debido a que el pavimento flexible ha sido considerado como una de las mejores opciones para la construcción de vías a nivel nacional, las mezclas asfálticas y su correcta especificación son determinantes en la duración y correcta construcción de la malla vial, algunas mezclas asfálticas usadas en nuestro territorio son:

- Mezclas abiertas en frío.
- Mezclas abiertas en Caliente.
- Mezclas densas en frío.
- Mezclas densas en caliente.

Al elegir una mezcla asfáltica, se busca cumplir con ciertas propiedades, según el lugar de construcción, las condiciones a las que va a estar expuesto el pavimento, el tipo de carga al que va a estar sometido, entre otros aspectos; algunos de esos son:

- Resistencia bajo carga monotónica a tracción (estabilidad)
- Resistencia a las deformaciones permanentes.
- Resistencia a fatiga.
- Resistencia al deslizamiento.
- Impermeabilidad.
- Resistencia al envejecimiento.
- Durabilidad.
- Resistencia a las condiciones ambientales.
- Trabajabilidad.
- Economía.

Para efectos del presente trabajo y con el fin de ampliar la información sobre el objetivo del propio, se realizara una descripción de algunos tipos de mezclas asfálticas usadas y algunas propiedades que conciernen al desarrollo del proyecto,

¹⁶ RONDON QUINTANA, Hugo Alexander. Pavimentos: Materiales, construcción y diseño. 1 ed. Bogotá: Ecoe Ediciones, 2015. Pag.37.

¹⁷ *Ibíd.*, pag.38

así mismo los ensayos practicados para verificar que los material usados y su mezcla cumple con los requisitos mínimos estipulados por la entidades encargadas de generar los parámetros que deben cumplir las carreteras y vías urbanas, en este caso el INVIAS (Instituto Nacional de Vías) y en el IDU (Instituto de desarrollo urbano).

5.5. AGREGADO PÉTREOS.

“La denominación técnica de “agregados pétreos” en pavimentos se refiere a un conglomerado de partículas inertes de gravas, arenas y finos. En términos generales, en un ensayo de granulometría por cribado o tamizado, las partículas con diámetro entre 2 mm y 6.4 cm son reconocidas como gravas. Aquellas con diámetro entre 0.075 mm y 2 mm son reconocidas como arenas (gruesas y finas) y las que son de diámetro inferior a 0.075 mm son reconocidas como tamaño de arcilla”.¹⁸

Los agregados pétreos en un pavimento flexible, se encuentran en diferentes granulometrías, desde la base, hasta la carpeta asfáltica, teniendo en cuenta que en la capa donde se exigen más es donde se ubica la mezcla asfáltica. “En estos últimos materiales los agregados conforman entre el 88% y el 96% de la masa y más del 75% del volumen”.¹⁹

Debido a la importancia que tienen los agregados pétreos en la estructura del pavimento, se somete al material a una serie de ensayos, con el fin de buscar que cumpla con los parámetros que exigen las entidades competentes, en granulometría, forma geométrica del material; buscando siempre el mejor resultado cuando se genere la mezcla con el ligante asfáltico.

5.5.1. Ensayos de Laboratorio Agregados Pétreos.

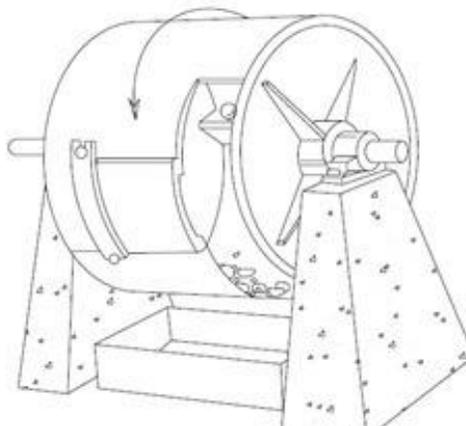
- Resistencia al desgaste de los agregados en la máquina de los Ángeles (INV. E218-13, 219-13). Para la medición de los agregados se realiza el ensayo con distintas condiciones para los agregados gruesos de tamaño menor a 37.5mm (1 ½”) Inv. 218-13, y agregados gruesos de tamaños mayores a 19mm (¾”) Inv. 219-13. El objeto del ensayo es determinar la resistencia a la degradación de un agregado grueso con una composición granulométrica definida, como resultado de una combinación de acciones que incluyen abrasión, impacto y molienda en un tambor de acero rotatorio con contiene 12 esferas metálicas para el caso de los agregados gruesos mayores a 19mm y un número determinado de esferas para los mayores de 37.5mm. A medida que gira el tambor, una pestaña de acero recoge las esferas de acero y las arrastra hasta que caen por gravedad en el

¹⁸ RONDON QUINTANA, op. Cit, pag.38

¹⁹ *Ibíd.*, pag.39

extremo apuesto del tambor, creando un efecto de impacto y trituración. Este ensayo es usado como un amplio indicador de la calidad relativa o la competencia de diferentes fuentes de agregados pétreos de similares composiciones mineralógicas.²⁰ (Véase figura 1).

Figura 1 Máquina de abrasión de los Ángeles



Fuente. CUEVA DEL INGENIERO CIVIL. Resistencia estructural. . {En línea}. [Citado Abril 2017] Disponible en: (<http://www.cuevadelcivil.com/2011/04/resistencia-estructural.html>)

- Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato micro-deval (INV. E-238-13). El ensayo Micro-Deval es una medida de la resistencia a la abrasión y de la durabilidad de agregados pétreos, como resultado de una acción combinada de abrasión y molienda con esferas de acero en presencia de agua. La prueba tiene por finalidad determinar la perdida por abrasión de agregados gruesos en presencia de agua y de una carga abrasiva. Los resultados son útiles para juzgar la resistencia (tenacidad/abrasión) de agregados sujetos a abrasión, cuando no existe información adecuada sobre este tipo de comportamiento.²¹
- Determinación del valor del 10% finos (INV. E-224-13). Se compacta en un cilindro metálico una muestra de agregado de tamaño especificado, aplicándole golpes con una varilla, La muestra compactada se somete gradualmente a un esfuerzo de compresión, a causa del cual sus partículas se van fragmentando en una cuantía que depende de la

²⁰ INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras. {en línea}. [Citado abril 2017] Disponible en: (<https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>) pág. 75, 76, 83.

²¹ Ibíd. pág., 255, 256.

resistencia al aplastamiento. Su importancia se centra en que los pavimentos asfálticos están sometidos a elevados esfuerzos interparticulares debido a la acción de las cargas de tránsito. Cada capa del pavimento debe soportar los esfuerzos que recibe y disiparlos con el fin de transmitirlos en magnitud apropiada a las capas subyacentes, por lo tanto el ensayo de 10% de finos contribuye en la evaluación del comportamiento del agregado pétreo cuando se somete a degradación mecánica.²²

“Lo ideal en la geometría de las partículas en una mezcla asfáltica es que el agregado pétreo presente forma redondeada con caras fracturadas. Las partículas con esta forma generan un esqueleto granular más compacto, menos deformable bajo carga y con mayor rigidez entre contactos. Partículas alargadas y aplanadas generan esqueletos granulares porosos (deformables) y bajas resistencias a fracturarse bajo una carga mecánica”.²³

- Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INV. E-230-13). El objeto de este ensayo es determinar el porcentaje, en masa o por conteo, de partículas de un agregado grueso que tienen un número especificado de caras fracturadas.
 - Cara fracturada. Una superficie angulosa áspera o quebrada de una partícula de agregado, formada por trituración, por otros medios artificiales o por la naturaleza.

El propósito de este requisito es maximizar la resistencia al corte, incrementando la fricción entre partículas en mezclas de agregados, ligadas o no. Otro propósito es dar estabilidad a los agregados usados en tratamientos superficiales y proporcionar mayor fricción y textura a los agregados usados en la construcción de capas de rodaduras.²⁴

²² INVIAS, op. Cit. Pág. 141

²³ RONDON QUINTANA, op. Cit, Pág.41

²⁴ INVIAS, Ibíd. pág., 160, 161.

5.6. CEMENTO ASFALTICO

“Es un producto bituminoso semi-sólido a temperatura ambiente, preparado a partir de hidrocarburos naturales mediante un proceso de destilación, el cual contiene una proporción muy baja de productos volátiles, posee propiedades aglomerantes y es esencialmente soluble en tricloroetileno.”²⁵

“El cemento asfáltico se designa por las letras CA y se clasifican por lo general de acuerdo con su consistencia evaluada a través de dos ensayos: penetración y viscosidad”.²⁶

Las mezclas que se fabrican con CA como ligante son denominadas mezclas en caliente ya que se necesita calentarlo a altas temperaturas (entre 135 y 160°C por lo general) para poder adherirlo al agregado pétreo. A temperatura ambiente el CA es un material viscoso que no puede adherirse al agregado pétreo. En Colombia se exige la producción industrial de tres tipos de CA:

- CA 80-100 (mínimo PG²⁷ 58-22)
- CA 60-70 (mínimo PG 64-22)
- CA 40-50 (mínimo PG 64-22)

Los cementos asfálticos son usados en las mezclas en caliente según la temperatura de la zona, el CA 80-100 en lugares con temperatura menores a 24°C y el CA 60-70 en sitios con temperaturas superiores a 24°C., de igual manera para volúmenes de tránsito altos, sin importar la temperatura de la zona, se recomienda usar el CA 60-70 o CA 40-50.

Por calidad, los requisitos mínimos que deben cumplir los CA en Colombia son señalados por el INVIAS, los cuales se pueden ver plasmados en la Tabla 3.

²⁵ INVIAS, op. Cit. Pág. 43

²⁶ RONDON QUINTANA, op. Cit, Pág.2

²⁷ Grado de desempeño.

Tabla 3 Especificaciones del Cemento Asfáltico

CARACTERÍSTICAS	NORMA DE ENSAYO INV	GRADOS DE PENETRACIÓN					
		40 - 50		60 - 70		80 - 100	
		MÍN	MAX	MÍN	MAX	MÍN	MAX
Asfalto original							
Penetración (25°C, 100 g, 5 s), 0,1 mm	E-706	40	50	60	70	80	100
Punto de ablandamiento, °C	E-712	52	58	48	54	45	52
Índice de penetración	E-724	-1,2	+0,6	-1,2	+0,6	-1,2	+0,6
Viscosidad absoluta (60° C)	E-716 o	200	-	150	-	100	-
	E-717	0		0		0	
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min)	E-702	80	-	100	-	100	-
Solubilidad en tricloroetileno	E-713	99	-	99	-	99	-
Contenido de agua	E-704	-	0.2	-	0.2	-	0.2
Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland	E-709	240	-	230	-	230	-
Contenido de parafinas, %	E-718	-	3	-	3	-	3
Asfalto residual, luego de la prueba de acondicionamiento en película delgada rotatoria, norma de ensayo INV E-720							
Pérdida de masa por calentamiento, %	E-720	-	0,8	-	0,8	-	1.0
Penetración del residuo luego de la pérdida por calentamiento (E-720), en % de la penetración original	E-706	55	-	50	-	46	-
Incremento en el punto de ablandamiento luego de la pérdida por calentamiento en película delgada en movimiento (E-720).	E-712	-	8	-	9	-	9
Índice de envejecimiento: relación de viscosidades (60° C) del asfalto residual y el asfalto original	E-716 o E-717	-	4	-	4	-	4

Fuente. Instituto nacional de vías - Invías. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículo 400. Bogotá: Invías, 2013. p. 3.

5.6.1. ENSAYOS

A continuación, se relaciona un resumen corto con la importancia de algunos ensayos en la calidad del cemento asfáltico según INVIAS.

- **Penetración de los materiales Bituminosos (INV E-706-13).** Se derrite una muestra del producto bituminoso (si al inicio se encontraba a temperatura ambiente) y se deja enfriar de manera controlada.

Posteriormente, empleando un penetrómetro con una aguja normalizada se penetra la muestra bajo unas condiciones específicas. El ensayo de penetración se usa para medir la consistencia de los productos bituminosos a la temperatura de ensayo. Altos valores de penetración indican consistencias más blandas.

- **Punto de ablandamiento de materiales Bituminosos (INV E-712-13).** Dos discos horizontales de material bituminoso, fundidos entre anillos de latón, se calientan a una velocidad controlada en un baño líquido, mientras cada uno de ellos soporta una bola de acero. El punto de ablandamiento se considera como el valor medio de las temperaturas a las cuales los dos discos se ablanda lo suficiente, para que cada bola envuelta en material bituminoso caiga una distancia de 25mm (1”).

El punto de ablandamiento es útil en la clasificación de los productos bituminosos y es un buen indicador de la tendencia del material a fluir cuando está sometido a temperaturas elevadas durante su vida de servicio. También, sirve para establecer la uniformidad de los suministros del producto y de las fuentes de abastecimiento.

- **Índice de penetración de los cementos asfálticos (INV E-724-13).** El fundamento del método de obtención de IP se basa en aceptar, por un lado, que a la temperatura del punto de ablandamiento (anillo y bola) la penetración de un cemento asfáltico es 800(0.1 mm), y, por otro, que los valores de la penetración en función de la temperatura se representan por una línea recta, si se elige en ordenadas una escala logarítmica para la penetración.
 - $IP > -1$: Son cementos asfálticos con poca susceptibilidad a la temperatura, presentando cierta elasticidad y tixotropía. Se les denomina tipo gel o soplado, ya que la mayoría de los asfaltos oxidados pertenecen a este grupo.
 - $IP < -1$: Cementos asfálticos con mayor susceptibilidad a la temperatura; ricos en resinas y con comportamiento algo viscoso.

- IP entre +1 y -1: Características intermedias entre los dos anteriores; pertenecen a este grupo la mayoría de los cementos asfálticos que se utilizan en la construcción de carreteras.
- **Determinación de la viscosidad del asfalto empleando viscosímetros capilares de vacío (INV E-716-13).** Se mide el tiempo necesario para que un volumen fijo de líquido fluya a través de un tubo capilar por acción del vacío, bajo condiciones estrechamente controladas de vacío y temperatura. La viscosidad, en Pa·s, se calcula multiplicando el tiempo de flujo, en segundos, por el factor de calibración del viscosímetro.

La viscosidad a 60°C caracteriza el comportamiento del flujo y se puede usar para verificar el cumplimiento de las especificaciones por parte de los asfaltos líquidos y los cementos asfálticos.

- **Ductilidad de los materiales asfálticos (INV E-702-13).** El ensayo consiste en someter una probeta del material asfáltico a un ensayo de tracción, en condiciones normalizadas de velocidad y temperatura, en un baño de agua, definiéndose la ductilidad como longitud máxima, en cm, que estira la probeta hasta el instante de su rotura.

El ensayo brinda una medida de las propiedades a tensión de los materiales bituminosos y se usa para establecer si el producto que se ensaya cumple la especificación correspondiente.²⁸

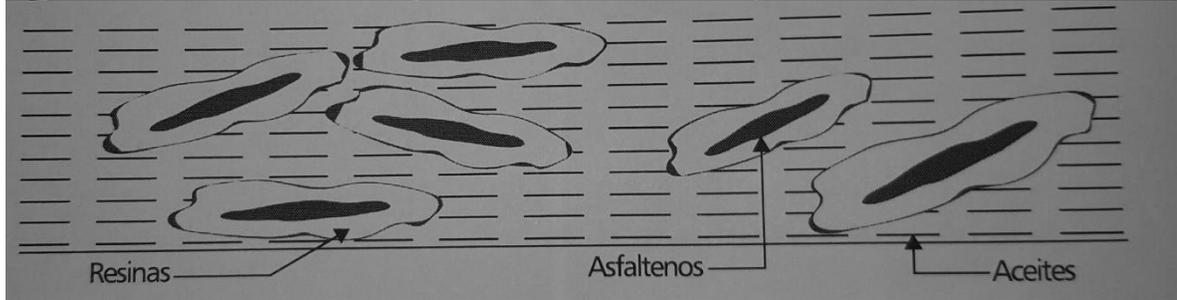
5.6.2. ESTRUCTURA FÍSICO-QUÍMICA

La estructura físico-química del cemento asfáltico funciona de la siguiente manera, los asfáltenos proporcionan rigidez al CA, las resinas proporcionan características cementantes y de adherencia, y los aceites, manejabilidad y protección al envejecimiento. De acuerdo con el instituto de Desarrollo Urbano – IDU y la Universidad de Los Andes (2002), los Asfáltenos (A) hacen parte del 5% al 25% del CA, y el incremento de asfáltenos causa endurecimiento, aumento en la viscosidad y disminución de la susceptibilidad térmica. Las resinas (R) forman parte del CA entre 5% a 30% y aumentan el estado de fluidez del ligante. Los aromáticos (Ar) actúan como medio de dispersión de los asfáltenos y forman parte entre el 40% al 65% de los CA. (Véase Imagen 2.)²⁹

²⁸ INVIAS, op. Cit. Pág. 17, 47, 105, 155, 251.

²⁹ RONDON QUINTANA, op. Cit, Pág.18

Figura 2 Estructura físico-química del asfalto, esquema coloidal de Pfeiffer.



FUENTE: RONDON QUINTANA, HUGO ALEXANDER. PAVIMENTOS: MATERIALES, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO. 1 ED. BOGOTÁ: ECOE EDICIONES, 2015. PAG.37.

5.7. MEZCLA ASFÁLTICA

En Colombia estas mezclas son conocidas como MDC (mezclas densas en caliente), MSC (mezclas semi-densas en caliente), MGC (mezclas gruesas en caliente) y MAM (mezclas de alto módulo) (Invías, 2013, artículo 450-13). Son mezclas totalmente diferentes a las MAF, presentan agregados pétreos con granulometría bien gradada y con tamaños de partículas sólidas diferentes (gravas, arenas, finos, llenante mineral) (Véase Tabla 7), mezcladas con cemento asfáltico. Estas mezclas deben fabricarse, extenderse y compactarse a alta temperatura (fabricarse entre 140 y 180 °C aproximadamente, dependiendo de la viscosidad del asfalto). Son mezclas de alta calidad, las cuales pueden ser utilizadas para conformar cualquier subcapa dentro de la capa asfáltica (rodadura, base intermedia y/o base asfáltica).³⁰

De igual manera el tipo de asfalto se debe verificar de acuerdo a los niveles de tránsito que se van a manejar y la temperatura de la región, para lo cual se debe realizar el control y verificar los rangos dados por el INVÍAS. (Véase Tabla 8).

³⁰ *Ibíd.* pág., 56.

Tabla 4 Granulometrías Típicas para Mezclas Densas en Caliente

TIPO MEZCLA		TAMIZ (mm/U.S.Standard)									
		37,5	25	19	12,5	9,5	4,75	2	0,425	0,18	0,075
		1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°.4	N°.10	N°.40	N°.80	N°.200
		% PASA									
DENSA	MDC-25		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-19			100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-10					100	65-87	43-67	16-29	9-19	5-10

Fuente. Instituto nacional de vías - Invías. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículo 400. Bogotá: Invías, 2013. p. 239

Tabla 5 Criterios de Selección del Cemento Asfáltico

TIPO DE CAPA	NT1			NT2			NT3		
	TEMPERATURA MEDIA ANUAL PONDERADA DE LA REGIÓN (°C)								
	>24	15-24	< 15	> 24	15-24	< 15	> 24	15-24	< 15
Rodadura e intermedia	60-70	60-70 u 80 100	80-100	60-70	60-70 u 80 100	80-100	60-70 o Tipo II (a o b) o Tipo III	40-50 60-70 o Tipo II (a o b)	60-70 80-100 o Tipo II b
Base	NA			60-70 u 80 100	60-70 u 80 100	80-100	60-70	60-70 u 80 100	80-100
Alto modulo	NA			NA			TIPO V		

Fuente. Instituto nacional de vías - Invías. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículo 400. Bogotá: Invías, 2013. p. 3.

“El diseño de las mezclas en caliente, cuando el tamaño máximo de partícula del agregado pétreo es inferior a 1”, se realiza por medio del ensayo Marshall (INVIAS E-748-13), criterios plasmados en la TABLA 9”.³¹

³¹ RONDON QUINTANA, op. Cit. pág., 59.

En este ensayo se mide la composición volumétrica y la resistencia de la mezcla bajo carga monotónica a través de la relación entre la estabilidad (E) y el flujo (F), con el fin de determinar el porcentaje óptimo de asfalto que debe presentar la mezcla para desarrollar en teoría su mejor comportamiento. E puede ser entendida como la máxima carga monotónica que es capaz de resistir una briqueta de 1200 g de masa y dimensiones de 4" de diámetro y 2.5" de altura a altas temperaturas de servicio (60 °C) en el aparato Marshall, mientras que F es el desplazamiento que experimenta en el momento de la falla (cuando en el ensayo se alcanza el valor de E).³²

Tabla 6 Diseño de Mezcla y Obtención de la Fórmula de Trabajo

CARACTERÍSTICA		NORMA ENSAYO INV	MEZCLA DENSA, SEMIDENSAS Y GRUESAS			MEZCLA DE ALTO MODULO
			CATEGORÍA DE TRANSITO			
			NT1	NT2	NT3	
Compactación (golpes/cara)		E-748 (E-800) (Nota 1)	50	75 (112)	75 (112)	75
Estabilidad mínima (N)			5,000	7,500 (16,875)	9,000 (16,875)	15,000
Flujo (mm) (Nota 2)			2.0 a 4.0	2.0 a 4.0 (3.0 a 6.0)	2.0 a 3.5 (3.0 a 5.3)	2.0 a 3.0
Relación de estabilidad/ Flujo (KN/mm)			2.0 a 4.0	3.0 a 4.0 (4.5 a 7.5)	3.0 a 6.50 (4.5 a 9.0)	-
Vacíos con aire (Va)*,% (Nota 3)	Rodadura	E-736 o E-799	3.0 a 5.0	3.0 a 5.0	3.0 a 5.0	NA
	Intermedia		4.0 a 8.0	4.0 a 7.0	4.0 a 7.0	4.0 a 6.0
	Base		NA	5.0 a 8.0	5.0 a 8.0	4.0 a 6.0
Vacíos en los agregados minerales (VAM), %	T. máx. 38 mm	E-799	13.0			-
	T. máx. 25 mm		14.0			14.0
	T. máx. 19 mm		15.0			-
	T. máx. 10 mm		16.0			-
Vacíos llenos de asfalto (VFA), %		E-799	65 a 80	65 a 78	65 a 75	63 a 75
Relación de llenante / Ligante efectivo, en peso		E-799	0.8 a 1.2			1.2 a 1.4

³² Ibíd. pág., 56.60

Concentración de llenante, valor máximo	E-745	Valor crítico
Evaluación de propiedades de empaquetamiento por el método Bailey	-	Reportar
Espesor promedio de película de asfalto, mínimo	E-741	7.5

Fuente. Instituto nacional de vías - Invías. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Tabla 450-10. Bogotá: Invías, 2013. p. 450-10.

5.8. ESTABILIDAD Y FLUJO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL EQUIPO MARSHALL INV E 748-13

“El objeto del ensayo es determinar la resistencia a la deformación plástica de especímenes de mezclas asfálticas para pavimentación. El procedimiento consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de mezcla asfáltica, de 102 mm (4”) de diámetro y una altura nominal de 63.5 mm (2 ½”), las cuales se someten a curado en un baño de agua o en un horno, y luego a carga en la prensa Marshall bajo condiciones normalizadas, determinándose su estabilidad y su deformación (flujo)”.

³³

Este ensayo es de gran importancia, debido a que se utiliza para determinar la estabilidad y el flujo, de los cuales se obtienen los datos para el diseño de las mezclas asfálticas.

5.8.1. EQUIPO

- Dispositivo para moldear probetas.
- Extractor de probetas.
- Martillos de compactación (manuales o mecánicos)
- Pedestal de compactaciones.
- Sujetador para el molde.
- Elementos de calefacción.
- Mezcladora.
- Mordazas.
- Máquina de compresión.

³³ INVIAS, op. Cit. Pág. 474

- Medidor de estabilidad.
- Medidor de deformación (flujo).
- Baño de agua.
- Equipos misceláneos.

5.8.2. ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS

- Se preparan como mínimo tres probetas con diferentes contenidos de asfalto, con el fin de graficar el contenido óptimo de asfalto, con la gradación particular del agregado.
- Posteriormente, se debe alistar el material para tamizado, generando inicialmente un secado de los agregados a una temperatura entre 105 y 110°.
 - En general se recomiendan las porciones siguientes.

25.0 mm a 19 mm	(1" a ¾")
19.0 mm a 9.5mm	(¾" a 3/8")
9.5 mm a 4.75mm	(3/8" a. No. 4)
4.75 mm a 2.36 mm	(No. 4 a. No. 8)
Pasante de 2.36mm	No. 8

- Se determina la temperatura de mezcla y compactación, el cemento asfáltico se debe calentar para elaborar la mezcla a la temperatura que presente una viscosidad de 170 +/- 20 cP (0.17 +/- 0.02 Pa·s). por otra parte, la temperatura de compactación se debe realizar cuando la viscosidad de 280 +/- 30 cP (0.28 +/- 0.03 Pa·s).
- Debido a que será un juego de 5 probetas en el caso del presente proyecto, la preparación de la mezcla se realiza en 5 bandejas taradas para cada porcentaje de cemento asfáltico adicionado, de forma que resulte cada probeta con una altura de 65.5 +/- 2.5 mm (2 ½" +/- 0.1"). Posteriormente, los agregados se deben calentar en el horno, a una temperatura mayor que la mezcla, sin exceder más de 28 °C. A continuación, en otro recipiente de se realiza el mezclado en seco durante 5s de los agregados, luego se realiza un cráter en su centro en el cual se vierte la cantidad de asfalto de la probeta, importante que los dos materiales se encuentren en el rango de temperatura mencionados en el literal anterior; prontamente en un término de 60s se

mezclan los agregados y el asfalto hasta obtener una mezcla completa y homogénea.

- El siguiente paso a realizar es la compactación de las probetas, para lo cual se calientan a una temperatura entre 90 y 150 °C en el horno el conjunto de molde, collar, placa base y base del martillo. Se monta el conjunto de moldeo de las probetas justo antes de verter la mezcla se coloca un papel de filtro circular ajustado al área interna del moldeo. Seguido se golpea el molde 15 veces alrededor del perímetro y 10 veces sobre el inferior. Después se coloca otro papel de filtro sobre la mezcla. Se debe cumplir el parámetro de temperatura de la mezcla inmediatamente antes de compactarse mencionado en otro literal del ensayo.

Con el martillo de compactación mecánico, se le aplican 75 golpes, en seguida se retiran la placa de base y el collar y se colocan en los extremos opuestos del molde; y se le vuelve a aplica el mismo número de golpes. Después de la compactación se retiran collar y placa base y se deja secar la probeta al aire libre. Una vez transcurra el período de reposo, se determina la gravedad específica y seguidamente el espesor de cada espécimen.

5.8.3. ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO

- Con lapso de 24 horas después de realizada la compactación, deben poner las probetas en un baño de agua durante 30 a 40 minutos manteniendo el baño o el horno a 60 °C +/- 1 °C.
- Se prepara el equipo antes de montar las probetas limpiando perfectamente el mismo y lubricando las guías con el fin de garantizar que la mordaza superior se deslice libremente sobre ellas, manteniendo una temperatura de las mordazas entre 20 y 40 °C.
- Acto seguido se retiran la probeta del baño de agua retirando el exceso de agua con una toalla y en la mordaza inferior se coloca centrada, se monta la mordaza superior con el medidor de deformación nuevamente centrando todo el conjunto, se coloca el medido de flujo en posición, se ajusta a cero y se mantiene su vástago firmemente contra la mordaza superior mientras se aplica la carga.
- Hasta que ocurra la falla se aplica la carga sobre la probeta con la prensa a una rata deformación de 50 +/- 5 mm/min. El valor se determina cuando se

advierte que se alcanza la máxima carga y empieza a decrecer. No puede pasar más de 30s entre el momento que se saca la probeta del baño de agua y su falla.

- El proyecto se realizará por el método A, por lo cual el flujo será la deformación registrada por el dial de deformación en el instante de falla.

5.9. EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA INV E-725-13

Establece un procedimiento para preparar y probar especímenes de concreto asfáltico, con el fin de medir el efecto del agua sobre su resistencia a la tracción indirecta. El método es aplicable a las mezclas densas y permite evaluar el efecto de la humedad sobre mezclas elaboradas con o sin aditivos mejoradores de adherencia.³⁴

El daño generado por la humedad se determina preparando un grupo de especímenes, de acuerdo al diseño granular y contenido de asfalto previsto, los cuerpos de prueba se preparan de tal manera que su contenido de vacíos se encuentre entre 6 y 8%. Cada grupo se subdivide en dos grupos, uno se mantiene en condición seca, el segundo se satura parcialmente de agua y se acondiciona en un baño de agua. Se realiza la prueba de tracción indirecta y se obtiene daño potencial indicado por la relación de la resistencia a la tensión, entre subgrupo húmedo y seco.

La importancia del ensayo se emplea para probar mezclas de concreto asfáltico, en conjunto con los ensayos de diseño de la mezcla y determinar el daño potencial por humedad, de igual forma verificar si un modificador es efectivo o no, de encontrarse un resultado positivo, encontrar el contenido óptimo de modificador.

5.9.1. EQUIPO

- Equipos de las normas INV E-747 e INV E-748 (Para el presente ensayo equipo de Marshall).
- Bomba de vacío INV E-735
- Manómetro indicador de vacío INV E-735
- Balanza con capacidad mínima de 2kg y sensibilidad de 0.g.

³⁴ INVIAS, op. Cit. Pág. 253

- Tres baños de agua
 - Un baño de acuerdo con la norma INV E-733
 - Un baño que permita mantener una temperatura de 60 +/- 1°C durante 24 horas.
 - Un baño que permita mantener una temperatura de 25 +/- 1°C.
 - Prensa Marshall
 - Franjas de carga (equipo lottman)

5.9.2. ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES PARA ENSAYO EN EL LABORATORIO.

Se elaboran mínimo seis especímenes, para evaluar tres en condición seca y tres en saturada y acondicionada en baño de agua; las especificaciones de altura y diámetro están normalmente dada por 102 mm (4”) de diámetro y 63.5 mm de altura.

La dosificación de la mezcla se realiza en la forma descrita en el ensayo INV E-747 o 728, el método Marshall con el martillo manual o mecánico.

- “Después de la mezcla, se estabiliza la temperatura de cada espécimen a la temperatura requerida para su compactación, en un recipiente cerrado dentro de un horno, por un periodo de 1 a 2 horas. Si se va a preparar una bachada para elaborar varios especímenes, se deberá subdividir en las cantidades requeridas para un solo espécimen, antes de su colocación en el horno.
- Se compactan los especímenes de manera de alcanzar un volumen de vacíos con aire de 7 +/- 1%, o el nivel de vacíos esperado en el campo en el momento de la construcción. Este nivel de vacío se puede obtener ajustado los siguiente: la carga estática en la compactación con doble embolo, el número de golpes de la compactación Marshall o el número de giros en la compactación giratoria. Se debe determinar el procedimiento exacto para cada mezcla por medio de ensayos, variando la energía de compactación según el método utilizado, y determinando los vacíos con aire alcanzado en cada oportunidad.
- Se enfrían los especímenes en los moldes a temperatura ambiente, tan rápido como sea posible en la corriente de aire; se extraen de los moldes y, dentro de las 24 horas siguientes, se sigue el procedimiento indicado”³⁵.

5.9.3. PROCEDIMIENTO.

- “Se determina la gravedad específica máxima medida de la mezcla.

³⁵ INVIAS, op. Cit. Pág. 257

- Se determina la altura de cada espécimen.
- Se determina la gravedad específica de bulk de los especímenes compactado y se expresa el volumen de cada espécimen en cm³.
- Se calcula el porcentaje de vacíos con aire respecto del volumen total (%VA) de cada espécimen. El volumen de vacíos con aire se calcula multiplicando el volumen total encontrado por el porcentaje de vacíos con aire y dividiendo por 100.
- Se dividen los especímenes en dos subgrupos, de tal forma que el promedio de los vacíos con aire en los dos sea aproximadamente igual. Se guarda a temperatura ambiente el subgrupo que va a ser probado en seco.
- Utilizando una cámara de vacío se satura parcialmente con agua destilada a temperatura ambiente, el subgrupo que va a ser probado húmedo. Si es difícil alcanzar el grado mínimo de saturación, el agua para saturación se puede calentar a 60°C.
- Se satura parcialmente el subgrupo, al grado especificado aplicando un vacío parcial de 525 mm Hg o 0 kPa, durante un tiempo corto, por ejemplo, 5min.
- Se determina el volumen del espécimen parcialmente saturado, se determina el volumen de agua absorbida, restando la masa seca en el aire del espécimen de la masa del espécimen parcialmente saturado y superficialmente seco.
- Se calcula el grado de saturación. El resultado se expresa en porcentaje. Se debe encontrar entre el 55 y 80% se repite el procedimiento usando un vacío parcial ligeramente superior. Si el volumen de aguas es mayor a 80%, el espécimen se ha dañado y se debe descartar.
- Después de verificar la saturación, se acondicionan los especímenes parcialmente saturados, sumergiéndolos en un baño de agua destilada a 60 +/- 1°C durante 24 horas.
- Se ajusta la temperatura de los especímenes acondicionados en condición húmeda y se determina su volumen.
- Se determinan la absorción de agua y el grado de saturación. Un grado de saturación que exceda de 80% es aceptable.
- Se determina la expansión de los especímenes parcialmente saturados. También, se determina la expansión después del acondicionamiento húmedo. En ambos casos, la expansión se expresará en porcentaje.
- Se ajusta la temperatura del subgrupo conservado en seco, colocando los especímenes en un baño de agua a 25 +/- 1°C durante 20 minutos.
- Se determina la resistencia de ambos subgrupos a 25 +/- 1°C, iniciando con la colocación de un espécimen en el aparato de carga, con las franjas de carga centradas y paralelas sobre el plano diametral vertical. Se aplica una carga diametral a una tasa de deformación 50 mm/min hasta que alcance la carga máxima y se registra dicha carga³⁶.
-

³⁶ INVIAS, op. Cit. Pág. 262

5.10. CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ABIERTAS POR MEDIO DEL ENSAYO CANTABRO DE PÉRDIDA POR DESGASTE INV E-760-13

“El ensayo se aplica a mezclas asfálticas fabricadas en caliente y de granulometría abierta, cuyo tamaño máximo de partícula se igual o inferior a 25mm, permite valorar empíricamente la resistencia a la disgregación de la mezcla, ante los efectos abrasivos y de succión originados por el tránsito automotor”³⁷.

“Consiste en elaborar una probeta tipo Marshall, compactada con 50 golpes por cara, se introduce en la máquina de ensayo de los Ángeles sin la carga abrasiva. Las mezclas porosas o drenantes, usadas como capas de rodadura, son mezclas que se caracterizan por tener un contenido elevado de vacíos con aire, interconectados entre sí, que permiten la filtración de agua lluvia con rapidez hacia las zonas laterales fuera de la calzada. La observación del comportamiento de las obras en servicio ha puesto de manifiesto que la falla de estas capas se produce por disgregación, como consecuencia de una falta de cohesión de la mezcla para poder resistir apropiadamente la acción abrasiva del tránsito”³⁸.

5.10.1. EQUIPO

- Equipo de compactación Marshall.
- Máquina de los ángeles.
- Termómetros con escala hasta 200°C y sensibilidad de 3°C.
- Balanza de 2 kg de capacidad y 0.1 g de sensibilidad.
- Horno.
- Cámara de temperatura controlada.
- Elementos misceláneos.

5.10.2. PROCEDIMIENTO

“La preparación de los cuerpos de prueba se realiza siguiendo el procedimiento del ensayo INV E-748, con un cambio en la energía de compactación a 50 golpes por cara. La temperatura del ensayo estará comprendida entre 15 y 30°C, con una tolerancia máxima de +/- 1°C.

Se determina la masa de cada probeta con aproximación de 0.1g, y se anota este valor como P1. Antes de ensayarlas, las probetas se mantienen a la temperatura de ensayo durante mínimo 6 horas.

³⁷ INVIAS, op. Cit. Pág. 53

³⁸ INVIAS, op. Cit. Pág. 54

A continuación, se introduce una probeta en el tambor de la máquina de los Ángeles sin la carga abrasiva de las esferas, y se hace girar el tambor a una velocidad de 188 a 208 rad/min (30 a 33 rpm), durante 300 vueltas.

Al final del ensayo se cada la probeta del tambor y se determina de nuevo su masa con la misma aproximación de 0.1g.

5.11. ASFALTOS MODIFICADOS

Existen en el mundo dos técnicas de utilización de polímero o aditivos para modificar las propiedades de mezclas asfálticas. A estas técnicas de modificación se les denomina vías húmeda o seca. Por vía húmeda, el polímero o aditivo es agregado al asfalto a alta temperatura y, luego este ligante ya modificado es adicionado al agregado pétreo para conformar la mezcla asfáltica. Por vía seca, el aditivo reemplaza parte del agregado pétreo y se adiciona a este a alta temperatura para luego recibir el asfalto y formar la mezcla asfáltica.

Los objetivos que se persiguen cuando se modifican asfaltos es mejorar algunas de las propiedades de la mezcla asfáltica tales como:

- Resistencia a la fisuración y susceptibilidad térmica.
- Resistencia a la deformación permanente (ahuellamientos) bajo carga cíclica y monotónica.
- Adherencia entre los agregados pétreos.
- Cohesividad.
- Resistencia al envejecimiento.
- Resistencia a la fatiga.
- Resistencia al daño por humedad.³⁹

Si se realiza un recuento de los modos de transporte actualmente usados para transporte de carga, se puede observar que todo se apoya a el manejo de todo tipo de mercancías en camiones, los cuales generan un alto desgaste a las estructuras de pavimento de las vías a nivel nacional, de igual manera no se observa que el gobierno o las entidades que tienen a cargo el manejo de la infraestructura planteen otro tipo de solución al transporte de carga pesada.

De esta manera se puede observar en Colombia en una escala menor que en otras partes del mundo, el ingreso de aplicaciones en los pavimentos con estructuras modificadas desde la estructura de pavimento como en su capa de rodadura, hallando

³⁹ RONDON QUINTANA, op. Cit. pág., 104.

un buen aliado en los polímeros ya que aportan para mejorar aspectos que alargan la vida de operación de un proyecto vial.

Los polímeros se pueden clasificar en dos grandes grupos: termoendurecibles y termoplásticos. Los primeros no se utilizan para modificar asfaltos porque son materiales que a altas temperaturas se descomponen o degradan sus propiedades. Los termoplásticos, por el contrario, son utilizados para modificar asfaltos ya que pueden ser sometidos a altas temperaturas sin que se degraden demasiado sus propiedades. Los termoplásticos a su vez se subdividen en dos clasificaciones: elastómeros y plastómeros. Los tipos de elastómeros más utilizados para modificar asfaltos son los cauchos naturales como el estireno-butadieno-estireno (SBS), cauchos sintéticos derivados del petróleo (estireno-butadieno-caucho, SBR) y el grano de llanta reciclado y triturado (GCR). Dentro de la gama de los plastómeros se encuentran entre otros: el polietileno de alta y baja densidad (PEAD, PEBD), polipropileno (PP), Poliestireno (PS) y el Policloruro de vinilo (PVC).⁴⁰

5.11.1. POLISOMBRA

La Tela verde es una tela tejida en polipropileno, con aditivos que la protegen contra la acción de los rayos ultravioletas, fabricada en diferentes porcentajes de 33% (también conocida como Polisombra al 35%), 47% (también conocida como Polisombra al 50%), 65%, 80%, que le permite regular la luz, de fácil manejo y durabilidad.⁴¹

• POLIPROPILENO

El polipropileno (PP) empezó a comercializarse a finales de la década del '50 y se ha convertido en el polímero termoplástico de mayor producción mundial. Actualmente, el PP se utiliza para fabricar desde el paragolpes de un auto hasta el tejido que recubre los pañales descartables, pasando por tuberías, fibras, cajas, envases, films, juguetes y un larguísimo etcétera. La gran versatilidad de este material se debe a su estructura química y disposición espacial, que le confieren un gran número de cualidades deseables. Se trata del polímero comercial de menor densidad, posee una excelente resistencia química, buenas propiedades eléctricas derivadas de su a polaridad, inercia química y biológica, alta estabilidad térmica, es de fácil procesamiento y admite ser reciclado. Sin embargo, el PP posee ciertas desventajas que limitan su aplicación en altas prestaciones. Estas limitaciones se deben a su baja tenacidad a la fractura especialmente cuando es solicitado a bajas temperaturas y en condiciones de impacto.⁴²

El Polipropileno es un termoplástico que es obtenido por la polimerización del propileno, subproducto gaseoso de la refinación del petróleo. Todo esto

⁴⁰ RONDON QUINTANA, op. Cit. pág., 104.

⁴¹ Agro universo. Tela verde [en línea] Bogotá. [Citado 12 de abril 2017] Disponible en internet <URL:<http://www.agrouniverso.com/www/index.php/productos/construccion/tela-verde-construccion.html>>

⁴² FASCE, Laura A. Comportamiento mecánico de polipropileno modificado con una poliolefina elastomérica. 2002. Tesis Doctoral. Tesis doctoral, INTEMA, UNMdP.

desarrollado en presencia de un catalizador, bajo un cuidadoso control de temperatura y presión. El Polipropileno se puede clasificar en tres tipos (homopolímero, copolímero rándom y copolímero de alto impacto), los cuales pueden ser modificados y adaptados para determinados usos.

- **Características.**

El polipropileno (PP), es un polímero termoplástico de gran consumo y su aplicación han crecido significativamente debido a que es un polímero muy versátil, es decir, posee gran capacidad para ser modificado y diseñado para distintas aplicaciones específicas. Debido a su comportamiento térmico y geológico, cuando se encuentra fundido, puede ser procesado en un amplio intervalo de condiciones que van desde el moldeo por inyección hasta el soplado. Su baja densidad en el mercado, tanto por sus propiedades mecánicas como por su baja relación costo/volumen. Los productos de polipropileno poseen una mayor flexibilidad y simplicidad para el reciclado, debido a su alta resistencia química y medio ambiental, y su baja densidad que favorece la separación de otros materiales.⁴³

- Optima relación Costo / Beneficio.
- Versatilidad: compatible con la mayoría de las técnicas de procesamiento existentes y usado en diferentes aplicaciones comerciales, como, packaging, industria automotriz, textiles, menaje, medicina, tuberías, etc.
- Buena procesabilidad: es el material plástico de menor peso específico (0,9 g/cm³), lo que implica que se requiere de una menor cantidad para la obtención de un producto terminado.
- Barrera al vapor de agua: evita el traspaso de humedad, lo cual puede ser utilizado para la protección de diversos alimentos.
- Buenas propiedades organolépticas, químicas, de resistencia y transparencia.⁴⁴

- **Propiedades**

Las propiedades físicas, químicas y mecánicas del polipropileno le permiten ser aplicado en una amplia variedad de productos formados mediante procesos de extrusión o de inyección. El polipropileno (PP) es una poliolefina que se sintetiza mediante catálisis a partir del propileno para formar un homopolímero o copolímero con otras olefinas.

- Propiedades físicas:

⁴³ VALLEJOS, María Evangelina, et al. Aprovechamiento integral del Cannabis sativa como material de refuerzo/carga del polipropileno. Universidad de Girona, 2006.

⁴⁴ PETROQUIM Tecnología y servicio en polipropileno Que es el polipropileno -Disponible en Internet <URL: <http://www.petroquim.cl/que-es-el-polipropileno/>

- La densidad del polipropileno, está comprendida entre 0.90 y 0.93 gr/cm³. Por ser tan baja permite la fabricación de productos ligeros.
 - Es un material más rígido que la mayoría de los termoplásticos. Una carga de 25.5 kg/cm², aplicada durante 24 horas no produce deformación apreciable a temperatura ambiente y resiste hasta los 70 grados C.
 - Posee una gran capacidad de recuperación elástica.
 - Tiene una excelente compatibilidad con el medio.
 - Es un material fácil de reciclar
 - Posee alta resistencia al impacto
- Propiedades mecánicas
 - Puede utilizarse en calidad de material para elementos deslizantes no lubricados.
 - Tiene buena resistencia superficial.
 - Tiene buena resistencia química a la humedad y al calor sin deformarse.
 - Tiene buena dureza superficial y estabilidad dimensional.
- Propiedades químicas
 - Tiene naturaleza apolar, y por esto posee gran resistencia a agentes químicos.
 - Presenta poca absorción de agua, por lo tanto, no presenta mucha humedad.
 - Tiene gran resistencia a soluciones de detergentes comerciales.
 - El polipropileno como los polietilenos tiene una buena resistencia química pero una resistencia débil a los rayos UV (salvo estabilización o protección previa).
 - Punto de Ebullición de 320 °F (160°C)
 - Punto de Fusión (más de 160°C)

5.11.2. POLIMERO TERMOPLASTICO

Los termoplásticos hacen referencia al conjunto de materiales que están formados por polímeros que se encuentran unidos mediante fuerzas intermoleculares o fuerzas de Van der Waals, formando estructuras lineales o ramificadas.

Un material termoplástico lo podemos asemejar a un conjunto de cuerdas enredadas que tenemos encima de una mesa, cuanto mayor sea el grado de enredo de las cuerdas mayor será el esfuerzo que tendremos que realizar para separar las cuerdas unas de otras dado a que el rozamiento que se produce entre cada una de las cuerdas ofrece resistencia a separarlas, en este ejemplo las cuerdas representa a los polímeros y el rozamiento representa las fuerzas intermoleculares que los mantiene unidos a los polímeros.

En función del grado de las fuerzas intermoleculares que se producen entre las cadenas poliméricas, estas pueden adoptar dos tipos diferentes de estructuras, estructuras amorfas o estructuras cristalinas, siendo posible la existencia de ambas estructuras en un mismo material termoplástico.

- Estructura amorfa - Las cadenas poliméricas adquieren una estructura liada, semejante al de un ovillo de hilos desordenados, dicha estructura amorfa es la responsable directa de las propiedades elásticas de los materiales termoplásticos.
- Estructura cristalina - Las cadenas poliméricas adquieren una estructura ordenada y compacta, se pueden distinguir principalmente estructuras con forma lamelar y con forma micelar. Dicha estructura cristalina es la responsable directa de las propiedades mecánicas de resistencia frente a esfuerzos o cargas, así como la resistencia a las temperaturas de los materiales termoplásticos.

Si el material termoplástico dispone de una alta concentración de polímeros con estructuras amorfas, dicho material presentará una pobre resistencia frente a cargas pero una excelente elasticidad, si por el contrario el material termoplástico dispone de una alta concentración de polímeros con una estructura cristalina, el material presentará unas altas propiedades de resistencia frente a cargas y esfuerzos superando incluso a materiales termoestables, por otro lado presentará unas pobres propiedades elásticas aportándole su característica fragilidad.

- **Propiedades**

Las propiedades del material de un polímero termoplástico pueden ajustarse para satisfacer las necesidades de una aplicación específica mediante la mezcla de la resina termoplástica con otros componentes.

Comportamiento Elástico. En los polímeros termoplásticos la deformación elástica es el resultado de dos mecanismos. Un esfuerzo aplicado hace que se estiren y distorsionen los enlaces covalentes de las cadenas, permitiendo que estas se alarguen elásticamente. Al eliminar el esfuerzo se recuperan de esta distorsión prácticamente de manera instantánea.

Comportamiento Plástico. Los polímeros termoplásticos se deforman plásticamente cuando se excede al esfuerzo de cadencia. Sin embargo, la deformación plástica no es una consecuencia de movimiento de dislocación. En lugar de eso las cadenas se estiran, se deslizan bajo la carga, causando una deformación permanente.

Visco elasticidad. La capacidad de un esfuerzo para provocar el deslizamiento de cadenas y la deformación plástica está relacionada con el tiempo y la rapidez de deformación. Si el esfuerzo se aplica lentamente, las cadenas se deslizan fácilmente una al lado de otra; si se aplica con rapidez, no ocurre deslizamiento y el polímero se comporta de manera frágil.

Impacto. El comportamiento visco elástico también ayuda a comprender las propiedades al impacto de los polímeros. A muy altas velocidades de deformación, como en una prueba de impacto, no hay tiempo suficiente para que las cadenas se deslicen causando deformación plástica. En estas circunstancias, los

termoplásticos se comportan de manera frágil y tienen valores pobres al impacto. A bajas temperaturas en un ensayo al impacto se observa el comportamiento frágil en tanto que a temperaturas más elevadas donde las cadenas se mueven con mayor facilidad, se observa un comportamiento más dúctil.

Corrosión. El ataque por una diversidad de insectos y microbios es una forma de corrosión en los polímeros. El polietileno, el propileno y el Poliestireno son resistentes a este tipo de corrosión.

Propiedades eléctricas. Los polímeros termoplásticos son materiales aislantes pero algunos polímeros termoplásticos complejos como el acetal poseen una conductividad térmica útil.⁴⁵

- **Clasificación**

Los termoplásticos presentan una estructura lineal, se pueden fundir y solidificar aplicando calor de manera reversible y retienen su forma al enfriarse. Son solubles. Representan la mayor parte de los plásticos de uso común.

Los polímeros termoplásticos se pueden clasificar en siete tipos diferentes, dependiendo del material utilizado para su fabricación industrial, la clasificación está realizada en base a las resinas por las que están constituidos y es indispensable su conocimiento para poder entender su reciclaje (explicado en un capítulo posterior de este proyecto).

- Tereftalato de polietileno (PET): se encuentra en los embalajes, las bolsas, los juguetes, los frascos e incluso en los chalecos antibalas. En la actualidad aparecen cada vez más en nuevos campos de aplicación y se desarrollan botellas con este material de alta calidad y peso reducido. También se caracterizan por propiedades mecánicas como su alta resistencia y tenacidad. De acuerdo a su orientación estructural microscópica presenta propiedades de transparencia y resistencia química.
- Polietileno de alta densidad (PEAD): Es un material translúcido, con un punto de fusión promedio de 110°C. Tiene una conductividad térmica baja. Sus principales aplicaciones aparecen dentro del sector de fabricación de envases y embalajes (bolsas, botellas, películas, sacos, tapas para botellas) y como aislante (baja y alta tensión).
- Polietileno de baja densidad (PEBD): Presenta una buena resistencia a la tracción, al rasgado y a la perforación o punción, buena resistencia al impacto a temperaturas muy bajas (hasta -95°C) y en películas posee excelente elongación.

⁴⁵ SAMANTHA NUÑEZ– PROPIEDADES DEL POLIPROPILENO, 25 DE OCTUBRE DE 2012 Disponible en internet < URL: <https://www.quiminet.com/articulos/propiedades-del-polipropileno-2671066.htm>

Sus principales aplicaciones son la fabricación de películas de embalaje, bolsas grandes para uso pesado y acolchado agrícola.

- Polipropileno (PP): Presentan menor densidad y gran resistencia pudiéndose encontrar en los parachoques de los automóviles, botellas, depósitos de combustible y en algunas fibras sintéticas.
- Poliestireno (PS): Es el más económico de todos los polímeros termoplásticos, pero no resiste altas temperaturas. Se usa en la fabricación de televisores, impresoras, máquinas de afeitar, indumentaria deportiva, salvavidas y cascos de ciclismo. Su facilidad para el moldeo y su abundante variedad de propiedades le permite desempeñar gran cantidad de aplicaciones diferentes.
- Policloruro de vinilo (PVC): destaca por su buena resistencia eléctrica y al fuego; se utiliza para ventanas, tuberías, cables, juguetes, calzado, pavimento y recubrimientos. Por sí solo es el más inestable de los termoplásticos, pero con aditivos es el más versátil y puede ser sometido a diferentes procesos para su transformación, lo que le ha hecho ocupar, por su consumo, el segundo lugar mundial detrás del polietileno.
- Otros: Debido a la gran variedad de termoplásticos, solo se han citado con anterioridad los más importantes, pero se crea este grupo para englobar al resto de plásticos menos comunes pertenecientes a esta familia de materiales. En este grupo se encuentran materiales como el teflón que es capaz de soportar elevadas temperaturas sin deformarse y es antiadherente. Se utiliza para revestimientos de aviones y cohetes, revestimiento de cables, mangueras y pinturas. El nylon también pertenece a este grupo, tiene buena resistencia química a los aceites, grasas o disolventes, pero se ablanda a temperaturas no muy altas. Se usa mucho en la ingeniería mecánica para engranajes o rodamientos y también en el embalaje de alimentos y medicamentos, en prendas de vestir, cerdas para cepillos de dientes, paracaídas, cuerdas de guitarra, cremalleras y tornillos.⁴⁶

- **Impacto ambiental**

Una de sus desventajas es su durabilidad en el medio ambiente comparado con su uso efímero durante su vida útil, lo cual constituye un claro inconveniente si su uso es inadecuado; como consecuencia se provoca una elevada generación y acumulación de residuos poliméricos, dañando ecosistemas naturales de manera irreversible.⁴⁷

⁴⁶ MERE MARCOS JAVIER Estudio del proceso de un polímero termoplástico basado en almidón diciembre 2009

⁴⁷ *Ibíd.*, p.14

“El largo tiempo necesario para que se produzca su degradación por el medio ambiente constituye uno de los mayores inconvenientes de los plásticos”.⁴⁸

Por lo tanto, se requiere de una alternativa que contribuya y mitigue el impacto generado por los residuos generados por el termoplástico.

⁴⁸Ibíd., p.17

6. FASE EXPERIMENTAL

El proceso experimental se realizó en dos secciones, en la primera sección se realizaron 12 probetas con el fin de poder graficar el contenido de asfalto óptimo con la gradación del agregado según los lineamientos de INVIAS (Véase Tabla 4, anexo 1), siguiendo la mismas normas se realizó la mezcla con los porcentajes de cemento asfáltico 60-70 de penetración con valores de 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6%, teniendo en cuenta los rangos y número de probetas indicados en las especificaciones del INVIAS para diseño de mezclas con el método de Marshall resumido en el capítulo 2.4.

Después de encontrado el porcentaje de asfalto óptimo, en este caso 5% de CA, se procedió a realizar 50 probetas, las cuales se dosificaron con la adición de Polisombra al 0.5%, 1%, 1,5% y 2%.

6.1. PROCEDIMIENTO

6.1.1. Ensayo de Marshall Mezcla densa en caliente convencional y mezcla con modificación de polisombra.

De acuerdo a los parámetros Inviás, cumpliendo los rangos de dosificación del agregado pétreo, (Véase Tabla 4), se determinan los porcentajes de asfalto óptimo y material granular. (Véase Tabla 1 al 4, Anexo 1), con porcentajes de 4,5 a 6 %, con intervalos de 0,5 %.

Siguiendo el procedimiento estipulado en el numeral 5.8.2, se realizó el ensayo Marshall a las 12 probetas iniciales con el fin de encontrar el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla. (Véase Tabla 5 al 8, Anexo 1). Una vez revisados los resultados del diseño de la mezcla asfáltica convencional se encuentra que el porcentaje óptimo de CA es del 5%, con este diseño de mezcla se procede a realizar las 50 probetas adicionales modificadas con Polisombra.

- **Corte de Polisombra.** En la segunda fase del ensayo se realiza en primera instancia el corte de la Polisombra de forma manual, en un rango de 10 cm +/- 1 cm. (Véase figura 3).

Figura 3 Corte tiras de Polisombra



Fuente: El Autor

- **Elaboración de Probetas.** Se realiza la caracterización del agregado pétreo, iniciando con el lavado y secado del material, posterior se realiza el tamizado para dividir el material de acuerdo a la granulometría, y posterior se divide en distintos recipientes con la cantidad necesaria para la construcción de cada probeta. (Véase figura 4-6)

Tabla 7 Comparación especificaciones caracterización del material granular.

Ensayo		Norma	Unidad	Especificación	Resultado
AGREGADO GRUESO					
AGREGADO 3/4"					
DESGASTE EN LA MAQUINA DE LOS ANGELES		E-218	%	25	18.66
DEGRADACIÓN POR ABRASIÓN EN EL EQUIPO MICRO-DEVAL		E-238	%	20	23.9
CARAS FRACTURADAS		E-227	%	85	91
DENSIDAD Y ABSORCIÓN	Peso específico aparente seca	E-223	g/cm3	-	2.66
	Peso específico aparente sss	E-223	g/cm3	-	2.68
	Peso específico aparente nominal	E-223	g/cm3	-	2.73
	Absorción	E-223		-	1.03
AGREGADO 1/2"					
DESGASTE EN LA MAQUINA DE LOS ANGELES		E-218	%	25	21.77
DEGRADACIÓN POR ABRASIÓN EN EL EQUIPO MICRO-DEVAL		E-238	%	20	23.6
CARAS FRACTURADAS		E-227	%	70	84
DENSIDAD Y ABSORCIÓN	Peso específico aparente seca	E-223	g/cm3	-	2.65
	Peso específico aparente sss	E-223	g/cm3	-	2.68
	Peso específico aparente nominal	E-223	g/cm3	-	2.72
	Absorción	E-223		-	0.99
AGREGADOS FINOS					
EQUIVALENTE DE ARENA		E-133	%	50	87
DENSIDAD Y ABSORCIÓN	Peso específico aparente seca	E-223	g/cm3	-	2.58
	Peso específico aparente sss	E-223	g/cm3	-	2.63
	Peso específico aparente nominal	E-223	g/cm3	-	2.72
	Absorción	E-223		-	2.04

Fuente. Instituto nacional de vías - Invías. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Tabla 450-10. Bogotá: Invías, 2013. p. 450-3.

Figura 4 Lavado de material y secado de material granular



Fuente: El Autor

Figura 5 Tamizado de material granular



Fuente: El Autor

Figura 6 Dosificación de material granular cuerpos de prueba



Fuente: El Autor

Se efectúa el cálculo de los porcentajes de cada muestra, considerando el porcentaje de la adición del polímero y los valores del CA y el agregado pétreo. (Véase Tabla 9 a 12, Anexo 1).

Se realiza el peso de los agregados pétreos para cada cuerpo de prueba, teniendo la cantidad de material granular con el ajuste del peso del cemento asfáltico y la polisombra.

Figura 7 Dosificación material granular Probetas.



Fuente. El Autor.

Se realiza la mezcla del agregado pétreo y el Cemento asfáltico siguiendo los parámetros de forma, temperatura y tiempo de mezclado.

Figura 8 Mezcla agregado pétreo y Cemento Asfáltico



Fuente. El Autor.

Se adiciona las tiras de Polisombra, luego de estar mezclado el agregado pétreo y el cemento asfáltico a una temperatura de 150°C.

Figura 9 Adición de Polisombra a la mezcla asfáltica y mezclado de materiales



Fuente. El Autor.

Posteriormente se realiza la colocación de la muestra en los moldes, de acuerdo a los lineamientos encontrados en el capítulo 5.8, y se procede a la compactación de las muestras y secado posterior teniendo especial cuidado de que la mezcla no descienda de 130°C, por lo cual se procede a el calentamiento del molde y compactador para que no afecten en la temperatura, de igual forma se lubrican los elementos para evitar la adhesión de material y pérdida del mismo.

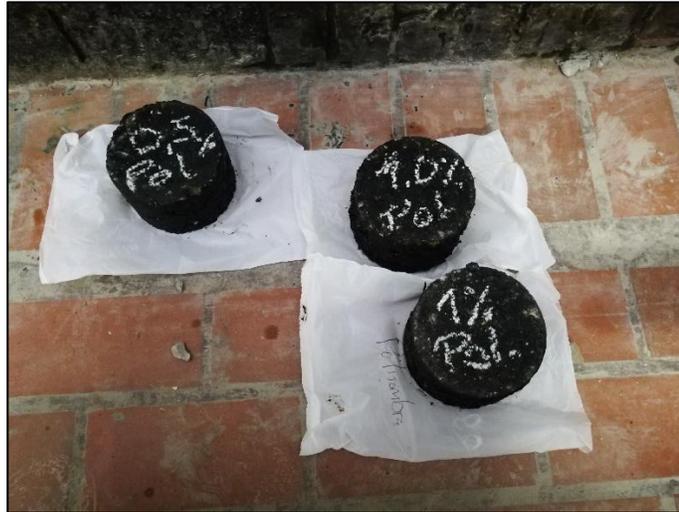
Figura 10 Proceso de compactación de probetas



Fuente. El Autor.

Posteriormente se va realizando el desmolde y clasificación de las muestras, luego se dejan 24 horas a temperatura ambiente.

Figura 11 Clasificación probetas asfalto modificado



Fuente. El Autor.

Cuando las probetas ya están consistentes al esperar el secado, se procede a tomar las medidas de cada probeta y su peso seco y húmedo para calcular la gravedad específica, a continuación, como indica el procedimiento del ensayo se colocan en un baño de agua a la temperatura determinada, respetando el tiempo de saturación y tener los datos para calcular el porcentaje de vacíos.

Figura 12 Toma de masa seca, sss, sumergida y altura de cuerpos de prueba



Fuente. El Autor.

Luego de obtener los datos para el cálculo de densidades, alturas para corrección del valor de la estabilidad, se colocan los cuerpos de prueba en un baño maría, por 30 minutos a una temperatura de 60°C.

Figura 13 Baño de agua probetas previo al ensayo



Fuente. El Autor.

Transcurrido los 30 minutos, se comienzan a fallar los cuerpos de prueba cada minuto, tomando la lectura de la estabilidad y el flujo. (Vease tablas 13 a 16, Anexo 1).

Figura 14 Falla de probetas y toma de lecturas



Fuente. El Autor.

6.1.2. Ensayo de susceptibilidad al agua, prueba tracción indirecta a la mezcla densa en caliente convencional y con modificación de polisombra.

La preparación de los 30 cuerpos de prueba para el ensayo de tracción indirecta, se realizó con el mismo procedimiento y diseño del ensayo Marshall, cambiando el número de golpes para dejar el cuerpo de prueba con el rango contenido de vacíos 7% +/- 1, especificados por la norma INVIAS; para el caso del presente ensayo se usó para la mezcla convencional 25 golpes, aumentando progresivamente 5 golpes a medida que se agregaban los rangos de polisombra, con los cuales se validó la condición óptima de contenido de vacíos que debe contener el cuerpo de prueba y se dividió en los subgrupos en condición seca y parcialmente saturada.

Una vez realizadas las briquetas, se validó los valores especificados en el numeral 5.9, para confirmar que los cuerpos de prueba estén en los grados de saturación exigidos en condición parcial y final.

Luego se acondicionan los dos subgrupos a la temperatura de 25°C +/- 1, y se procede a montarlos en el aparato de carga, con las franjas de carga centradas y se aplicó la carga hasta que se alcanzó el valor máximo registrados. (Véase tablas 17 a 21, Anexo 1).

Figura 15 Acondición de probetas saturadas y secas para carga.



Fuente. El Autor.

Figura 16 Prensa Lottman para carga TSR.



Fuente. El Autor.

Figura 17 Falla de probetas TSR



Fuente. El Autor.

6.1.3. Caracterización de las mezclas asfálticas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste.

Para el ensayo de desgaste, se usaron dos cuerpos de prueba por contenido de polisombra, con un total de 10 cuerpos de prueba, la preparación de las probetas se efectuó en las condiciones dadas por el ensayo INV-E.748, con variación en el número de golpes a 50 por cara y siguiendo las indicaciones registradas en el capítulo 5.10. La lectura de los resultados se encuentra consignada en las tablas 28-32. Se tomaron lecturas de pérdida de carga cada 50 vueltas, registrando la pérdida en intervalos de 50, hasta llegar al número indicado por la especificación de 300 vueltas.

Figura 18 Preparación cuerpos de prueba



Fuente. El Autor.

Figura 19 Maquina de los angeles y cuerpo de prueba convencional



Fuente. El Autor.

Figura 20 Cuerpo de prueba 0.5% y 1.0% posterior a ensayo de desgaste.



Fuente. El Autor.

Figura 21 Cuerpo de prueba 1.5% y 2.0% posterior a ensayo de desgaste.



Fuente. El Autor.

7. ANALISIS DE RESULTADO

7.1. Ensayo Marshall

7.1.1. Resultados contenido óptimo de asfalto MDC 19 control.

Al evaluar los resultados obtenidos en el ensayo inicial de Marshall (Véase tabla 8) para el cálculo del contenido de asfalto óptimo de la mezcla de control, se observa que el valor máximo de estabilidad se encuentra dado por el contenido de 5% de asfalto (véase figura 22). Por otra parte, el contenido de asfalto de 4.5% presento mayor rigidez expresado por la relación estabilidad flujo (E/F).

Tabla 8 Tabla resumen ensayo de contenido óptimo de asfalto.

CA 60-70 (4.5%-6%)				
% Asfalto	Estabilidad (KN)	Flujo (mm)	E/F (KN/mm)	Vacíos
4.5	11.68	2.27	5.14	2.39
5	13.74	2.95	4.66	2.38
5.5	12.67	3.31	3.83	2.36
6	12.18	2.71	4.50	2.34

Fuente. El Autor.

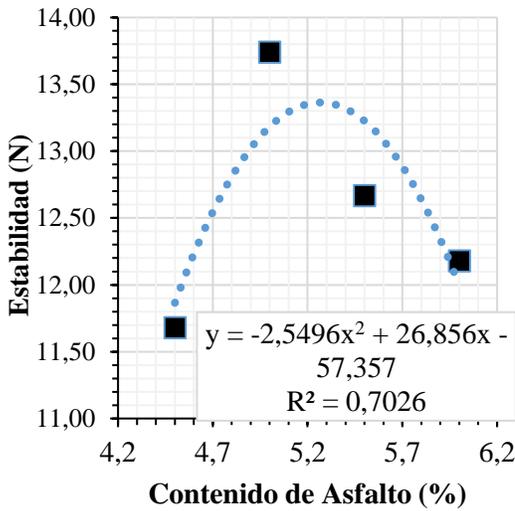
Con el fin de verificar que la mezcla de control cumpla con los requisitos mínimos de las especificaciones generales para la construcción de carreteras para capa de rodadura para un nivel de transito elevado (NT3), se realizó la comparación de los criterios preliminares para el diseño de mezcla densa en caliente, asumiendo un contenido óptimo de 5%según la normativa INVIAS (2013). (Véase tabla 9).

Tabla 9 Verificación de criterios por el método Marshall, asfalto convencional optimo 5%.

CARACTERÍSTICA	CRITERIO NT3	VALORES ENSAYO	CONDICIÓN
COMPACTACIÓN (golpes/cara)	75	75	CUMPLE
ESTABILIDAD MÍNIMA (N)	9000	13740	CUMPLE
FLUJO (mm)	2.0 a 3.5	2.95	CUMPLE
RELACIÓN ESTABILIDAD/FLUJO (KN/mm)	3.0 a 6.0	4.66	CUMPLE

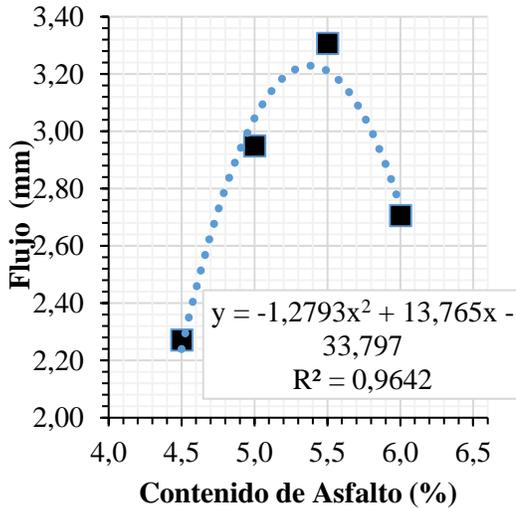
Fuente. Instituto nacional de vías - Invías. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Tabla 450-10. Bogotá: Invías, 2013. p. 450-10.

Figura 22 Estabilidad Vs % Asfalto Convencional



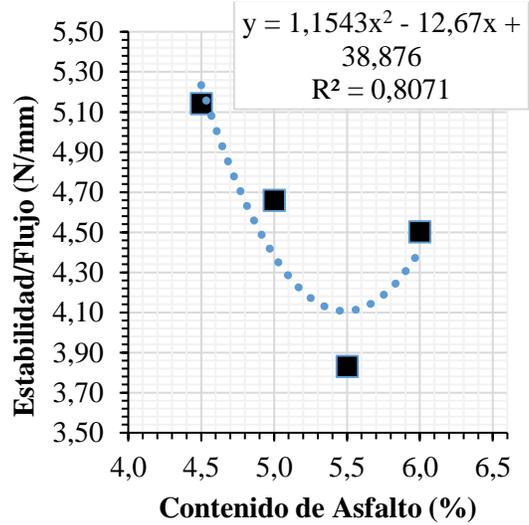
Fuente. El Autor.

Figura 23 Flujo Vs % Asfalto Convencional



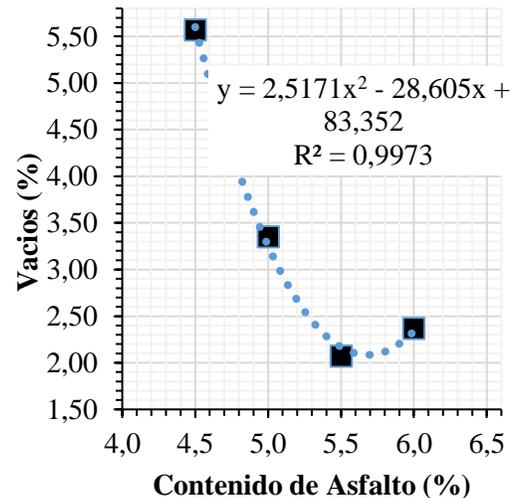
Fuente. El Autor.

Figura 24 Relación E/F Vs % Asfalto Convencional



Fuente. El Autor.

Figura 25 Vacíos Vs % Asfalto Convencional



Fuente. El Autor.

Los resultados obtenidos en la mezcla convencional con un contenido óptimo de 5%, arrojan un resultado aceptable frente a los valores exigidos por las especificaciones INVIAS, cumpliendo con los rangos de estabilidad, flujo y estabilidad y flujo, comparando con la exigencia para nivel de tráfico 3, con lo que se puede ver la calidad del agregado y el cemento asfáltico usado. Teniendo como base estas informaciones, fue posible adicionar el polipropileno dentro de la mezcla asfáltica.

En las figuras 22 a 25 son presentados los resultados de los parámetros de resistencia Marshall, Estabilidad, Flujo, relación Estabilidad/Flujo respectivamente y volumen de aire para la muestra de control. Según los resultados de los parámetros del ensayo Marshall, se observa: (I) Al adicionar el cemento asfáltico, se reduce el volumen de vacíos de la mezcla asfáltica. (II) El aumento de la Estabilidad Marshall puede estar ligada al volumen de aire, es decir, a mayor volumen de aire, menor resistencia Marshall. (III) El flujo Marshall puede estar asociado al contenido de cemento asfáltico, de esta forma, a mayor contenido de asfalto, mayor flujo para contenidos inferiores a 5.5%. (IV) La rigidez, expresada por la relación Estabilidad/Flujo indica que la mezcla asfáltica es más rígida para contenidos de asfalto bajos, para contenidos inferiores de 5.5% de asfalto.

7.1.2. Resultados mezcla asfáltica MDC 19 con 5% de cemento asfáltico y adición de polipropileno en forma de polisombra.

Después del análisis del diseño Marshall de la mezcla asfáltica convencional, se procedió a incorporar polipropileno en tiras de polisombra, en porcentajes del 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0% respecto al peso total de la mezcla asfáltica. Las Tablas 10 a 11 indican los resultados obtenidos de parámetros Marshall para la mezcla de control y las mezclas con adición de polisombra, así como también el comparativo de los parámetros según la normativa del INVÍAS 2013.

Tabla 10 Tabla resumen resultados modificación con polisombra

% Polisombra	Estabilidad (KN)	Flujo (mm)	E/F (KN/mm)	Vacíos
0	13.74	3.01	4.59	2.38
0.5	12.63	6.20	2.08	5.75
1	9.77	8.27	1.20	8.47
1.5	10.73	9.06	1.19	10.57
2	12.30	17.42	0.71	15.42

Fuente. El Autor.

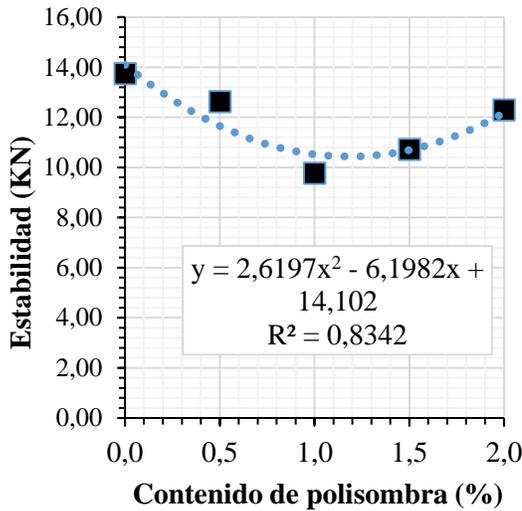
Tabla 11 Verificación de criterios por el método Marshall, asfalto modificado 0.5% de polisombra.

CARACTERÍSTICA	CRITERIO NT3	VALORES ENSAYO	CONDICIÓN
COMPACTACIÓN (golpes/cara)	75	75	CUMPLE
ESTABILIDAD MÍNIMA (N)	9000	12630	CUMPLE
FLUJO (mm)	2.0 a 3.5	6.20	NO CUMPLE
RELACIÓN ESTABILIDAD/FLUJO (KN/mm)	3.0 a 6.0	2.08	NO CUMPLE

Fuente. Instituto nacional de vías - Invías. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Tabla 450-10. Bogotá: Invías, 2013. p. 450-10.

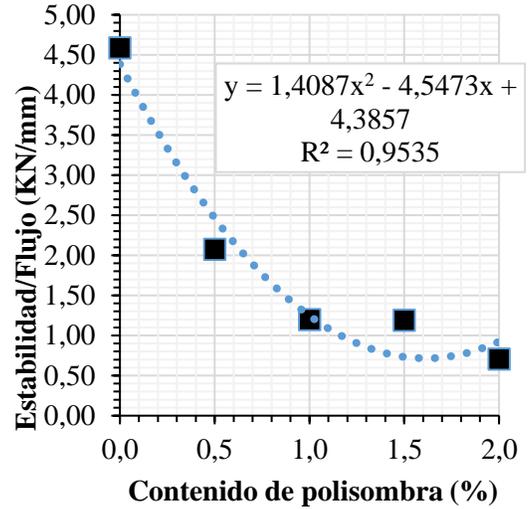
Para mayor comprensión de los resultados, los resultados presentados en Tablas 10 y 11 son presentados de forma gráfica en las Figuras 26 a 30.

Figura 26 Estabilidad Vs Contenido de Polisombra



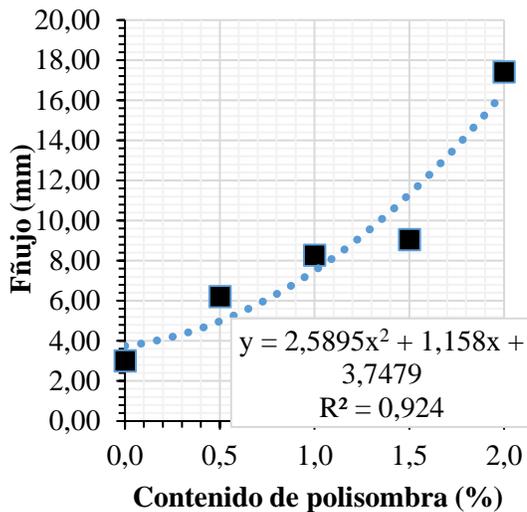
Fuente. El Autor.

Figura 28 Relación E/F Vs Contenido de Polisombra



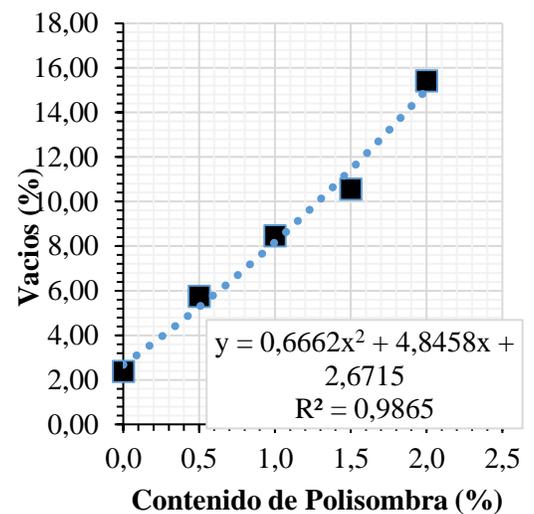
Fuente. El Autor.

Figura 27 Flujo Vs Contenido de Polisombra



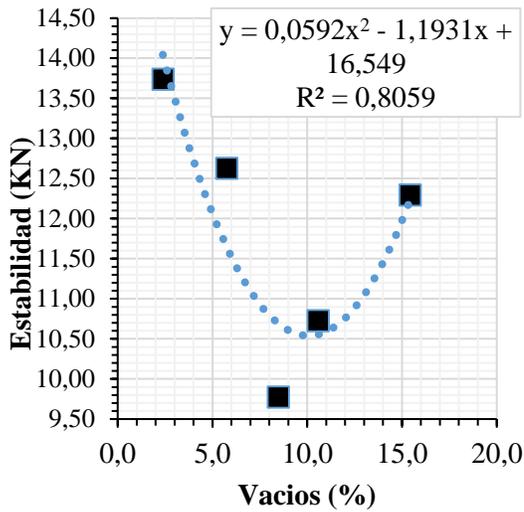
Fuente. El Autor.

Figura 29 Vacíos Vs % Contenido de Polisombra



Fuente. El Autor.

Figura 30 Estabilidad Vs Vacíos



Fuente. El Autor.

Según los resultados anteriormente presentados, se puede concluir: (I) La Estabilidad Marshall disminuye de forma proporcional en función del contenido de polisombra para contenidos de polisombra hasta de 1.5%. Para la mezcla con 2% se observa una salida de la tendencia anteriormente descrita. (II) El valor del Flujo, entendido como la deformabilidad del material, aumenta de forma proporcional al aumento de polisombra. En este sentido, las fibras de polisombra pueden actuar como un elemento que permite mayores niveles de deformabilidad ante la acción de la carga monotónica. (III) Existe una reducción de la rigidez (Estabilidad/Flujo) de las mezclas asfálticas en función.

De forma general, la adición de la polisombra tiene una tendencia de disminución en la estabilidad hasta el 1% y aumento a mayor contenido de polisombra, generando una capacidad de resistir cargas después de su rotura inicial a diferencia del asfalto convencional. La mezcla convencional arroja un valor máximo de carga y flujo en un corto instante, por el contrario, la mezcla modificada con el 2% de polisombra, tiene un valor elevado de flujo con 15,42mm, pero resistiendo carga después de que la probeta ya había fallado, debido a que la polisombra generaba resistencia en la mezcla para que siguiera soportando carga. (Ver vídeo; [MDC 19, CA 5%, Adición Polisombra 2%](#). [MDC 19, CA 5%, Convencional.](#))

La adición de la polisombra en la mezcla asfáltica produce un alto porcentaje de vacíos 15.42% (Véase figura 29), lo que produce mayor saturación de agua después de transcurrido los 30 minutos sumergida en el baño maría, tiempo previo a ser sometida a carga, mostrando una capacidad mayor de resistir cargas con presencia de agua en la mezcla (Véase figura 24). En la mezcla convencional (Véase figura 20), el aumento del contenido de asfalto producía la disminución de los vacíos, pero la disminución de la estabilidad.

La estabilidad genera en la mezcla asfáltica, un comportamiento más consistente y que disminuya los espacios entre el agregado, haciendo que la mezcla se desplace menos, pero a la vez sea dúctil, aumentando la resistencia al ser sometida a las cargas de los vehículos, siendo estas reiterativas sobre el mismo punto del pavimento, por lo que la mezcla asfáltica debe tener la capacidad recuperarse después de la carga.

La polisombra al adicionar al pavimento una ductilidad mayor, se puede usar para zonas en donde por dificultad en el acceso, dificultad para encontrar asfalto o altos costos del asfalto, se requiera una vida útil de proyecto amplia, ya que puede ofrecer que a pesar de que la mezcla asfáltica empiece a fallar, pueda alargar la resistencia sin romperse totalmente, previendo una capa de rodadura aceptable a pesar de que no se encuentre en un perfecto estado.

7.2. Relación del ensayo de tracción Indirecta en condiciones húmeda y seca.

El ensayo de resistencia a tracción se realizó para mezclas asfálticas con contenido del 5% de cemento asfáltico en todos los cuerpos de prueba y posterior se adiciono la polisombra para analizar los resultados de la modificación. Las Tablas 12 y 13 presentan los resultados de resistencia a la tracción en seco (grupo 1) y húmedo (grupo 2), así como también la relación entre la resistencia a tracción en húmedo y seco. Para mejor visualización, son presentados los resultados en las Figuras 31 a 35.

Tabla 12 Resultados TSR Asfalto convencional y modificado.

Contenido de polisombra	# golpes	% vacíos	Resistencia a la tracción (KPa)		Relación resistencia a tracción (%)
			Grupo 1	Grupo 2	
0%	25	6.6	982.3	811	83%
0.5%	35	7.2	539.2	456	85%
1.0%	45	7.3	485.5	410.5	85%
1.5%	55	7.5	604.5	450.1	74%
2.0%	65	7.7	484.1	344.6	71%

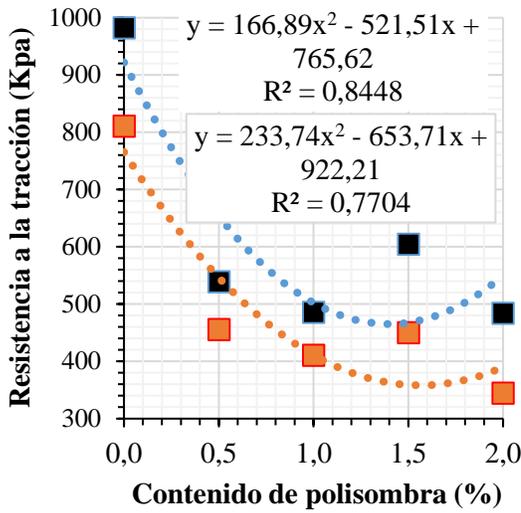
Fuente. El Autor.

Tabla 13 Verificación del diseño Marshall, Contenido de polipropileno.

PROPIEDAD	VALOR	0%	0.5%	1.0%	CONDICIÓN
Adherencia: Resistencia retenida, % mínimo.	80	83	85	85%	CUMPLE

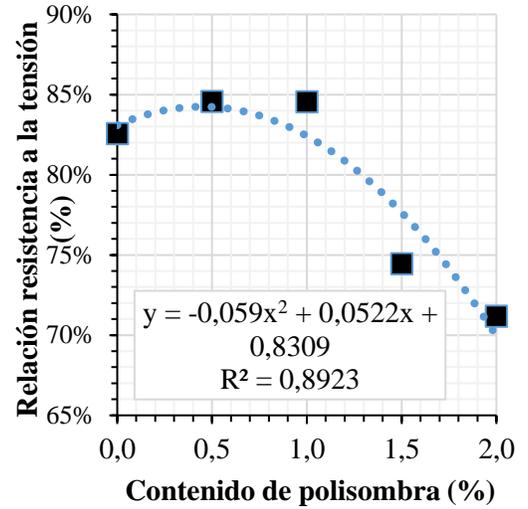
Fuente. Instituto nacional de vías - Invías. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Tabla 450-11. Bogotá: Invías, 2013. p. 450-10.

Figura 31 Resistencia a la tracción Vs Contenido de polisombra



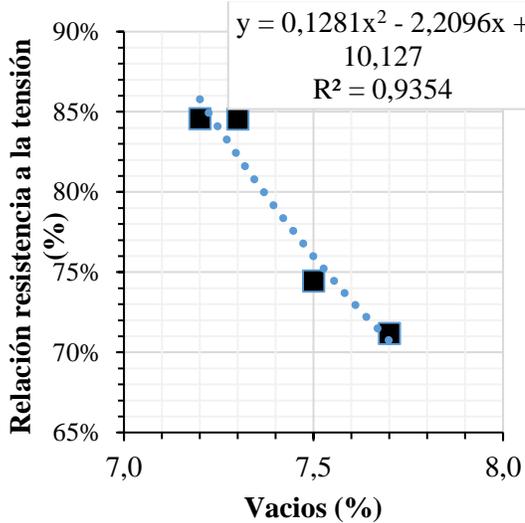
Fuente. El Autor.

Figura 32 Relación resistencia a la tensión Vs Contenido de polisombra



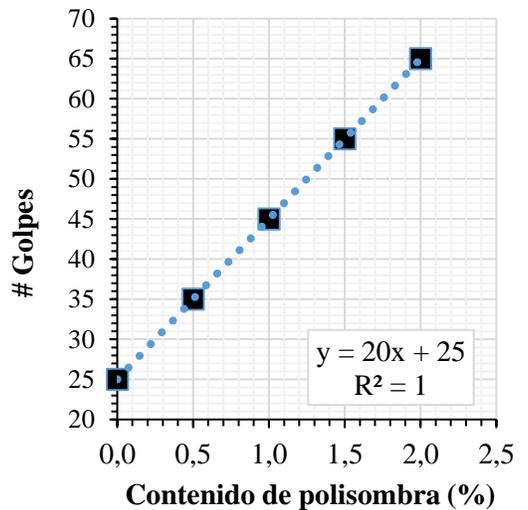
Fuente. El Autor.

Figura 33 Relación resistencia a la tensión Vs Vacíos



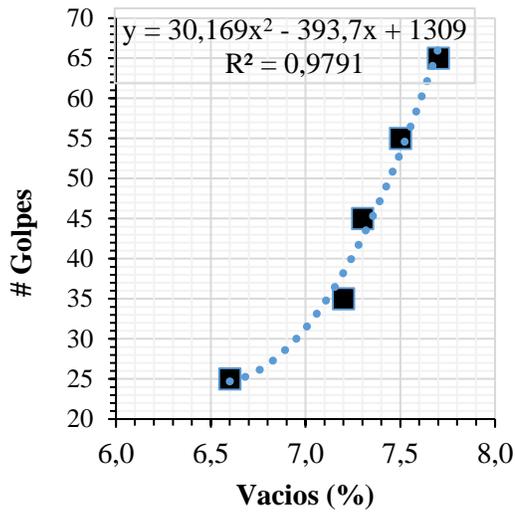
Fuente. El Autor.

Figura 34 # Golpes Vs Contenido de Polisombra



Fuente. El Autor.

Figura 35 # Golpes Vs Vacíos



Fuente. El Autor.

A partir de los resultados obtenidos, se puede observar: (I) Reducción de la resistencia a la tracción en condiciones seco y húmedo respectivamente, en función del aumento del contenido de polipropileno en la mezcla asfáltica. (II) Para las mezclas asfálticas con adición de 0.5% y 1.0% de polipropileno en forma de polisombra, se puede observar un aumento en la relación de la resistencia a la tracción. Dicho aumento, es considerado un indicativo de la adherencia, pudiendo aumentar la cohesión y consecuentemente la durabilidad de la mezcla asfáltica. En el caso de las mezclas asfálticas con adición de 1,5% y 2.0 % de polipropileno en forma de polisombra, se puede observar una disminución de la adherencia, expresada por la relación de resistencia a tracción en húmedo y seco, probablemente por el aumento del volumen de aire. Es decir, a mayor cantidad de volumen de aire, menor adherencia en la mezcla asfáltica.

El contenido de vacío en la mezcla siempre aumenta, aun cuando el número de golpes sea mayor en cada grupo de prueba, evidenciando la disminución en el acondicionamiento del agregado, el ligante y el modificador, siendo inversamente proporcional al contenido de polisombra.

7.3. Desgaste a la abrasión por Cántabro.

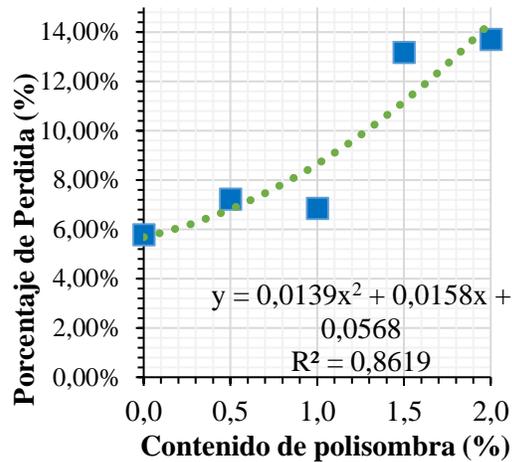
La Tabla 14 y Figuras 36 a 37 presentan los resultados del desgaste a la abrasión cántabro para la mezcla convencional y las modificadas con adición de polipropileno en forma de polisombra. La Tabla 14 indica el porcentaje de desgaste a la abrasión, determinado a 50, 100, 150, 200, 250 y 300 vueltas en la máquina de los Ángeles.

Tabla 14 Resumen ensayo de cántabro perdida por desgaste.

Contenido de Polisombra	Porcentaje de perdida / # de Vueltas					
	50	100	150	200	250	300
0	0.89%	1.81%	2.96%	4.04%	4.95%	5.78%
0.5	0.49%	1.37%	2.73%	4.11%	6.51%	7.23%
1	1.49%	2.68%	3.86%	4.90%	6.13%	6.85%
1.5	1.94%	5.43%	6.98%	9.95%	11.54%	13.17%
2	2.24%	3.61%	7.24%	9.64%	11.23%	13.71%

Fuente. El Autor.

Figura 36 Porcentaje de perdida a 300 vueltas Vs Contenido de polisombra

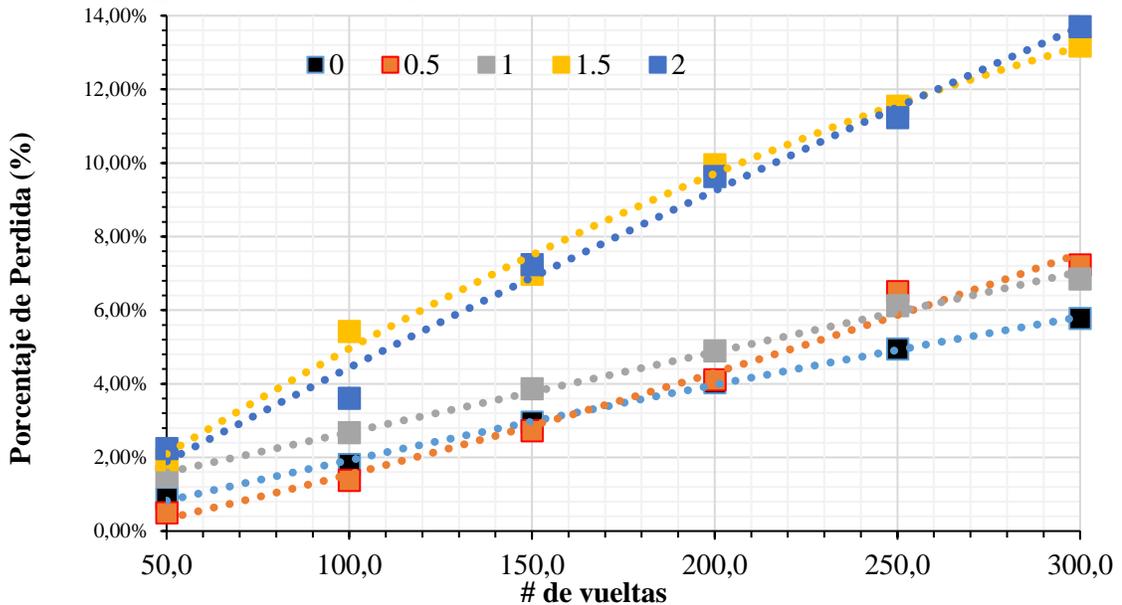


Fuente. El Autor.

De forma general, se observa tendencia al aumento del porcentaje de perdida de desgaste, en función del contenido de polisombra. Sin embargo, se puede destacar que las mezclas asfálticas con adición de 1.0% de polisombra presenta un valor cercano a la muestra de referencia, deduciendo que el contenido óptimo de polisombra es 1.0%.

El cuerpo de prueba con 0.5% de polisombra, en las primeras 150 vueltas, presento una perdida menor que la mezcla convencional, con lo que se puede presentar un desgaste menor hasta el momento en que empezó a quedar expuesta la polisombra, lo cual pueda generar, por ejemplo, en la capa de rodadura un aumento en la adherencia inicial de la mezcla mejorando su condición en los primeros años de uso.

Figura 37 Porcentaje de perdida Vs Contenido de polisombra



Fuente. El Autor.

Al evaluar la figura 37, se puede evidenciar que el contenido óptimo de polisombra es el 0.5% a pesar que al terminar el ensayo el porcentaje de perdida más bajo sea el 1%, ya que presento mejor comportamiento a lo largo del ensayo de desgaste, teniendo en cuenta que una mezcla asfáltica, tiende a deteriorarse a mayor velocidad, una vez presenta la primera fractura o evidencia importante de daño, con lo que la adición de la polisombra produce una mejor adherencia en el inicio del desgaste, con lo que una vez en servicio, puedo mejorar en años su condición.

Los valores de 1.5% y 2%, muestra un comportamiento mayor de desgaste, dado que el contenido de modificador produce un contenido alto de vacíos, evidenciado en todos los ensayos realizados, generando que el agregado se desprenda, debido a que la polisombra se va a encontrar superficial en el cuerpo de prueba una vez iniciado el desgaste, trasladando el esfuerzo a la parte interna de la mezcla por las tiras expuestas y produciendo la perdida acelerada del material granular.

8. CONCLUSIONES

- La carga monotónica ejercida al material, produce una tendencia no del todo negativa, ya que se puede observar la mejora en sus condiciones de adherencia, mostrando un resultado óptimo con el 0.5%.
- La modificación con polipropileno en forma de polisombra, puede tener buenos resultados al ser implementado, en sectores donde la presencia continua de humedad produzca un daño prematuro de las mezclas asfálticas, debido a que, la mezcla tuvo mayor saturación en todos los ensayos, por su alto contenido de vacíos y mejoro los valores de adherencia en las mezclas con adición de 0,5% y 1.0%.
- Las mezclas asfálticas con cemento asfáltico convencional, una vez se presenta la falla o fisuración inicial, pierde la capacidad de resistir carga. Al adicionar 0,5% o 1.0% de polipropileno como modificador de la mezcla asfáltica, genera aumento de la resistencia a carga aun después de fallar, aportando a la mezcla un comportamiento más dúctil.
- El manejo y reacción del modificador con el asfalto convencional, son el primer punto positivo en el buen resultado obtenido en las propiedades mecánicas de la mezcla.
- El uso de polipropileno en forma de polisombra, puede generar un impacto positivo ambientalmente, con el reciclaje de la polisombra para ser usados en mezclas asfálticas, siendo un material usado en floricultura, industria agrícola y construcción, lo que mejora su capacidad de obtención en diferentes zonas del país. Así como también, permite desarrollar prácticas de la ingeniería civil sustentable.

9. RECOMENDACIONES

- Se recomienda evaluar con otros ensayos las probetas para lograr validar si hay mejora en la mezcla bajo otras condiciones de esfuerzo e impacto ambiental.
- Continuar investigación con rangos cercanos a 0.5%, disminuyendo los rangos de iteración en +/- 0.1% del valor inicial y reducir la longitud de las fibras.
- Comparar el comportamiento de la mezcla asfáltica modificada por vía seca y húmeda.
- Tener especial cuidado en la temperatura de la mezcla convencional al momento de adicionar el polipropileno e igualmente al compactar la mezcla modificada.
- Mantener los rangos del agregado pétreo dentro de los estipulados por el INNVIAS, teniendo en consideración los resultados hallados y la gran importancia del mismo en la calidad del asfalto.
- A fin de reducir el volumen de aire en las mezclas asfálticas con adición de polisombra, es recomendado la utilización de un material filler activo, que produzca el cerramiento de los vacíos de aire y promueva la adherencia entre los materiales.
- Se recomienda la elaboración de ensayos especiales del comportamiento mecánico de la muestra de control y de la muestra con 0.5% de polipropileno en forma de polisombra, tales como: vida a fatiga, creep estático, módulo resiliente, módulo dinámico, entre otros, a fin de analizar el comportamiento del material alternativo ante la sollicitación de cargas dinámicas y estáticas.

BIBLIOGRAFÍA

- Romero Emilio. Residuos de Construcción y Demolición. [En línea] Huelva. [Citado 17 de septiembre 2017] Disponible en internet URL: < <http://www.uhu.es/emilio.romero/docencia/Residuos%20Construccion.pdf> >
- Udlap. Prueba de desempeño para mezclas asfálticas. [En línea] San Andrés Cholula. . [Citado 21 de noviembre 2017] Disponible en internet URL: < http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/caceres_m_ca/capitulo_4.pdf >
- Taha Ahmed. “Using a modified asphalt bond strength test to investigate the properties of asphalt binders with poly ethylene wax-based warm mix asphalt additive”. ScienceDirect. [En línea] 2017. [Citado 11 de septiembre 2017] ISSN 1996-6814.
- White Greg. “State of the art: Asphalt for airport pavement surfacing” ScienceDirect. [En línea] 2017. [Citado 13 de septiembre 2017] ISSN 1996-6814.
- Muhammad Karami. “Laboratory experiment on resilient modulus of BRA modified asphalt mixtures” ScienceDirect. [En línea] 2017. [Citado 13 de septiembre 2017] ISSN 1996-6814.
- Ke Zhong. “Investigation on surface characteristics of epoxy asphalt concrete pavement” ScienceDirect. [En línea] 2017. [Citado 13 de septiembre 2017] ISSN 1996-6814.
- Noferini Luca. “Investigation on performances of asphalt mixtures made with Reclaimed Asphalt Pavement: Effects of interaction between virgin and RAP bitumen”. ScienceDirect. [En línea] 2017. [Citado 13 de septiembre 2017] ISSN 1996-6814.
- Yamping Sheng. “Production and performance of desulfurized rubber asphalt binder” ScienceDirect. [En línea] 2017. [Citado 13 de septiembre 2017] ISSN 1996-6814.
- GUTIERREZ, David Leonardo. Análisis del comportamiento físico- mecánico de la mezcla asfáltica tipo mdc. 19 con adición de polisombra. Bogotá:

Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. Modalidad Trabajo de investigación, 2016.

- RONDON QUINTANA, Hugo Alexander. Pavimentos: Serie Guías: 1 Fundamentos. 1 ed. Bogotá: Stella Valbuena García, 2009. Pag.31.
- RONDON QUINTANA, Hugo Alexander. Pavimentos: Materiales, construcción y diseño. 1 ed. Bogotá: Ecoe
- Aria José Alberto, Agregado de concreto (18 de enero del 2009) [http://elconcreto.blogspot.com.co/search/label/Agregado%20Grueso%20del%20Concreto onstruccion.html](http://elconcreto.blogspot.com.co/search/label/Agregado%20Grueso%20del%20Concreto%20onstruccion.html)
- REPSOL. Físicoquímica del Asfalto [en línea]. Lima: La Empresa [citado 10 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: [https://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios/productos/pre asfaltos/fisicoquímica/com posición/>](https://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios/productos/pre%20asfaltos/fisicoquimica/com%20posicion/)
- GÓMEZ HERNÁNDEZ, Juan Manuel y SOLANO GÓMEZ, Diego Hernán. Determinación del agregado fino (agregado de río o agregado de peña) con mayor adhesividad al ligante asfáltico. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Modalidad Trabajo de Grado, 2016.65 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículo 400. Bogotá: INVIAS, 2013. p.121.
- RONDÓN QUINTANA, Hugo; FERNÁNDEZ GÓMEZ, Wilmar y CASTRO LÓPEZ, William. Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD). En: Revista Ingeniería de Construcción. Marzo – abril, 2010. Vol. 25, no. 1.
- INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras. [En línea]. [Citado Abril 2017] Disponible en: (<https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>) pág. 75, 76, 83.
- RONDÓN, Hugo Alexander; REYES, Fredy Alberto; FIGUEROA, Ana Sofía; RODRÍGUEZ, Edgar y MONTEALEGRE, Tito Alexander. Estado del

conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia. En: Infraestructura Vial. Febrero - marzo, 2012. Vol. 10, no. 19.

- SALINAS RETO, Patricia Inés. Aplicación de micro pavimento usando asfalto modificado con polímero en la vía Sullana -Aguas Verdes. Piura: Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Modalidad trabajo de grado, 2009. 91 p.
- FASCE, Laura A. Comportamiento mecánico de polipropileno modificado con una poliolefina elastomérica. 2002. Tesis Doctoral. Tesis doctoral, INTEMA, UNMdP.
- VALLEJOS, María Evangelina, et al. Aprovechamiento integral del Cannabis sativa como material de refuerzo/carga del polipropileno. Universidad de Girona, 2006.
- PETROQUIM Tecnología y servicio en polipropileno Que es el polipropileno -Disponible en Internet <URL: <http://www.petroquim.cl/que-es-el-polipropileno/>
- SAMANTHA NUÑEZ– PROPIEDADES DEL POLIPROPILENO, 25 DE OCTUBRE DE 2012 Disponible en internet < URL: <https://www.quiminet.com/articulos/propiedades-del-polipropileno-2671066.htm>
- MERE MARCOS JAVIER Estudio del proceso de un polímero termoplástico basado en almidón diciembre 2009
- VÁZQUEZ RUIZ, Idalit. Ventajas y desventajas del uso de polímeros. Veracruz: Universidad Veracruzana. Facultad de Ingeniería. Modalidad Trabajo de Grado, 2010. p. 37
- ARENAS, Hugo. Tecnología del cemento asfáltico. 5 Ed. Fa Editores, 2005. P.304.
- M. KORTSCHOT. Torsional braid analysis of bitumen-liquid rubber mixtures. [En línea]. [Citado octubre 2017].
- P. JEW. Polyethylene-modified bitumen for paving applications. [En línea]. [Citado octubre 2017].

- XIAOHU LU. Modification of road bitumens with thermoplastic polymers. [En línea]. [Citado octubre 2017].
- VV LEONENKO. Some Aspects of Modification of Asphalts with Polymeric Materials. [En línea]. [Citado octubre 2017].
- GORDON AIREY. Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens. [En línea]. [Citado octubre 2017].
- CHANGQING FANG. Modification of asphalt by packaging waste-polyethylene. [En línea]. [Citado octubre 2017].
- CHANGQING FANG. Modification of waterproofing asphalt by PVC packaging waste. [En línea]. [Citado octubre 2017].
- HAINIAN WANG. Laboratory evaluation on high temperature viscosity and low temperature stiffness of asphalt binder with high percent scrap tire rubber. [En línea]. [Citado octubre 2017].
- TANER ALATAS. Effects of different polymers on mechanical properties of bituminous binders and hot mixtures. [En línea]. [Citado octubre 2017].