

**POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD COMO ALTERNATIVA PARA MEJORAR
LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA DENSA EN
CALIENTE MDC-19**

**LUIS FERNANDO COICUE DUARTE
CRISTHIAN CAMILO SEPULVEDA SALAZAR**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2017**

**POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD COMO ALTERNATIVA PARA MEJORAR
LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA DENSA EN
CALIENTE MDC-19**

**LUIS FERNANDO COICUE DUARTE
CRISTHIAN CAMILO SEPULVEDA SALAZAR**

**Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero civil**

**DIRECTOR
JAVIER GARCIA GUERRERO
INGENIERO CIVIL**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2017**



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:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C, 26 de octubre de 2017

DEDICATORIA

A Dios por permitirme realizar este trabajo de grado, dándome fuerza para afrontar los obstáculos presentados a lo largo de este proceso. A mis padres María Enith Duarte y Luis Antonio Coicué, a mis hermanos Kevin Antonio Coicué y Diana Sofía Coicué por creer en mí, apoyándome y ayudando a que mis sueños se hicieran realidad, a mi tía Stella Coicue Rodríguez por brindarme su apoyo y a mi novia Johana Ávila por su amor, paciencia y comprensión.

Luis Fernando Coicue Duarte

Todo esto es posible gracias a la confianza dada por mis familiares y amigos cercanos agradezco mucho el apoyo moral que se me dio en el desarrollo de este proyecto, sin esto hubiera sido difícil afrontar este proceso ya que me colmaron de alegría y compañía en este lapso. Mi madre Norma Salazar es el artífice de que se pudiese lograr esto ya que sin su amor y paciencia no hubiera logrado avanzar de ninguna manera al igual que mi hermano Alexander Sepúlveda y mi primo Alejandro Loaiza que fueron de vital importancia ya que con su voz y apoyo pude tener una visión más clara de las cosas, y sin duda alguna a mi compañero de tesis que fue capaz de emprender este proyecto junto conmigo dando siempre lo mejor de sí

Cristhian Camilo Sepúlveda Salazar

AGRADECIMIENTOS

Es de gran importancia reconocer la ayuda que de una u otra manera se recibió en el transcurso del desarrollo de este proyecto, es por esto que nos gustaría expresar y dar el reconocimiento merecido a todos aquellos que aportaron con su colaboración.

En primer lugar, agradecemos a nuestras familias, las cuales nos brindaron su apoyo incondicional en cada etapa de nuestra formación como Ingenieros Civiles y en nuestra formación como personas, gracias a ellos podemos culminar con nuestros estudios de pregrado y este proyecto de grado, junto con el apoyo que nos brindó la Universidad Católica de Colombia y los catedráticos de esta universidad por quienes hemos llegado a obtener los conocimientos necesarios para poder desarrollar la tesis.

De la misma forma queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a nuestro director de tesis, el Ingeniero Javier García, que gracias a su apoyo y seguimiento fue posible culminar con los objetivos de este proyecto.

Para finalizar, agradecemos al técnico del laboratorio de la universidad Hugo Rondón quien nos colaboró con sus conocimientos en la realización de los ensayos de laboratorio mostrando siempre un carácter incondicional durante la ejecución del proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1. GENERALIDADES	15
2. ANTECEDENTES.....	16
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	24
3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	24
3.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	25
4. OBJETIVOS.....	26
4.1 GENERAL	26
4.2 ESPECÍFICOS.....	26
5. JUSTIFICACIÓN.....	27
6. DELIMITACIÓN	28
6.1 ESPACIO.....	28
6.2 TIEMPO.....	28
6.3 CONTENIDO	28
6.4 ALCANCE.....	28
7. MARCO DE REFERENCIA.....	29
7.1 MARCO TEÓRICO	29
7.2 MARCO HISTÓRICO	33
7.2.1 Historia	33
7.2.2 Últimos avances	34
7.3 MARCO CONCEPTUAL.....	36
7.3.1 Asfalto	36
7.3.2 Cemento asfáltico.....	37
7.3.3 Agregados Pétreos.....	39
7.3.4 Mezcla asfáltica.....	39
7.3.5 Mezcla Asfáltica Densa en Caliente (MDC).....	39
7.3.6 Mezcla densa en caliente tipo MDC-19.....	40
7.3.7 Mezclas asfálticas tibias (MAT)	41
7.3.8 Modificadores	41
7.3.9 Asfalto modificado	41

7.3.10 Asfalto modificado para fabricación de mezclas asfálticas	42
7.3.11 Plastómeros	43
7.3.12 Mezclas asfálticas modificadas	44
7.3.13 Ensayos realizados para caracterizar las mezclas asfálticas	46
7.3.13 Ensayo Marshall	50
7.3.14 Ahuellamiento.....	51
7.3.15 Módulo dinámico	51
7.4 MARCO LEGAL.....	51
7.4.1 Especificaciones INVIAS 2013	51
7.5 ESTADO DEL ARTE	53
8. METODOLOGÍA	58
9. RESULTADOS.....	61
9.1 MEZCLA ASFALTICA CONVENCIONAL MDC-19.....	61
9.2 MEZCLA ASFALTICA MDC-19 MODIFICADA CON PEBD-VÍA HÚMEDA..	67
9.3 MEZCLA ASFALTICA MDC-19 MODIFICADA CON PEBD-VÍA SECA.....	73
9.4 COMPARACIÓN MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA POR VÍA HÚMEDA Y POR VÍA SECA	78
10. ANALISIS Y COMPARACIÓN	82
10.1 PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFALTO CONVENCIONAL.....	82
10.2 DISEÑO DE ASFALTO MODIFICADO POR VÍA HÚMEDA.....	82
10.3 DISEÑO DE ASFALTO MODIFICADO POR VÍA SECA.....	82
10.4 COMPARACIÓN ASFALTO MODIFICADO POR VIA SECA Y ASFALTO MODIFICADO POR VÍA HÚMEDA.....	82
10.5 COMPARACIÓN MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL Y MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA POR VIA SECA.	83
11. CONCLUSIONES	84
RECOMENDACIONES.....	86
BIBLIOGRAFÍA.....	87
ANEXOS.....	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Clasificación de los aditivos y modificados de cementos asfálticos.....	32
Figura 2. Composición del asfalto.....	36
Figura 3. Componentes de una mezcla asfáltica.....	42
Figura 4. Características deseadas en una mezcla asfáltica.....	46
Figura 5. Resultados del ensayo Marshall.....	51
Figura 6. Proceso metodológico empleado para el desarrollo del proyecto.....	60
Figura 7. Porcentaje de asfalto convencional [%] VS Estabilidad [kg].....	64
Figura 8. Porcentaje de asfalto convencional [%] VS Flujo [mm].....	65
Figura 9. Porcentaje de asfalto convencional [%] VS E/F [kg/mm].....	65
Figura 10. Porcentaje de asfalto convencional [%] VS Densidad Bulk [gr/cm ³]	66
Figura 11. Porcentaje de asfalto convencional [%] VS Vacíos [%].....	66
Figura 12. Porcentaje de asfalto convencional [%] VS Vacíos en AP [%].....	67
Figura 13. Porcentaje de Polietileno de baja densidad [%] VS Estabilidad [kg].....	70
Figura 14. Porcentaje de Polietileno de baja densidad [%] VS Flujo [mm].....	70
Figura 15. Porcentaje de Polietileno de baja densidad [%] VS E/F [kg/mm].....	71
Figura 16. Porcentaje de PEBD [%] VS Densidad Bulk [gr/cm ³].....	71
Figura 17. Porcentaje de PEBD [%] VS Vacíos [%].....	72
Figura 18. Porcentaje de PEBD [%] VS Vacíos AP [%].....	72
Figura 19. Porcentaje de PEBD [%] VS Estabilidad [kg].....	75
Figura 20. Porcentaje de PEBD [%] VS Flujo [mm].....	76
Figura 21. Porcentaje de PEBD [%] VS E/F [kg/mm].....	76
Figura 22. Porcentaje de PEBD [%] VS Densidad Bulk [gr/cm ³].....	77
Figura 23. Porcentaje de PEBD [%] VS Vacíos [%].....	77
Figura 24. Porcentaje de PEBD [%] VS Vacíos en AP [%].....	78
Figura 25. Porcentaje de PEBD [%] VS Estabilidad [kg], húmeda y seca.....	79
Figura 26. Porcentaje de PEBD [%] VS Flujo [mm], vía húmeda y vía seca.....	79
Figura 27. Porcentaje de PEBD [%] VS E/F [kg/mm], vía húmeda y vía seca.....	80
Figura 28. Porcentaje de PEBD [%] VS Densidad Bulk [gr/cm ³], húmeda y seca.....	80
Figura 29. Porcentaje de PEBD [%] VS Vacíos [%], vía húmeda y vía seca.....	81
Figura 30. Porcentaje de PEBD [%] VS Vacíos en AP [%], húmeda y seca.....	81

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones del cemento asfáltico.....	38
Tabla 2. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua.	40
Tabla 3. Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall.	41
Tabla 5. Ensayos de laboratorio sobre los componentes de las mezclas asfálticas (agregados pétreos).....	47
Tabla 6. Ensayos de laboratorio sobre los componentes de las mezclas asfálticas (cemento asfáltico).....	49
Tabla 7. Caracterización de agregados pétreos	58
Tabla 8. Caracterización del cemento asfáltico	59
Tabla 9. Diseño Marshall CA 60-70 (4.5%).....	61
Tabla 10. Diseño Marshall CA 60-70 (5.0%).....	61
Tabla 11. Diseño Marshall CA 60-70 (5.5%).....	62
Tabla 12. Diseño Marshall CA 60-70 (6.0%).....	62
Tabla 13. Resumen promedio y corregido del ensayo Marshall	63
Tabla 14. Densidad Bulk, porcentaje de vacíos y vacíos en AP	63
Tabla 15. Diseño Marshall CA 60-70 (5.0%), Modificado con PEBD al 0.5%	68
Tabla 16. Diseño Marshall CA 60-70 (5.0%), Modificado con PEBD al 1.0%	68
Tabla 17. Diseño Marshall CA 60-70 (5.0%), Modificado con PEBD al 1.5%	68
Tabla 18. Diseño Marshall CA 60-70 (5.0%), Modificado con PEBD al 2.0%	69
Tabla 19. Resumen promedio y corregido del ensayo Marshall-Vía húmeda	69
Tabla 20. Densidad Bulk, porcentaje de vacíos y vacíos en AP-Vía húmeda.....	69
Tabla 21. Diseño Marshall CA 60-70 (5.0%), Modificado con PEBD al 0.5%	73
Tabla 22. Diseño Marshall CA 60-70 (5.0%), Modificado con PEBD al 1.0%	73
Tabla 23. Diseño Marshall CA 60-70 (5.0%), Modificado con PEBD al 1.5%	74
Tabla 24. Diseño Marshall CA 60-70 (5.0%), Modificado con PEBD al 2.0%	74
Tabla 25. Resumen promedio y corregido del ensayo Marshall-Vía seca	74
Tabla 26. Densidad Bulk, porcentaje de vacíos y vacíos en AP-Vía seca	75

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. ENSAYO MARSHALL CONVENCIONAL MDC-19 (1).....	93
ANEXO 2. ENSAYO MARSHALL CONVENCIONAL MDC-19 (2).....	94
ANEXO 3. MEZCLA MODIFICADA POR VÍA HÚMEDA (1).....	95
ANEXO 4. MEZCLA MODIFICADA POR VÍA HÚMEDA (2).....	96
ANEXO 5. MEZCLA MODIFICADA POR VÍA SECA (1).....	97
ANEXO 6. MEZCLA MODIFICADA POR VÍA SECA (2).....	98
ANEXO 7. DUCTILIDAD DE MATERIALES ASFALTICOS.....	99
ANEXO 8. GRAVEDAD ESPECIFICA DE MATERIALES ASFALTICOS (1).....	100
ANEXO 9. GRAVEDAD ESPECIFICA DE MATERIALES ASFALTICOS (2).....	101
ANEXO 10. PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS AGREGADOS.....	102
ANEXO 11. ENSAYO AGREGADOS PETREOS EQUIVALENTE DE ARENA ...	103
ANEXO 12. INDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO AGREGADOS..	104
ANEXO 13. GRANULOMETRIA DE AGREGADOS PETREOS INVIAS-E 213-214	105
ANEXO 14. GRANULOMETRIA DE AGREGADOS PETREOS INVIAS-E 213-214	106
ANEXO 15. GRANULOMETRIA DE AGREGADOS PETREOS INVIAS-E 213-214	107
ANEXO 16. GRANULOMETRIA DE AGREGADOS PETREOS INVIAS-E 213-214	108
ANEXO 17. DENSIDAD Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO.....	109
ANEXO 18. ENSAYO DE AGREGADOS PETREOS FINOS AZUL DE METILENO	110
ANEXO 19. ABRASION EN LA MAQUINA MICRODEVAL.....	111
ANEXO 20. DENSIDAD Y ABSORCIÓN DE AGREGADO FINO.....	112
ANEXO 21. ABRASIÓN EN LA MAQUINA DE LOS ANGELES.....	113
ANEXO 22. AGREGADOS GRUESOS-PESOS ESPECIFICOS.....	114
ANEXO 23. EVIDENCIA ENSAYO MARSHALL CON POLIETILENO.....	115
ANEXO 24. EVIDENCIA ENSAYO MARSHALL CON POLIETILENO.....	116
ANEXO 25. EVIDENCIA ENSAYO MARSHALL CON POLIETILENO.....	117
ANEXO 26. EVIDENCIA ENSAYO MARSHALL CON POLIETILENO.....	118
ANEXO 27. EVIDENCIA ENSAYO MARSHALL CON POLIETILENO.....	119
ANEXO 28. EVIDENCIA ENSAYO MARSHALL CON POLIETILENO.....	120

GLOSARIO

PAVIMENTO: capa lisa, dura y resistente de asfalto, cemento, madera, adoquín u otros materiales con que se cubre el suelo para que esté firme y llano.

PAVIMENTO FLEXIBLE: es aquel cuya estructura total se flecta o flexiona. Su principal componente es el asfalto, este tipo de pavimento es de amplio uso en zonas de tráfico.

MEZCLA DENSA EN CALIENTE: se fabrican con asfalto a una temperatura elevada, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos.

CARPETA ASFALTICA: es la parte superior del pavimento flexible que proporciona la superficie de rodamiento, es elaborada con material pétreo seleccionado y un producto asfáltico dependiendo del tipo de camino que se va a construir.

FALLAS ESTRUCTURALES: insuficiente estabilidad de las capas del pavimento o de la subrasante (falla por corte, compresión o desplazamiento lateral del material) ya sea por susceptibilidad térmica, ingreso de agua o deficiente calidad de los materiales. Espesores de pavimento insuficientes (infra diseño estructural) para las repeticiones de carga soportadas.

AGRIETAMIENTO: tipo de falla estructural en el pavimento causada por la susceptibilidad del asfalto a temperaturas menores a 10 grados centígrados, en la cual se presenta separación entre las partículas del pavimento, generando grietas sobre la carpeta asfáltica.

AHUELLAMIENTO: tipo de falla estructural en el pavimento causada por la susceptibilidad térmica del asfalto a temperaturas superiores a 60 grados centígrados, en la cual se presentan deformaciones permanentes en la carpeta asfáltica que se transmiten a las capas inferiores del pavimento generando ondulaciones en el pavimento.

ASFALTO: el asfalto es un material bituminoso de color negro, constituido principalmente por asfaltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencias, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales. Al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida.

ASFALTO MODIFICADO: son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto de polímeros, con el fin de modificar sus propiedades físicas y reológicas y mejorar su desempeño. Los polímeros pueden ser diseñados para obtener una amplia gama de propiedades físicas.

MODIFICADORES: se refiere a la utilización de un material diferente a agua, material cementante o agregados para modificar las propiedades del asfalto.

ESTABILIDAD MARSHALL: la estabilidad de una mezcla asfáltica es la carga máxima en Kilogramos que soporta una probeta de 6.35 centímetros de altura y 10.16 centímetros de diámetro cuando se falla a una temperatura específica, cargándola en sentido diametral a una velocidad de 5.08 centímetros/minuto.

FLUJO MARSHALL: resistencia a la deformación plástica de especímenes cilíndricos de mezclas asfálticas para pavimentación, empleando el aparato Marshall. El método es aplicable a mezclas elaboradas con cemento asfáltico y agregados pétreos con tamaño máximo menor o igual a 25.4 milímetros (1 pulgada).

POLIMEROS: son macromoléculas que se forman con la vinculación de otras clases de moléculas denominadas monómeros.

POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD: es un polímero de la familia de los polímeros olefínicos, como el polipropileno y los polietilenos. Es un polímero termoplástico conformado por unidades repetitivas de etileno.

VIA HUMEDA: es un método para adicionar un agente modificador a la mezcla asfáltica, este método se utiliza post-mezclado (Vía Húmeda) para el polímero líquido (se mezcla con el cemento asfáltico y después se mezcla con los agregados).

VIA SECA: es un método para agregar un agente modificador a la mezcla asfáltica, normalmente, se utiliza el método premezclado (Vía Seca) para el polímero sólido (hace parte de los agregados).

ENSAYO MARSHALL: ensayo para determinar valores de estabilidad y deformabilidad de los pavimentos asfálticos, a su vez, es un procedimiento para obtener el contenido de asfalto y diferentes parámetros de calidad de una mezcla bituminosa.

REOLOGÍA: es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir. La reología es una parte de la mecánica de medios continuos.

PROPIEDADES MECÁNICAS: Los materiales tienen diferentes propiedades mecánicas, las cuales están relacionadas con las fuerzas exteriores que se ejercen sobre ellos. Las propiedades mecánicas de los materiales son: Elasticidad, plasticidad, maleabilidad, ductilidad, dureza, tenacidad y fragilidad.

INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería civil y en el área de diseño y pavimentación de vías se están haciendo investigaciones enfocadas a la prolongación de la vida útil del pavimento, explorando alternativas autosostenibles, que involucren el desarrollo de nuevas metodologías en la elaboración de vías, teniendo como componente principal la reutilización de materiales, producto de los residuos generados por el hombre.

La tecnología de los asfaltos y las mezclas asfálticas modificadas ha sido una técnica ampliamente estudiada y utilizada en el mundo. Con la adición de polímeros al asfalto se modifican las propiedades mecánicas, químicas y reológicas de las mezclas asfálticas. Cuando se utiliza esta tecnología se pretende mejorar el comportamiento que experimentan las mezclas tradicionales cuando son sometidas a diferentes condiciones de carga y del medio ambiente.

Rondón¹ menciona que por lo general las propiedades que se intentan mejorar son la rigidez, la resistencia bajo carga monotónica, al ahuellamiento, a fatiga, al envejecimiento, y disminuir la susceptibilidad térmica. Muchas de las investigaciones realizadas en el área de los asfaltos modificados utilizan como agentes modificadores polímeros del tipo plastómeros. Este tipo de aditivos al ser agregados al asfalto mejoran el comportamiento resiliente de las mezclas cuando son solicitadas a ciclos de carga y descarga a altas temperaturas de servicio.

El departamento de Planeación Nacional de Colombia reveló que solo el 20% de las vías se encuentran pavimentadas y en vías terciarias la cifra llega escasamente al 6%. Fuera del ámbito económico esto infiere la necesidad del país de acelerar su desarrollo vial partiendo de las nuevas tecnologías que están siendo estudiadas a nivel mundial en el área de asfaltos modificados. Esto con el fin de prolongar la vida útil del pavimento e implementar prácticas sostenibles con el medio ambiente, por medio del aprovechamiento de residuos generados por el consumo per cápita.

¹ RONDÓN, Hugo; FERNÁNDEZ GÓMEZ, Wilmar; CASTRO LÓPEZ, William. Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa caliente modificada con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD). En: Revista Ingeniería de Construcción. Abril, 2010. Vol. 25 No 1, p. 83

1. GENERALIDADES

De acuerdo a análisis realizados por Rondón², el proyecto de investigación se enfoca en evaluar el comportamiento de una mezcla asfáltica MDC-19 modificada; por medio del ensayo Marshall a diferentes dosificaciones de desecho de polietileno de baja densidad (PEBD) obtenido del reciclaje de bolsas plásticas, que será mezclado con cemento asfáltico (CA) en relaciones de peso (PEBD/CA) del 0.5%, 1.0%, 1.5% y 2.0% a una temperatura de 145+- 5 °C debido a que por encima de la misma el CA experimenta envejecimiento por pérdida de componentes químicos.

Por otra parte, Rojas y Mendivelso³ mencionan que, para la producción de asfaltos convencionales se requiere de energía por el uso de hidrocarburos. Con este proceso de modificación se busca reducir el impacto ambiental, teniendo en cuenta que la utilización de productos provenientes del petróleo ocasiona una huella ambiental considerable, ya que para su colocación es necesario disponerlo en campo a altas temperaturas.

Por consiguiente, hoy en día se busca disminuir dicho impacto por medio de la reutilización de materiales, en este caso polímeros los cuales serán obtenidos del reciclaje de bolsas plásticas. En consecuencia, Flores⁴ indica que con las adiciones de PEBD en el cemento asfáltico se evaluarán las propiedades mecánicas del ligante, para determinar la variación de su estabilidad y fluencia respecto a una mezcla convencional tipo MDC-19.

Adicionalmente se utilizarán dos tipos de métodos para adicionar el polímero a la mezcla, estos fueron estudiados por Shafii y otros⁵ manifestando que normalmente se utiliza el método premezclado (Vía Seca) para el polímero sólido (hace parte de los agregados) y se utiliza el método post-mezclado (Vía Húmeda) para el polímero líquido (se mezcla con el cemento asfáltico y después se mezcla con los agregados), para tal efecto en este trabajo se evaluarán los dos métodos.

² Ibid., 84 p.

³ ROJAS, Camilo y MENDIVELSO, Kevin. Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente tipo MDC-10 modificada con un desecho de polietileno de baja densidad. Bogotá D.C. : Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería civil. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil. 2015. 23 p.

⁴ FLORES, Daniel. Ensayo Marshall. [En línea] Bogotá D.C: SlideShare [Julio 18 de 2017]. Disponible en internet:< <https://es.slideshare.net/HERNIELO/ensayo-marshall>>.

⁵ M. A. Shafii, M. Y. Abdul Rahman and J. Ahmad. Polymer Modified Asphalt Emulsion. Selangor, Malaysia: University Technology MARA. Facultad de ingeniería civil. Trabajo de grado para optar por el título de especialista en pavimentos, 2011. 43 p.

2. ANTECEDENTES

El pavimento se define según la norma española 6.1⁶ como un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración, que han de resistir los esfuerzos que la carga repetida del tránsito le transmite durante el período para el cual fue diseñado. Esta estructura ingenieril se viene utilizando hace varios siglos.

Datos recopilados por la revista cimbra (edición 406)⁷, mencionan que, desde que la humanidad ha tenido la necesidad de transportarse de un lugar a otro, ha sido necesaria la elaboración de caminos resistentes, confortables y rápidos. Se estima que en el 3000 a.c, el Imperio Hilita (en la península de Anatonía) construyó los primeros caminos a suelo firme con rocas, así como también los egipcios hacían caminos alrededor de las pirámides con rocas.

Por otra parte, Alfonso Montejo⁸ en su libro; ingeniería de pavimentos para carretas, comenta que a mediados del siglo XVIII se desarrolla el uso de la cal en países como Inglaterra, a través del trabajo de hombres como el ingeniero John Smeaton, quien construyó el Faro de Eddy Stone, Smeaton, además fue uno de los responsables del cambio vial en la ciudad británica.

Posteriormente, la revista cimbra (edición 406)⁹ señala que, a comienzos del siglo XIX, Inglaterra fue pionera en implementar leyes de pavimentación, con la creación del Comisionado de Pavimentación, dependiente del Parlamento del Reino Unido. Su tarea se remitía al cuidado y mejora de la red vial. No obstante, Europa también se caracteriza por un desarrollo en la construcción de caminos pavimentados. En pueblos como Tressaget (Francia) se observaron los primeros caminos realizados a base de rocas con diámetros entre 600 y 800 milímetros.

Además, Revista cimbra¹⁰ ilustra que, con la llegada de la era Industrial, se explora con mayor cuidado la realización de rutas de pavimento, utilizando adoquines (es una piedra o bloque pequeño labrado de forma rectangular que se utiliza en la construcción de pavimentos). Sin embargo, la aparición del automóvil fomenta la diagramación de caminos más extensos y aptos para el traslado de vehículos de peso.

⁶ RAMOS, Rubén. Las carreteras y sus firmes. *En*: Cimbra. Agosto, 2010. Vol. 6, no. 382, p. 42.

⁷ RAMA LABRADOR, Francisco. Las carreteras y sus firmes. *En*: Cimbra. Julio, 2016. Vol. 6, no. 406, p. 21.

⁸ MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras. 2 ed. Bogotá, Colombia; Universidad Católica de Colombia Ediciones y Publicaciones, 2002. 8 p. ISBN: 95896036-2-9

⁹ RAMOS, Rubén, *Óp. Cit.*, p. 22.

¹⁰ *Ibid.*, 23 p.

Por esta razón, Ricardo Ochoa¹¹, manifiesta que, el alquitrán (sustancia densa y pegajosa, de color oscuro y olor fuerte, que se obtiene por destilación del carbón y la madera) se empieza a utilizar para la pavimentación de calles en Londres y Madrid.

Pero Fernando Sánchez¹² en su libro ingeniería de suelos en vías terrestres infiere que, los grandes avances en la materia se dan durante el siglo XX en los Estados Unidos, a través de la fabricación de nuevas capas elaboradas con asfalto (también denominado betún, es un material viscoso, pegajoso y de color gris oscuro, obtenido de la destilación del petróleo), que permiten una mayor flexibilidad en el desplazamiento de los autos.

A su vez estas estructuras civiles se pueden clasificar según Alfonso Montejo¹³ en: pavimentos flexibles, pavimentos semi-rígidos o semi-flexibles, pavimentos rígidos y pavimentos articulados. Asimismo, Papagiannakis¹⁴ define en su libro (Pavement design and materials) que los pavimentos flexibles consisten en colocar una mezcla de emulsión asfáltica con agregados pétreos sobre capas granulares de base y subbase, soportadas por el suelo compactado, conocido como la subrasante.

También, Alfonso Rico¹⁵ explica que la parte del pavimento flexible que recibe las cargas directamente es la carpeta asfáltica: esta es la parte superior del pavimento flexible que proporciona la superficie de rodamiento, segura y confortable. La carpeta asfáltica es elaborada con material pétreo seleccionado y un producto asfáltico dependiendo del tipo de camino que se va a construir.

De igual forma Alfonso Rico¹⁶ añade que estas carpetas se clasifican según su proceso de elaboración en mezcla densas en caliente o mezclas densas en frío; las primeras se realizan en plantas industriales a altas temperaturas (de 140° C a 160° C.) con tránsito de hasta 2000 vehículos, las segundas se realizan en sitio con temperaturas ambientales (15°C a 25°C) y están diseñados para soportar volúmenes de carga moderado y bajo.

¹¹ OCHOA DIAZ, Ricardo. Diseño de mezclas bituminosas para pavimentos con alquitrán, usando metodología Marshall y Ramcode. Colombia, Bogotá D.C: Universidad pedagógica de Colombia. Facultad de ingeniería. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil, 12 p.

¹² SANCHEZ SABOGAL, Fernando. Ingeniería de pavimentos en vías terrestres 2 ed. Vol. 2. Bogotá, Colombia: Editorial Limusa. 1977, 9 p. ISBN: 5675-909884-0098

¹³ MONTEJO FONSECA, Óp. Cit., p. 11.

¹⁴ A.T. Papagiannakis y E.A. Masad. Pavement design and materials. 2 ed. Texas, Estados Unidos.: John Wilwy & Sons, 2017. 11 p. ISBN 978-0-471-21461-8.

¹⁵ RICO RODRIGUEZ, Alfonso. Pavimentos flexibles, problemática, metodologías de diseño y tendencias. En: Instituto Mexicano de transporte. Enero, 1995. Vol. 2, no. 104, p. 32.

¹⁶ *Ibid.*, 33 p.

Adicionalmente y complementando lo explicado por Alfonso Rico, Ocelic y Rek¹⁷ mencionan que la carpeta asfáltica además de ofrecer seguridad y comodidad deben soportar cambios de temperatura en el rango de 20°C a 80°C, proporcionar resistencia a altas temperaturas, entre 80°C y 100°C, esto con el fin de evitar la aparición de deformaciones permanentes. Al mismo tiempo debe resistir cargas vehiculares a bajas temperaturas, entre 0°C y 20°C sin agrietarse.

Por otro lado, Rondón¹⁸ encontró que los pavimentos flexibles, principalmente una mezcla densa en caliente, la cual en su proceso de producción demandan energía al requerir altas temperaturas, entre 150°C y 180°C. Por consiguiente, Camargo¹⁹ asegura que esto genera agentes contaminantes ocasionando gases como dióxido de carbono (CO₂), Dióxido de nitrógeno (NO₂) y Dióxido de azufre (SO₂), que contribuyen al deterioro de la capa de ozono y aceleran el calentamiento global.

Del mismo modo, Wahr y Montenegro²⁰ expresarán que un pavimento flexible presenta dos problemas causados por la temperatura de servicio, es decir la sensación térmica del pavimento a temperaturas ambientales extremas, por ejemplo hay lugares como Puerto Carreño, donde la sensación térmica presente en el pavimento, en el día puede llegar a 80° C y en la noche puede descender hasta los 10° C, estos cambios abruptos de temperatura generan en la carpeta asfáltica fallas estructurales llamadas agrietamiento por contracción y ahuellamiento por dilatación.

En efecto, Ricardo Miranda²¹ ostenta que el agrietamiento es causado por la contracción de la carpeta asfáltica originado por la rigidización de esta o por pérdida de flexibilidad debido al envejecimiento del asfalto, esto ocurre ante bajas temperaturas o gradientes térmicos altos (generalmente superiores a 30° C). De manera análoga el ahuellamiento ocurre debido a una deformación permanente de alguna de las capas del pavimento. La deformación plástica de la mezcla asfáltica tiende a aumentar si está expuesto a altas temperaturas (entre 30°C y 80° C).

En este orden de ideas, a causa de los problemas de variabilidad climática causados por el uso de mezclas densas en calientes y las fallas estructurales generadas al estar sometidas a gradientes de temperaturas altos (superiores a 30° C). Por tal motivo a partir del siglo XXI, el área de ingeniería de pavimentos a nivel mundial se

¹⁷ OCELIC, Vesna y REK, V. Polymer modified bitumen Materials. Croacia: Universidad de Zagreb. Facultad de ingeniería química y tecnología. Tesis para optar por el título de ingeniero civil. 2013, 3 p.

¹⁸ RONDÓN y FERNANDEZ, Óp. Cit., 85 p.

¹⁹ CAMARGO, Hugo y SUAREZ, Andrea. Diagnóstico de las nuevas tecnologías empleadas para el diseño de mezclas asfálticas densas en caliente MDC-2. Bogotá DC: Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de ingeniería. Monografía para optar por el título de especialista en ingeniería de pavimentos, 2010, 18 p.

²⁰ WAHR, Carlos y MONTENEGRO, Chistian. Comparación de diseños de pavimentos flexibles nuevos según el método de diseño AASHTO 93, la Normativa Chilena vigente y la guía de diseño de pavimentos empírico-mecánica. Pavimentos flexibles: En; Infraestructura Vial. Agosto, 2007. Vol. 2, no. 18, p. 32.

²¹ MIRANDA REBOLLEDO, Ricardo Javier. Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la ingeniería. Tesis para optar por el título de ingeniero constructor. 2010. 16 p.

dio la tarea de buscar soluciones a los problemas señalados anteriormente, dentro de estas soluciones se encuentra la inclusión de diferentes aditivos a la mezcla asfáltica (sólidos o líquidos, diferentes al agua).

Por lo tanto surge el concepto suscitado por Alberto Marín²² en investigación realizada en el año 2004, en el cual define un asfalto modificado como una mezcla asfáltica o concreto asfáltico al que se le adiciona un agente que modifica sus características iniciales, las cuales pueden ser entre otras, la viscosidad, dureza, elasticidad y susceptibilidad térmica, logrando facultar al concreto asfáltico con características necesarias para resistir los esfuerzos, agentes climáticos y las condiciones de trabajo que propician su desgaste, el cual puede ser prematuro.

Es así como aparecen los primeros modificadores; látex, hule molido y los polímeros. Estos últimos se pueden definir de acuerdo a los conceptos consignados en el libro ciencia de los polímeros²³ cómo; macromoléculas compuestas por una o varias unidades químicas (monómeros) que se repiten a lo largo de toda una cadena. Por ejemplo; un polímero es como si se uniera con un hilo muchas monedas perforadas por el centro, al final se obtiene una cadena de monedas, en donde las monedas serían los monómeros y la cadena con las monedas sería el polímero.

Al mismo tiempo y con base en el libro; ciencia de los polímeros²⁴; los polímeros se dividen en dos grupos; termoendurecibles y termoplásticos. No obstante, los primeros no se utilizan para modificar asfaltos porque son materiales que, a altas temperaturas, entre 80°C y 110°C se descomponen o degradan sus propiedades. Los termoplásticos, por el contrario, son los utilizados para modificar asfaltos ya que pueden ser sometidos a altas temperaturas, entre 120°C y 150°C sin que se degraden sus propiedades.

Los termoplásticos a su vez se subdividen en dos clasificaciones: elastómeros y plastómeros. Sin embargo, Carreño y Reyes²⁵ en su trabajo de investigación realizado en el año 2015, mencionan que 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).

²² MARIN HERNANDEZ, Alberto. Asfaltos modificados y pruebas de laboratorio para caracterizarlos. México D.F: Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería y Agricultura. Tesis para obtener el título de ingeniero civil, 2004. 26 p.

²³ BILMEYER, Fred. Ciencia de los polímeros. Editorial Reverté S.A. Propiedades de los polímeros y clasificación Traducido por Areal Guerrero. 2004. 45 p. ISBN: 84-291-7048-0.

²⁴ Ibid., 25 p.

²⁵ CARREÑO, Ricardo y REYES, Jesús. Estudio del efecto de aditivos reductores de temperaturas de trabajo, en el desempeño de mezclas bituminosas GAP-GRADED elaboradas con asfaltos modificados con grano de caucho reciclado. Bogotá DC: Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería. Trabajo de grado para optar por el título de especialista en pavimentos, 2015. 20 p.

Partiendo de esto, en el año 2007, Reyes y otros²⁶ en su trabajo de investigación modificaron una mezcla asfáltica con caucho y plástico, en dicho trabajo, se realizó la caracterización dinámica del concreto asfáltico con las dosificaciones óptimas de adición de plástico proveniente de bolsas de leche y de caucho proveniente de las llantas usadas, logrando así una reducción del ahuellamiento del 8% y un aumento del módulo dinámico del 14%, lo cual significa para un diseño de pavimentos, un incremento de la durabilidad del 25%.

Algo semejante se encontró en el trabajo de Camilo Munera²⁷ en el año 2012 en el cual se estudió el efecto de la adición simultánea de modificadores poliméricos (SBS y GCR) a un asfalto crudo colombiano. En este se concluyó que estas modificaciones mostraron cambios acentuados en las propiedades de penetración (aumento en 12%) y temperatura de ablandamiento (aumento en 7.5%).

Por otra parte, basados en los conceptos recopilados en el libro de Rondón y Lizcano, pavimentos: materiales, construcción y diseño²⁸ se aprecia que dentro de la gama de los plastómeros se encuentran; el polietileno de alta y baja densidad (PEAD, PEBD), polipropileno (PP), poliestireno (PS) y policloruro de vinilo (PVC).

Awwad y Shbeeb²⁹ definen el polietileno en su investigación como un material semicristalino con excelente resistencia química, resistencia a la fatiga y al desgaste. Además, de tener una estructura muy simple. Una molécula de polietileno es una cadena larga de átomos de carbono, con dos átomos de hidrógeno unidos a cada átomo de carbono. También, son de peso ligero (0,97 gr/cm³); proporcionan una buena resistencia a disolventes orgánicos con bajas tasas de absorción de humedad.

De esta manera se comenzaron a realizar modificaciones con polímeros. Partiendo de esto, en el año 2005, Polacco y otros³⁰ demostraron que al añadir polietileno de baja densidad (usualmente 2-6% en peso) mostró mayor compatibilidad con el asfalto, además, condujo a la reparación del aglutinante de asfalto con propiedades mecánicas mejoradas en un 21% en comparación con otras mezclas asfálticas convencionales.

²⁶ REYES, Alberto; MADRID, Fernanda y SALAS, Ximena. Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómeros (tiras de bolsas de leche con asfalto 80-100). Mezclas asfálticas: En; Infraestructura Vial. Febrero, 2007. Vol. 2, no. 17, p. 16.

²⁷ MUNERA, Camilo. Modificación polimérica de asfaltos. Antioquía. Medellín: Universidad EAFIT. Memorias congreso internacional de materiales. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil. 2012, 25 p.

²⁸ RONDÓN QUINTANA, Hugo Alexander y REYES LIZCANO, Fredy Alberto. Pavimentos: Materiales, construcción y diseño. Primera. Bogotá DC: ECOE Ediciones, 2015. p. 34-37. ISBN 978-958-771-175-2.

²⁹ AWWAD, Mohammad y SHBEEB, Lina. The use of polyethylene in hot asphalt mixtures. Pavimentos flexibles: En; American Journal of Applied Sciences. Junio, 2007. Vol. 4, no. 390, p. 32.

³⁰ POLACCO Giovanni, BERLINCIONI, Stefano, BIONDI, Darío, STASTNA Jiri y ZANZOTTO, Ludovit. Asphalt modification with different polyethylene-based polymers. En; Europa Polymer Journal. Julio. 2005. Vol 1., no. 41, p. 22.

Desde entonces se han hecho modificaciones en mezclas asfálticas con polietileno, principalmente en mezclas densas en caliente. De esta manera se encontraron estudios como el de Awwad y Shbeeb³¹ en 2007 en el cual agregaron a una mezcla asfáltica polietileno de alta y baja densidad; este último ofrece buena resistencia a la corrosión y baja permeabilidad. Se comprobó que el uso de polietileno en la mezcla de asfalto reduce la deformación del pavimento; aumenta la resistencia a la fatiga y proporcionan una mejor adherencia entre el asfalto y el agregado.

Resultados evaluados por Awwad y Shbeeb, se complementaron con resultados obtenidos en estudios similares como el de Inés Salinas³² en el año 2009, en el cual se afirmó que agregar polímeros al cemento asfáltico disminuye la susceptibilidad térmica, mejora el comportamiento a la fatiga, aumenta la resistencia al envejecimiento y aumenta la adhesividad árido-ligante.

Adicionalmente, ese mismo año Metaute y Casas³³ en su trabajo de investigación; desarrollo de una mezcla asfáltica utilizando residuos plásticos, realizaron un análisis desde el punto de vista normativo colombiano, comparando los valores establecidos por la norma INVIAS (Instituto Nacional de Vías) y los obtenidos en las pruebas realizadas.

Metaute y Casas³⁴ hallaron que de acuerdo a los puntos de fusión de los polímeros y a la viabilidad del proceso, el mejor método de incorporación del material polimérico a la mezcla asfáltica es como parte de los agregados. Asimismo, Las formulaciones que cumplen con los intervalos permitidos por norma INVIAS respecto a las variables estabilidad y flujo corresponden a aquellas construidas con menos del 6% de polímero fino, como agregado, y un porcentaje de asfalto entre 4,7 y 4,9%.

Ahora bien, en el año 2010 Rondón y otros³⁵ realizaron un estudio detallado al modificar una mezcla densa en caliente MDC-2 y compararla con una mezcla asfáltica convencional, en dicho estudio, se obtuvieron resultados relevantes como; un aumento del 36% en la estabilidad y 24% en la relación estabilidad/flujo con respecto a las convencionales. El módulo resiliente de la mezcla modificada se incrementó entre 25 a 65% respecto a las convencionales, la deformación permanente disminuyó 40% y redujo su resistencia a la fatiga entre un 13 y 32%.

³¹ AWWAD, Mohammad y SHBEEB, Lina. Óp. Cit., 23 p.

³² SALINAS RETO, Patricia Inés. Aplicación de micropavimento usando asfalto modificado con polímero en la vía Sullana-Aguas Verdes. Piura, Perú: Universidad de PIURA. Facultad de ingeniería. Tesis para optar por el título de ingeniero civil. 2009, 36 p.

³³ METAUTE, Diana Milena y CASAS, Daniel Mauricio. Desarrollo de una mezcla asfáltica utilizando residuos plásticos. Medellín: Universidad EAFIT. Departamento de ingeniería de procesos. Proyecto de grado para aspirar al título de ingeniero de procesos. 2009, 24 p.

³⁴ Ibid. 26 p.

³⁵ RONDÓN y FERNANDEZ, Óp. Cit., p. 35

Cabe considerar por otra parte que, en el año 2011, Kwang Kim y otros³⁶ modificaron un asfalto con polietileno de baja densidad y lo sometieron a bajas temperaturas (inferiores a 0°C) en dichas condiciones, obtuvieron resultados favorables al concluir que la resistencia a la fractura del asfalto modificado aumenta cuando este presenta temperaturas inferiores a 10°C por el contrario el asfalto convencional al llegar a 20°C comienza a presentar fracturas por contracción.

Otro aspecto importante a la hora de modificar un asfalto que fue considerado por Shafii y otros³⁷ es el método para añadir polímero a la mezcla asfáltica, este depende de las propiedades físicas del polímero. Normalmente, se utiliza el método premezclado (Vía Seca) para el polímero sólido (hace parte de los agregados) y se utiliza el método post-mezclado (Vía Húmeda) para el polímero líquido (se mezcla con el cemento asfáltico y después se mezcla con los agregados).

Basados en los resultados obtenidos en su investigación Shafii y otros³⁸ sustentan que el método premezclado produce una red de polímeros finos dentro de asfalto, generando una textura heterogénea. Sin embargo, se sugiere utilizar el método post-mezclado debido a que se puede reducir la energía utilizada y minimizar el efecto del calor sobre el polímero que podría alterar o dañar sus propiedades.

Otro punto de vista ambiental fue comentado por Casanova y Rodríguez³⁹ en el año 2012 mostrando resultados favorables respecto a la temperatura, concluyendo que la temperatura de elaboración del material bituminoso disminuye de 180°C a 135°C y la temperatura de colocación disminuye entre los 20°C y 60°C. De esta manera disminuye la emisión de gases a la atmosfera.

Además, Rojas y Mendivelso⁴⁰ en el año 2015 concluyen que, el porcentaje de vacíos disminuye significativamente a medida que la temperatura aumenta lo que garantiza que la mezcla asfáltica obtenga propiedades de impermeabilidad que impidan filtración de fluidos a través del asfalto que puedan afectar la estructura del pavimento.

El último aspecto importante relacionado con la modificación de asfalto utilizando polietileno de baja densidad es ahorro de energía, dicho aspecto es comprobado

³⁶ KWANG W. Kim, SEUNG JUN, Kweon, YOUNG S, Doh, y TAE-SOON, Park. Fracture toughness of polymer-modified asphalt concrete at low temperatures. *En: International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS*. Diciembre, 2011. Vol. 11 no. 06. 43 p.

³⁷ M. A, Shafii; M. Y, Abdul Rahman y J., Ahmad. *Polymer Modified Asphalt Emulsion*. Selangor, Malaysia: University Teknologi MARA. Facultad de ingeniería civil. Trabajo de grado para optar por el título de especialista en pavimentos. 2011, 43 p.

³⁸ *Ibid.*, 45 p.

³⁹ CASANOVA, Sandra Lorena y RODRIGUEZ, Paola. *Caracterización física de ligantes asfálticos con cecabase para mezclas tibias*. Bogotá DC: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería. Proyecto de grado para optar por el título de ingeniero civil. 2012, 15 p.

⁴⁰ROJAS y MENDIVELSO, Óp. Cit., 23 p.

por Cuadri y otros⁴¹ producto de su trabajo de investigación realizando en el año 2016, ellos comentan que; las tecnologías sostenibles de un asfalto que implican el reciclaje de materiales y los enfoques de ahorro de energía están en creciente demanda.

Dentro de este contexto, se encuentra que en Colombia desde comienzos del siglo XXI se han venido desarrollando investigaciones relacionadas con asfaltos modificados, siendo el ingeniero Hugo Rondón de la universidad distrital uno de los autores más destacados en el tema. En 2007 un grupo de ingenieros civiles liderado por Hugo Rondón, realizaron una investigación exhaustiva con el objetivo de establecer un estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia.

Ese mismo año Diana Metaute y Daniel Casas, desarrollaron una mezcla asfáltica modificada utilizando residuos plásticos. También se encuentran investigaciones como las de Hugo Camargo y Andrea Suarez en 2010, en la cual se realizó un diagnóstico de las nuevas tecnologías empleadas para el diseño de mezclas asfálticas densas en caliente MDC-2, actualmente conocida como MDC-19.

Asimismo, Juan Camilo Múnera (universidad EAFIT, Medellín) en el año 2012, realizó una investigación sobre la modificación polimérica, utilizando elastómeros y plastómeros, con el fin de analizar la incidencia en las propiedades químicas y reológicas de la mezcla asfáltica, encontrando que al modificar la mezcla asfáltica con plastómeros no solo mejora sus propiedades mecánicas, sino que también disminuye la temperatura de elaboración y compactación del asfalto.

Para finalizar, en la Universidad Católica de Colombia, se han realizado numerosas investigaciones; en el año 2015 Camilo Rojas y Kevin Mendivelso, analizaron las propiedades mecánicas de una mezcla MDC-10 modificada con polietileno de baja densidad, presentada como trozos de pitillos, ese mismo año Cristian León y Jaime Segura analizaron el diseño de una mezcla asfáltica MDC-25 modificada con polietileno de baja densidad.

En este orden de ideas, este trabajo se permite analizar la variación en las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente MDC-19 modificada con un desecho de polietileno de baja densidad, presentado como trozos de bolsas plásticas en dosificaciones de peso PEBD/CA 0.5%, 1.0%, 1.5% y 2.0% y con esto contribuir al innovador mundo de los asfaltos modificados.

⁴¹ A.A. CUADRI, C; ROMAN, M. GARCÍA-MORALES, F. Guisado, E. MORENO, P. PARTAL. Formulation and processing of recycled low-density polyethylene modified bitumen emulsions for reduced-temperature asphalt technologies. En: Chemical Engineering Science. 2016. 34 p.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Según Maila⁴² debido al entorno actual, donde se busca promover practicas autosostenibles que ayuden a preservar los recursos naturales y mitigar el impacto ambiental generados por la construcción de infraestructura necesaria para el desarrollo de una sociedad, es imperante evaluar la capacidad de una estructura ingenieril a la hora de soportar las demandas que requiere una sociedad en vía de desarrollo, sin dejar de considerar aspectos ambientales que afecten el planeta.

Considerando los estudios realizados por Camargo y otros⁴³ se puede manifestar que, en la construcción de pavimentos flexibles se requieren materiales que reemplacen a derivados del petróleo, los cuales se deben fabricar y manipular a altas temperaturas ocasionando un consumo de energía considerable, este se ve reflejado en la combustión de hidrocarburos, emitiendo gases que contribuyen al efecto invernadero y por ende aceleran el calentamiento global.

Por esta razón es importante cuestionarse si es posible disminuir el consumo de energía en la construcción de pavimentos, utilizando materiales reciclables, económicos, de fácil acceso y que mejoren las propiedades mecánicas del asfalto sin aumentar costos y teniendo presente la relación costo-beneficio.

Las opciones para dar solución a estas problemáticas son numerosas, pero estas van en función de la necesidad, lugar y recursos con los que se puedan contar en cada caso, por ello, es fundamental tener distintas alternativas ya que la viabilidad para cada proyecto será distinta según el contexto en el que se encuentre, y esto incentiva un camino paralelo de innovación que favorece el desarrollo auto-sostenible.

Los pavimentos flexibles se ven enfrentados a cambios extremos de temperatura entre 20 y 80°C, afectando las propiedades fundamentales del cemento asfáltico y ocasionando fallas estructurales en la estructura del pavimento. Dos de estas fallas son las principales causantes de acelerar el deterioro del pavimento y por ende disminuir su vida útil.

Todo esto es causado por dos situaciones puntuales dependientes de la temperatura de servicio. Primero, el ahuellamiento es causado por deformaciones permanentes en el pavimento, las cuales son ocasionadas por temperaturas superiores a 40°C.

⁴² MAILA PAUCAR, Manuel Elias. Comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA). Ecuador. Quito: Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ingeniería. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil. 2013, 25 p.

⁴³ CAMARGO y SUAREZ, Óp. Cit., p. 23.

Por otra parte, el agrietamiento es causado en una situación contraria, es decir, cuando el cemento asfáltico se encuentra expuesto a temperaturas inferiores a los 20°C, ocasionando contracción entre las partículas de pavimento, lo cual genera aparición de grietas que permiten la infiltración de agua hacia las capas inferiores provocando un deterioro acelerado en la estructura del pavimento.

3.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Una de las alternativas que se han aplicado en este campo es la modificación del cemento asfáltico con polímeros, en este caso el polietileno de baja densidad ha sido estudiado y analizado en la universidad católica por (Rojas y Mendivelso, 2015), (León y Segura, 2015), y en otras universidades de Colombia como la EAFIT de Medellín por (Múnera, 2012), Pontificia universidad Javeriana de Bogotá por (Aponte y Beltrán, 2013) entre otros autores destacados en el tema como (Rondón, 2010) de la universidad distrital.

Adicionalmente, Rojas y Mendivelso⁴⁴ mencionan que en Colombia el polietileno de baja densidad en asfaltos es una técnica que no se ha implementado normativamente en el diseño de pavimentos, aunque se han realizado ensayos que han arrojado resultados optimistas en la utilización de este tipo de materiales que permiten mejorar sus propiedades mecánicas.

No obstante, el PEBD cuenta con una serie de propiedades inherentes, que le permiten resistir cambios de temperatura sin afectar sus características, esto se evidencia en ensayos realizados anteriormente, como, por ejemplo, el realizado por Aponte y Beltrán en 2013, modificando una mezcla asfáltica convencional con polietileno de baja densidad, con una temperatura de mezclado de 150°C. Así mismo, Kwang Kim en 2011, encontró que la mezcla asfáltica al modificarla con polímeros es capaz de mantener su resistencia por debajo de 10°C.

Todo lo anterior con el fin de reducir la magnitud en las fallas estructurales producidas por temperatura (agrietamiento y ahuellamiento), es por esto que este trabajo de investigación tiene como meta ampliar la información existente en Colombia sobre la utilización de estos polímeros en la modificación de asfaltos MDC-19, en este caso un desecho de polietileno de baja densidad (reciclaje de bolsas plásticas) que se espera produzca beneficios tanto estructurales como ambientales.

⁴⁴ ROJAS Y MENDIVELSO, Óp. Cit., p. 18.

4. OBJETIVOS

4.1 GENERAL

Evaluar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica modificada con un desecho de polietileno de baja densidad presentado como trozos de bolsas plásticas, comparada con una mezcla asfáltica convencional tipo MDC-19 mediante ensayo Marshall, determinando así beneficios estructurales.

4.2 ESPECÍFICOS

- ✓ Realizar una investigación sobre la modificación de asfalto con polímeros y su contribución para mitigar el ahuellamiento y el agrietamiento, estableciendo un estado del conocimiento aproximado del actual proyecto.
- ✓ Realizar el diseño de una mezcla asfáltica convencional MDC-19 y una mezcla asfáltica modificada con desecho de polietileno de baja densidad (trozos de bolsas plásticas) mediante la norma INV E-748 (Marshall) y así determinar las propiedades mecánicas de las mezclas.
- ✓ Comparar y analizar los resultados obtenidos en los ensayos realizados a las mezclas modificada y convencional, para determinar cómo se ven alteradas sus propiedades mecánicas (estabilidad y deformación), teniendo en cuenta los parámetros establecidos por INVIAS.

5. JUSTIFICACIÓN

Entre los desechos de polímeros, el polietileno de baja densidad reciclado es un modificador de betún prometedor. Los ensayos de estabilidad, flujo y viscosidad han mostrado mejor rendimiento en betunes modificados con PEBD.

Es así como se puede percibir claramente la importancia que tienen en el campo de la ingeniería civil, utilizar este tipo de prácticas amigables con el medio ambiente, al reducir su temperatura de fabricación y colocación, disminuyendo así la emisión de gases efecto invernadero a la atmosfera. Además, favorecen notablemente las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica, partiendo de que esta es una parte fundamental de un pavimento flexible debido a que debe soportar gradientes de temperatura altos y las cargas monotónica directamente.

Adicionalmente, partiendo de otra problemática ambiental mencionada por Rondón y otros⁴⁵, en Bogotá D.C. diariamente se producen alrededor de 600 toneladas de basuras de las cuales el 10% aproximadamente son plásticos y el consumo per cápita de estos materiales en Colombia es de 11.3 kg anuales. De este 10% gran parte proviene de desechos de PEBD el cual puede ser utilizado para modificar las propiedades de mezclas asfálticas y así disminuir el impacto ambiental negativo que generan.

De esta forma se puede aprovechar los residuos plásticos generados por el consumo per cápita, que en este caso será un desecho de polietileno de baja densidad presentado como trozos de bolsas plásticas, esto promueve el reciclaje de los mismos y disminuye la huella ambiental.

Por otra parte, los beneficios obtenidos a nivel estructural son relevantes debido a que la modificación de una mezcla asfáltica densa en caliente, no solo disminuye el consumo de energía si no que mejora propiedades mecánicas como la susceptibilidad térmica; aumenta el punto de ablandamiento, disminuyendo la deformación permanente hasta en un 40% y aumenta la resistencia a la fatiga hasta en un 32%.

Con base en lo anterior este trabajo se permite evaluar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica densa en caliente tipo MDC-19 modificada con un desecho de polietileno de baja densidad presentado como trozos de bolsas plásticas, con el fin de analizar su estabilidad y fluidez, determinando así, posibles variaciones en las fallas estructurales causadas por la susceptibilidad térmica (ahuellamiento y agrietamiento).

⁴⁵ RONDÓN y FERNANDEZ, Óp. Cit., p. 35.

6. DELIMITACIÓN

6.1 ESPACIO

Para alcanzar los objetivos propuestos es necesario realizar ensayos que implican solicitar el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia en la ciudad de Bogotá como también se debe contar con un presupuesto que englobe todos los gastos y costos relacionados con el alcance del proyecto teniendo en cuenta el recurso humano y los materiales necesarios para la fabricación de las mezclas analizadas.

6.2 TIEMPO

El tiempo de ejecución necesario está en función de los términos exigidos por la facultad, en este caso un periodo no mayor a 6 meses. por tal motivo se implementan métodos y lineamientos estrictos de trabajo, involucrando estrechamente términos como el compromiso y la eficacia, para obtener como producto final, un proyecto acorde a las conformidades esperadas por los elaboradores sin olvidar el fin último de éste, contar con características de alta calidad, garantizando la satisfacción por parte de la Facultad de Ingeniería Civil.

6.3 CONTENIDO

Esta investigación tiene como objetivo un análisis comparativo de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica convencional MDC-19 y una mezcla MDC-19 modificada con PEBD, producto del reciclaje de bolsas plásticas adicionadas por vía húmeda y vía seca a una temperatura de $(145\pm 5^{\circ}\text{C})$ con el propósito de evaluar la adherencia entre la mezcla y el aditivo modificante. En función de estos resultados establecer el grado de mitigación al medio ambiente y su porcentaje de alteración en cuanto a propiedades mecánicas (estabilidad y flujo).

6.4 ALCANCE

Esta investigación quiere presentar las propiedades mecánicas que adquiere una mezcla modificada con polietileno de baja densidad que se disponen a manera de bolsas plásticas, por tanto, para alcanzar el objetivo se realizan 60 briquetas de dicha mezcla (20 briquetas convencionales y 40 briquetas modificadas), agregando el polímero por vía húmeda y vía seca, para efectuar un análisis que busca por medio de ensayos (Marshall), determinar valores de estabilidad y deformabilidad.

7. MARCO DE REFERENCIA

7.1 MARCO TEÓRICO

De acuerdo a lo mencionado por Andrea Ulloa⁴⁶ para tener una noción amplia de las nuevas tecnologías utilizadas en la disminución del impacto ambiental generado por la utilización de derivados del petróleo como cemento asfáltico para la capa de rodadura de un pavimento flexible, es necesario conocer la evolución de las teorías desarrolladas a lo largo del tiempo producto de investigaciones sucesivas sobre el mismo tema en este caso las nuevas políticas ambientales y el concepto de auto-sostenibilidad como pilar en la ejecución de un proyecto de ingeniería civil.

Así mismo Andrea Ulloa⁴⁷ define las mezclas asfálticas tibias como un conjunto de tecnologías desarrolladas en Europa durante el Tratado con Kyoto y la Comunidad Económica Europea en 1997, como una respuesta los gases del efecto invernadero. La National Asphalt Pavement Association (NAPA) en cooperación con la Federal Highway Administration (FHWA) introdujeron las MAT en el World Asphalt Show & Conference del 2004 en Nashville, TN como aporte a estos problemas ambientales.

El objetivo de estas tecnologías es bajar las temperaturas de trabajo, principalmente de compactación. Para ello existen diferentes técnicas que buscan reducir la viscosidad del ligante asfáltico y que pueden aplicarse tanto en mezclas continuas como discontinuas.

La reducción de las temperaturas en las mezclas asfálticas, brindan los siguientes beneficios.⁴⁸

- ✓ Reducción en el uso de combustibles para la producción de mezclas asfálticas.
- ✓ Facilidad en la compactación de pavimentos asfálticos.
- ✓ Incremento en el uso de pavimentos reciclados (RAP) dentro de las mezclas.
- ✓ Mejor ambiente de trabajo para los operarios en sitio.
- ✓ Reducción o eliminación de gases y olores.
- ✓ Eliminación del envejecimiento prematuro del ligante asfáltico.

Según Camilo Martínez⁴⁹ los asfaltos convencionales brindan propiedades mecánicas y resistencias notorias en el diseño de un pavimento, pero es necesario utilizar altas temperaturas para su fabricación entre 150°C y 180°C y para su

⁴⁶ ULLOA CALDERÓN, Andrea. Programa de infraestructuras del transporte. En: Boletín técnico PITRA. Abril 2011, Vol. 2. no. 15. p. 10.

⁴⁷ Ibid., p. 2.

⁴⁸ Ibid., p. 5.

⁴⁹ MARTINEZ, Juan Camilo. Asfalto modificado. [En línea]. Bogota: Cybertesis. [Citado el: 09 de marzo de 2017]. Disponible en internet:< http://cybertesis.urp.edu.po/urp/2009/martinez_jc/pdf/martinez_jc-TH.4.pdf>

colocación y compactación entre 120°C y 150°C, debido a que se deben manejar elevadas temperaturas para mantener sus propiedades reológicas.

Catriel⁵⁰ define la reología como la ciencia de flujo que estudia la deformación de un cuerpo sometido a esfuerzos externos, para esto se debe saber la velocidad de respuesta que tiene el material, para comprender su comportamiento frente a una fuerza exterior.

Existen en el mundo dos técnicas de utilización de polímeros o aditivos para modificar las propiedades de mezclas asfálticas. A estas técnicas de modificación se les denomina vía húmeda y 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.⁵¹

En general, la literatura de referencia reporta que por vía húmeda las desventajas son; el mayor costo inicial de la mezcla (se requiere nuevos equipos en planta como la unidad de mezclado y almacenamiento del asfalto-aditivo, cambio de bombas y tuberías) y el aumento de la temperatura de mezclado (se requiere energía adicional en planta durante el proceso de fabricación de la mezcla).⁵²

Por el contrario, por vía seca el tiempo de compactación de la mezcla es mayor y demanda mayor cantidad de ligante asfáltico. Sin embargo, el proceso seco es más económico que el húmedo (Velar, 1997), ya que el proceso húmedo, como ya se mencionó, requiere la instalación de un tanque de almacenamiento adicional para el aglutinante (o bitumen), una bomba que pueda manejar esta mezcla, que resulta ser más viscosa y abrasiva, e instalar además el equipo necesario para hacer la mezcla.⁵³

De acuerdo con Lougheed y Papagiannakis (1996), el mejor comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas se obtiene cuando el proceso de modificación se realiza por vía húmeda. Por medio del proceso en seco el comportamiento de las mezclas modificadas varía entre aceptable a desastroso.

Por otra parte, la capacidad del aditivo para mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas depende del tipo de modificación (húmedo o seco), de la naturaleza,

⁵⁰ CATRIEL, Gisela. Reología en ligantes asfálticos. La Plata: Universidad Tecnológica Nacional. Facultad de ingeniería civil. Tesis para optar por el título de ingeniero civil. 2008, 2 p.

⁵¹ RONDÓN y REYES, Óp. Cit., p. 238.

⁵² Ibid., p. 238.

⁵³ Ibid., p. 239.

porcentaje y tamaño máximo de las partículas de aditivo y del tiempo y temperatura de mezclado entre el ligante y polímero.⁵⁴

Los objetivos que se persiguen cuando se modifican asfaltos es mejorar algunas de las propiedades de las mezclas asfálticas tales como.⁵⁵

- ✓ Resistencia a la fisuración y susceptibilidad térmica.
- ✓ Resistencia a la deformación permanente (ahuellamiento).
- ✓ Rigidez.
- ✓ Adherencia entre los agregados pétreos y cohesividad.
- ✓ Resistencia al envejecimiento.
- ✓ Resistencia a la fatiga.
- ✓ Resistencia al daño por humedad.

En Colombia, la tendencia del parque automotor en los últimos 30 años se ha incrementado, lo que genera en las capas asfálticas de una estructura de pavimento mayores niveles de esfuerzo y deformación. Estos mayores niveles de carga deben ser contrarrestados con materiales asfálticos que presenten mejores comportamientos que los tradicionales. Una alternativa para contrarrestar este fenómeno en el mundo ha sido la utilización de la tecnología de los asfaltos modificados, empleando principalmente polímeros como agentes modificadores.⁵⁶

Esta tecnología ha sido una técnica ampliamente estudiada y utilizada en el mundo. Con la adición de polímeros al asfalto se modifican las propiedades mecánicas, químicas y reológicas de las mezclas asfálticas. Cuando se utiliza esta tecnología se pretende mejorar el comportamiento que experimentan las mezclas tradicionales cuando son sometidas a diferentes condiciones de carga y del medio ambiente.⁵⁷

Los polímeros se pueden clasificar en dos grandes grupos: termoendurecibles y termoplásticos (véase la figura 1). 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 los utilizados para modificar asfaltos ya que pueden ser sometidos a altas temperaturas sin que se degraden demasiado sus propiedades.⁵⁸

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).

⁵⁴ RONDÓN QUINTANA y REYES LIZCANO., Óp. Cit., p. 236.

⁵⁵ RONDÓN y FERNANDEZ, Óp. Cit., p. 15.

⁵⁶ BILMEYER, Óp. Cit., p. 57.

⁵⁷ Ibid., p. 48.

⁵⁸ Ibid., p. 49.

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 policloruro de vinilo (PVC). La mayor parte de las investigaciones realizadas en el área de los asfaltos modificados utilizan como agentes modificadores polímeros del tipo elastómero. Estados del conocimiento sobre el tema pueden ser consultados en Papagiannakis y Loughheed (1995), Copeland (2007), Yildirim (2007) y, para el caso colombiano, en Rondón (2010).

Como ya se mencionó con anterioridad este tipo de aditivos, al ser agregados al asfalto, mejoran principalmente el comportamiento resiliente (recuperación elástica) de las mezclas cuando son solicitadas a ciclos de carga y descarga, especialmente a altas temperaturas de servicio. Según Reyes y Rondón⁵⁹ Cuando las mezclas se modifican con aditivos plastoméricos se obtiene un incremento en la resistencia mecánica de las mezclas a altas temperaturas debido a que el asfalto se rigidiza.

Figura 1 Clasificación de los aditivos y modificados de cementos asfálticos



Fuente. Los autores

⁵⁹ Rondón y Reyes, 2015 Óp. Cit., p. 245.

7.2 MARCO HISTÓRICO

7.2.1 Historia⁶⁰

El asfalto es uno de los materiales más antiguos utilizados por el hombre. La palabra asfalto, deriva del acadio, lengua hablada en Asiría, en las orillas del Tigris superior, entre los años 1400 y 600 A.C. En este lugar se empieza a utilizar la palabra “Sphalto” que significa “lo que hace caer”. Luego la palabra fue adoptada al francés (asphalte), al español (asfalto) y al inglés (asphalt). En la actualidad, estudios arqueológicos, han demostrado que es uno de los materiales constructivos más antiguos que el hombre ha utilizado en el sector de la construcción.

La utilización más antigua se remonta aproximadamente al año 3200 A.C. esto se evidencia debido a excavaciones efectuadas en Tell Asmer a 80 km al noroeste de Bagdad (Irak), las cuales permitieron constatar que los Sumerios habían utilizado un mastic (mortero al que se le agrega arena in situ) de asfalto para la construcción. Dicho mastic estaba compuesto por betún, finos minerales y paja que se utilizaba en la pega de ladrillos, en la realización de pavimentos interiores y como revestimiento impermeable.

Por otra parte, los egipcios habían encontrado otra aplicación al betún como relleno del cuerpo en trabajos de momificación, práctica que se extiende aproximadamente hasta el año 300 A.C. Seguidamente, los árabes desarrollaron un uso medicinal al asfalto, el cual se extendió hasta nuestra época.

Posteriormente, el betún natural fue descubierto a mediados del siglo XVI, en la isla de Trinidad, por Cristóbal Colón, un siglo más tarde, Sir Walter Raleigh quedó asombrado ante este lago de betún y tomó posesión de este para la Corona Británica. Mientras tanto, en 1712, el griego Eirini D`Eyrinis hizo otro descubrimiento: el yacimiento de asfalto de Val de Travers en Suiza y luego el yacimiento de Seyssel en el Valle de Ródano.

A partir de estos yacimientos se elaboró el “mastic de asfalto”, aplicado a revestimientos de caminos y senderos. Sin embargo, el primer antecedente en el cual se usó un tipo de asfalto fue en Francia en 1802. No obstante, en 1824, la firma Pillot et Eyquem comenzó a fabricar adoquines de asfalto, que en 1837 se utilizaron para pavimentar la Plaza de la Concordia y los Campos Elíseos en París. Además, en 1852 en la construcción de la carretera Paris – Perpiñan se utilizó el asfalto Val Travers, significando el comienzo de una nueva forma de construcción vial.

⁶⁰ WULF RODRIGUEZ, Fernando Andrés. Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de ciencias de la ingeniería. Tesis para optar al título de Ingeniero Constructor, 2008. 9 p.

Más tarde, en 1869, se introduce este procedimiento en Londres (con asfalto de Val de Travers) y en 1870 en Estados Unidos con ligante similar. Desde esta época, el “asfalto” se implantó sólidamente en las vías urbanas y propició su uso vial. Además, la construcción del primer pavimento, tipo Sheet Asphalt, ocurre en 1876 en Washington D.C., con asfalto natural importado.

Otro aspecto importante ocurre en 1900, en el cual aparece la primera mezcla en caliente, utilizada en la rue du Louvre y en la Avenue Victoria en París, la cual fue confeccionada con asfalto natural de la isla de Trinidad. A partir del año 1902, se inicia el empleo de asfaltos destilados de petróleo en los Estados Unidos, que, por sus características de pureza y economía en relación a los asfaltos naturales, constituye en la actualidad la principal fuente de abastecimiento.⁶¹

7.2.2 Últimos avances

A continuación, se presenta una línea del tiempo de la producción de mezclas asfálticas elaborada por Camilo Rojas y Kevin Mendivelso.⁶²

- ✓ Shell y Kolo Viedekke, iniciaron un programa en conjunto, para el desarrollo de un producto, y del proceso para la fabricación de mezcla agregado - asfalto a temperaturas más bajas; obteniendo mejores propiedades o equivalentes condiciones de desempeño, con relación a las mezclas tradicionales en caliente.
- ✓ 1999 – 2001 Reportes iniciales de las tecnologías de la mezcla tibia en el Congreso Euraspalt/Eurobitume, el Fórum Alemán de Bitumen, Conferencia sobre Pavimentos Asfálticos en Sudáfrica, principalmente.
- ✓ 2002 recorrido de exploración a Dinamarca, Alemania y Noruega realizado por directores de NAPA para examinar las tecnologías de la mezcla asfáltica tibia (WMA), Aspha-min, la Espuma y el Sasobit. En la agenda de trabajo del grupo, se incluyeron reuniones con el Fórum Alemán de Bitumen, con el objetivo de considerar algunas actividades del grupo de Trabajo sobre Reducción de Temperatura.
- ✓ 2003 los estudios sobre mezclas tibias, son presentados en la Convención Anual de la Asociación Nacional de Pavimento Asfáltico NAPA.

⁶¹ WULF RODRIGUEZ, Fernando Andrés. Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de ciencias de la ingeniería. Tesis para optar al título de Ingeniero Constructor, 2008. 9 p.

⁶² LOPERA PALACIO, Conrado Hernando. Diseño y producción de mezclas asfálticas tibias a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma (ELAEIS GUINEENSIS). Informe final de investigación para optar al título de Máster en Ingeniería Infraestructura y Sistemas de Transporte. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, 2011. 106 p. Revista HMAT 2008. Citado por ROJAS, Camilo y MENDIVELSO, Kevin. Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente tipo mdc-10 modificada con un desecho de polietileno de baja densidad. Bogotá D.C. : Universidad Católica de Colombia, 2015. 14 p.

- ✓ 2004 las primeras pruebas de campo fueron realizadas en Florida y Carolina del Norte.
- ✓ 2005 formación del grupo de trabajo (TWG) de la mezcla Asfáltica Tibia de NAPA-FHWA. El objetivo principal del trabajo es la implementación adecuada a través de recolección de datos y análisis, de un método genérico de especificaciones técnicas en WMA.
- ✓ 2005 declaración de investigación de problemas sometido a la consideración de la American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ✓ 2006 durante la Conferencia de Pavimento Asfáltico en el Mundo del Asfalto, se presenta una sesión de medio día sobre mezclas tibias.
- ✓ 2006 con base en la declaración de investigación de problemas, cuyo documento fue sometido en 2005 a evaluación por parte de la AASHTO, se define como de alta prioridad la destinación de fondos de la investigación en WMA.
- ✓ 2006 se realizan pruebas de campo en: California, con la mezcla de hule asfáltico; Michigan, Missouri, sobre la nueva aplicación para evitar baches causados por temperatura en la carretera; Nueva York, donde se probó el nuevo proceso de Asfalto de bajo consumo de energía; Ohio, donde se realizó una exhibición abierta al público con 225 asistentes; Carolina del Sur, Texas, Virginia y Wisconsin, también se realizaron exhibiciones abiertas al público.
- ✓ 2006 un contratista de Missouri, realiza trabajos de producción de pavimento con mezcla en tibio partiendo de una prueba exitosa. 2006 NCAT publica un reporte sobre el Evotherm.
- ✓ 2007 demostración en calle de San Antonio en la Reunión Anual de la APWA. 30.000 toneladas de diferentes tecnologías de WMA, son colocadas cerca de Yellowstone, para el mes de agosto. En las pruebas realizadas en la Yellowstone, se utilizaron 9,000 toneladas métricas de asfalto, en cada una de las tres 15 secciones (Sección de Control, Sección Sasobit y Sección de Advere WMA). Durante el proceso de acarreo, las mezclas fueron conducidas cerca de 90 minutos desde una planta portátil en Cody, Wyo.
- ✓ 2007 aunque fue difícil la logística, las cuadrillas de pavimentación lograron buenas densidades: el promedio de Advere WMA-93.9% de densidad teórica máxima; el promedio de Sasobit – 93.4%. Neitke, quien estuvo a cargo del proyecto, declaró que: “La densidad no fue difícil de alcanzar, aun cuando las temperaturas de la mezcla bajan”, ante lo cual, “Parecía un tanto difícil mantener bajas las temperaturas de la mezcla; las temperaturas de producción tenían una tendencia a brincar de 120 a 127°C.

Las pruebas mostraron que los agregados se secaron adecuadamente aun con las temperaturas bajas. Los contenidos de humedad estaban abajo del máximo de 0.5% tanto para las mezclas en tibio como para la mezcla de control”⁶³.

✓ 2015 XVIII Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto CILA-2015 en Bariloche, Patagonia Argentina. En este evento, expertos y profesionales debatieron cuestiones técnicas y científicas referidas a las últimas novedades en asfaltos, expuestas en los trabajos técnicos y conferencias magistrales de profesionales de reconocido prestigio internacional.

Entre ellas, se contó con la participación de esta compañía y su aporte académico con la ponencia "Estudio de la estructura química, comportamiento reológico y susceptibilidad al envejecimiento de asfaltos modificados, evaluados por desempeño a fatiga, ahuellamiento, daño por humedad y susceptibilidad a la propagación del agrietamiento" a cargo del Gerente de la planta de asfaltos, el Ing. Alfredo Torres Dahbura.

7.3 MARCO CONCEPTUAL

Existen definiciones necesarias alrededor de las mezclas asfálticas modificadas.

7.3.1 Asfalto

El asfalto es un material bituminoso de color negro, constituido por asfaltenos, resinas y aceites (véase figura 2), los cuales proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientes normales. Al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida. Pueden tener dos orígenes: los derivados del petróleo y los naturales.⁶⁴

Figura 2. Composición del asfalto



Fuente. Manual del Asfalto. AsphaltInstitute

⁶³ ROJAS y MENDIVELSO, Óp. Cit., p. 15.

⁶⁴ N-CMT-4-05-001/00. Materiales para Pavimentos, Calidad de Pavimentos Asfálticos. SCT. 1p

7.3.2 Cemento asfáltico

Asfalto refinado o una combinación de éste con un aceite fluidificante, cuya viscosidad es apropiada para los trabajos de pavimentación.

Dependiendo del proyecto, según la zona de aplicación de la mezcla, los cementos asfálticos que normalmente se emplean son del tipo C.A. 60/80, C.A. 80/100, C.A. elastomérico del tipo Bitucet 60/80. Los cementos asfálticos (C.A.) 60/80 y C.A. 80/100 se ocupan de las capas inferiores; en la capa de rodado además de éstos, se usan también asfaltos modificados con y sin elastómeros, del tipo Bitucet 60/80 o Móvil Multigrado.

La penetración más adecuada que debe poseer el cemento asfáltico, depende de varios factores:

- ✓ Tipo de aplicación
- ✓ Características y graduación del agregado pétreo
- ✓ Condiciones climáticas

Las viscosidades más altas, que se obtienen a menores temperaturas, para los distintos tipos de cemento asfáltico, deben relacionarse de modo de asegurar un recubrimiento adecuado del agregado pétreo y la trabajabilidad apropiada para mezclar, esparcir y compactar la mezcla.

La banda de viscosidades para la determinación de temperaturas de calentamiento de los cementos asfálticos, para un correcto cubrimiento del agregado durante el proceso de mezclado, varía entre 1.6-2.0. Para el C.A. 60/80 esta temperatura varía entre 145 y 155°C; en los asfaltos modificados Bitucet 60/80 y Móvil Multigrado AG esta temperatura es superior a la mencionada en alrededor de 10°C a 15°C.

La temperatura de compactación recomendable, obtenida de la relación viscosidad-temperatura, es aquella en que el cemento asfáltico tiene una viscosidad entre 2.8-3.2 ps. Para el C. A. 60/80 esta temperatura es del orden de 140°C y 150°C respectivamente para iniciar la compactación.

7.3.2.1 Cemento asfáltico 40/50

El asfalto 40/50 es un asfalto “normalizado” termino que hace referencia al proceso industrial al cual se somete el ligante proveniente de la refinería, para lograr cumplimiento de especificaciones y obtener una característica de penetración comprendida entre 40 y 50 mm/10. El uso principal de los asfaltos de penetración es la construcción y conservación de carreteras. La selección del tipo adecuado estará en función de las características climáticas de la zona y las condiciones de

operación de la vía a intervenir, según indicaciones del Art.450 del INVIAS. La temperatura de compactación está comprendida entre los 139°C y 144°C.

7.3.2.2 Cemento asfáltico 60/70

El asfalto 60/70 es un asfalto “normalizado” termino que hace referencia al proceso industrial al cual se somete el ligante proveniente de la refinería, para lograr cumplimiento de especificaciones y obtener una característica de penetración comprendida entre 60 y 70 mm/10. La Temperatura de compactación está comprendida entre los 132°C y 137°C y su temperatura de fabricación entre 145°C y 150°C.

7.3.2.3 Cemento asfáltico 80/100

El asfalto 80/100 es un asfalto “NORMALIZADO” termino que hace referencia al proceso industrial al cual se somete el ligante proveniente de la refinería, para lograr cumplimiento de especificaciones y obtener una característica de penetración comprendida entre 80 y 100 mm/10. La temperatura de compactación está comprendida entre los 134°C y 137°C.

7.3.2.4 Especificación INIVAS

Tabla 1. Especificaciones del cemento asfáltico

Característica	Unidad	Norma de ensayo	40-50		80-100		80-100	
			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Asfalto original								
Penetración	0.1 mm	INV E-706	40	50	60	70	80	100
Índice de penetración	-	-	-1,0	1,0	-1,0	1,0	-1,0	1,0
Viscosidad a 60°C	Pa-s	ASTM D-4402	200	400	150	300	100	200
Viscosidad a 135°C	Pa-s	ASTM D-4402	0,27	0,65	0,22	0,45	0,15	0,40
Punto de ablandamiento	°C	INV E-712	49	59	45	55	42	52
Ductilidad (25°C, 5 cm/min)	cm	INV E-702	100	-	100	-	100	-
Solubilidad en tricloroetileno	%	INV E-713	99	-	99	-	99	-
Punto de ignición Mediante copa abierta de Cleveland	°C	INVE E-709	232	-	232	-	232	-

Fuente. Especificaciones INVIAS 2012

El cemento asfáltico más usado en Colombia es el 60/70 debido a que se adapta a las condiciones climáticas y del tránsito de Colombia, con temperaturas de servicio de entre 15°C y 25°C. La temperatura media anual en Colombia es 24.5 ° C.

7.3.3 Agregados Pétreos

Son materiales granulares provenientes de fuentes naturales o mediante el proceso de trituración y deben cumplir con las granulometrías adecuadas para la fabricación de mezclas asfálticas.

✓ Agregados Gruesos

Los agregados gruesos consisten en grava o una combinación de gravas o agregado triturado cuyas partículas sean predominantemente mayores que 5 mm y generalmente entre 9.5 mm y 38 mm.

✓ Agregados Finos

Los agregados finos comúnmente consisten en arena natural o material triturado siendo la mayoría de sus partículas menores que 5 mm.

7.3.4 Mezcla asfáltica

Las mezclas asfálticas, también llamadas aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que cubre los agregados. Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de llenante mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Componentes importantes para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el llenante mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.⁶⁵

7.3.5 Mezcla Asfáltica Densa en Caliente (MDC)

Es la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y eventualmente aditivo, de manera que todas las partículas de agregados queden bien recubiertas por la película del ligante. Su proceso de fabricación implica calentar bien el ligante y los agregados, excepto el llenante mineral.⁶⁶

⁶⁵ PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. México D.F: Universidad Politécnica de Cataluña. Facultad de ingeniería. Tesis para optar por el título de ingeniero civil. 2004, 45 p.

⁶⁶ Ibid., 47p.

7.3.6 Mezcla densa en caliente tipo MDC-19⁶⁷

Para realizar el diseño Marshall correspondiente al tipo de mezcla que se necesita de acuerdo a los requerimientos del proyecto, es necesario hacerlo con base en las especificaciones INVIAS 2012 (véase Tabla 2). Así mismo para verificar los criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall, se recurre a las especificaciones INVIAS 2012 (véase tabla 3).

Tabla 2. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua.

TIPO DE MEZCLA		TAMIZ (mm/ U.S. Standard)									
		37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.180	0.075
		1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 80	No. 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	43-61	16-29	9-19	5-10
SEMIDENSA	MSC-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
	MSC-19			100	80-95	65-80	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
GRUESA	MGC-38	100	75-95	65-80	47-67	40-60	28-46	17-32	7-27	4-11	2-6
	MGC-25		100	75-95	55-75	40-60	28-46	17-32	7-27	4-11	2-6
ALTO MODULO	MAM-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	10-20	8-14	6-9
TOLERANCIAS EN LA PRODUCCIÓN SOBRE LA FORMULA DE TRABAJO (+-)		-	0,04				0,03			0,02	

Fuente. Normas y especificaciones 2012 INVIAS.

La gradación de los agregados pétreos es de suma importancia para la identificación del tipo de mezcla asfáltica a utilizar en el proyecto vial, además de las características del cemento asfáltico definen la durabilidad del pavimento cuanto se encuentra sometido a cambios climáticos y del tránsito.

⁶⁷ INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras INVIAS 2013. Bogotá D.C.: Artículo 450-13, 2014.

Tabla 3. Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall.

CARACTERÍSTICA	NORMA ENSAYO INV	MEZCLAS DENSAS, SEMIDENSAS Y GRUESAS			MEZCLA DE ALTO MODULO
		CATEGORÍA DE TRÁNSITO			
		NT1	NT2	NT3	
Compactación (golpes /cara)	E-748	50	75 (112)	75 (112)	75
Estabilidad mínima (N)		5.000	7.500 (16.875)	9000 (33.750)	15.000
Flujo (mm)		2.0 a 4.0	2.0 a 4.0	2.0 a 3.5	2.0 a 3.0
Relación Estabilidad/Flujo (kN/mm)		2.0 a 4.0	3.5 a 5.0	3.0 a 6.0	-

Fuente. Normas y especificaciones 2012 INVIAS.

7.3.7 Mezclas asfálticas tibias (MAT)

Son un grupo de tecnologías que permiten la reducción de la temperatura de producción y colocación de la mezcla. Mientras que la mezcla asfáltica en caliente se produce típicamente en el rango de 140°C a 170°C, la mezcla asfáltica tibia puede producirse en el rango de 105°C a 135°C gracias al uso de tecnologías que reducen la viscosidad de la mezcla y mejoran su trabajabilidad⁶⁸.

7.3.8 Modificadores

Los modificadores del asfalto son aditivos provenientes de polímeros o llenante mineral proveniente de la trituración de material calizo; estos modificadores se adicionan al asfalto para mejorar las características dentro de la mezcla asfáltica.

7.3.9 Asfalto modificado

Se podría considerar como una mezcla asfáltica común (véase figura 3), pero con agregados o productos de origen natural o sintético que le brindan ciertas características de resistencia haciendo reemplazo a otros materiales, generalmente se modifican por factores económicos o de tipo ambiental⁶⁹.

⁶⁸ UNIVERSIDAD DE COSTA RICA. Laboratorio nacional de materiales y modelos estructurales. Mezclas asfálticas tibias. [En línea] agosto de 2011. [Citado el: 03 de marzo de 2017.] <http://investigacion.lanamme.urc.ac.cr/sitionuevo/images/campanas/pavimentos>.

⁶⁹ Luque, Hernando y Rincón, Alvaro José. Evaluación de las propiedades físicas de un cemento asfáltico 60/70 modificado con residuos de la fabricación de productos con polietileno de baja densidad. Bogotá. D.C : Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería. Tesis para optar por el título de ingeniero civil, 2011. 34 p.

Figura 3. Componentes de una mezcla asfáltica.



Fuente. Los Autores

7.3.10 Asfalto modificado para fabricación de mezclas asfálticas

Los asfaltos modificados son el producto de la disolución o incorporación de un aditivo modificador (polímero o no polímero), que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades como: menor susceptibilidad a la temperatura, mayor intervalo de plasticidad, mayor cohesión, mejor respuesta elástica, mayor resistencia al agua y al envejecimiento. (Heshmat, 1995).

Es así como, los modificadores aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos como la fatiga; reducen el agrietamiento, la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de la temperatura. Estos modificadores son adicionados al asfalto antes de mezclarlos con el material pétreo. (Heshmat, 1995).⁷⁰

7.3.10.1 Morfología de los asfaltos modificados⁷¹

Diversos autores han estudiado la morfología de los asfaltos modificados por métodos como la microscopía óptica, la microscopía de fluorescencia, la

⁷⁰ FIGUEROA INFANTE, Ana Sofía, FONSECA SALTANILLA, Elsa Beatriz y REYES LIZCANO, Freddy Alberto. Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado. En: Ing. Univ. Bogotá. Enero – junio de 2009. 47 p. ISSN 0123-2126

⁷¹ Ibid. 50 – 52 p.

microscopia electrónica de barrido y la microscopia electrónica de transmisión, para determinar si hay o no una verdadera compatibilidad entre el asfalto y el polímero.

7.3.10.2 Polímeros utilizados en la modificación de asfaltos

Los polímeros son compuestos, con un elevado peso molecular formados por muchas unidades pequeñas que se repiten llamados monómeros (compuestos químicos con moléculas simples). Se forman así moléculas gigantes que toman formas diversas: cadenas en forma de escalera, cadenas unidas o termofijas que no pueden ablandarse al ser calentadas, cadenas largas y sueltas.⁷²

7.3.11 Plastómeros⁷³

Rigidizan el asfalto ofreciendo resistencia; como consecuencia no son deformables elásticamente (PVC, EVA). Debido a la forma en que estos polímeros se incorporan al asfalto aumentan de forma considerable su viscosidad, incluso en bajas dosificaciones. Si se aumenta la concentración del polímero, se llega a un punto en el cual la mayoría de los aceites están asociados con el polímero y se produce un cambio drástico en las propiedades físicas del asfalto.

Estas se acercan más a las propiedades del polímero que a las del asfalto. Esto sucede cuando el contenido del polímero va de 8 – 10%, en este punto, el asfalto aumenta el intervalo de plasticidad, aumenta la resistencia a la ruptura, disminuye su sensibilidad térmica sobre todo en el intervalo de temperaturas de aplicación.

7.3.11.1 Polietileno

Este polímero no tiene una alta compatibilidad con el asfalto ni le confiere propiedades espectaculares, pero se usa ya que es un componente de bajo costo y soluciona un problema ecológico, al poder disponer de los desechos de este material en las carreteras. Los asfaltos modificados con este tipo de polímero termoplástico cuando son añadidos en bajas proporciones, poseen las siguientes propiedades:

- ✓ Buena resistencia al calor
- ✓ Buena resistencia al envejecimiento
- ✓ Baja viscosidad

En el plano mecánico:

- ✓ La resistencia Marshall aumenta de 2 a 2.5 veces a 25°C mientras que a 0°C y -2.5°C es prácticamente igual a la de un asfalto convencional.

⁷² AVELLÁN CRUZ, Martha Dina. Asfaltos modificados con polímeros. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Civil. Trabajo de grado Ingeniera Civil. 2007, 91 p.

⁷³ Ibid., p. 32

- ✓ Buena flexibilidad a baja temperatura
- ✓ Cuando es utilizado en concentraciones de 7% aumenta la rigidez del asfalto a temperaturas elevadas.
- ✓ Buena resistencia a deformaciones permanentes.

7.3.11.2 Polietileno de baja densidad (PEBD)

Es un polímero que pertenece a la familia de los polímeros olefínicos, es decir que se deriva de la polimerización de las olefinas. La estructura del PEBD es de cadenas muy ramificadas. Esta característica hace que su densidad sea más baja en comparación con el polietileno de alta densidad. Se trata de un plástico con escasa dureza, pero tiene una elevada resistencia al impacto y a la elongación⁷⁴.

7.3.12 Mezclas asfálticas modificadas

Las mezclas asfálticas modificadas con polímeros u otros modificadores tienden a optimizar las propiedades reológicas y mecánicas, así:

7.3.12.1 Características óptimas de las mezclas asfálticas modificadas⁷⁵

Las mezclas asfálticas convencionales al adicionar los modificadores adquieren las siguientes características:

- ✓ Mejorar la rigidez del cemento asfáltico a altas temperaturas de servicio, minimizando el riesgo al ahuellamiento.
- ✓ Obtener mezclas más flexibles a bajas temperaturas de servicio para minimizar la aparición de fisuras asociadas a los cambios térmicos.
- ✓ Mejorar la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas.
- ✓ Mejorar la adhesividad ligante – agregado pétreo con el fin de reducir el riesgo de stripping.
- ✓ Mejorar la resistencia a la abrasión de las mezclas asfálticas.
- ✓ Rejuvenecer el cemento asfáltico.

⁷⁴ UNIVERSIDAD DE BARCELONA. 2009. Polietileno de baja densidad materiales. [En línea] octubre de 2009. [Citado el: 26 de febrero de 2017.] <http://ub.edu/cmateriales/es/content/polietileno-de-baja-densidad>.

⁷⁵ Revista de la facultad de ingeniería. EPSILON. Bogotá D.C. 2007, No. 009 ISSN 1962 - 1259

- ✓ Minimizar los problemas durante el proceso de colocación y compactación de la mezcla asfáltica.
- ✓ Mejorar las características elásticas del cemento asfáltico.
- ✓ Permitir un mayor espesor de película de ligante alrededor de las partículas de agregado con el fin de incrementar la durabilidad de la mezcla.
- ✓ Reducir la probabilidad de exudación del cemento asfáltico.
- ✓ Disminuir los espesores de la estructura del pavimento.
- ✓ Mejorar el comportamiento general de toda la estructura del pavimento.
- ✓ Disminuir la susceptibilidad térmica.
- ✓ Aumentar la cohesión interna.
- ✓ Mejorar la elasticidad y la flexibilidad a bajas temperaturas.

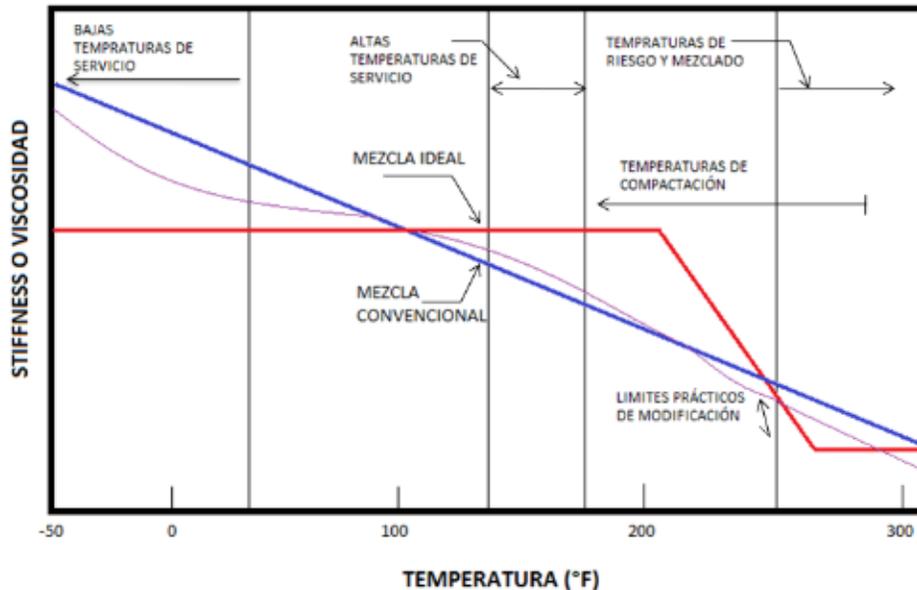
7.3.12.2 Ventajas de una mezcla modificada respecto a una mezcla convencional⁷⁶

Las mezclas asfálticas densas en caliente (MDC-19) cuando son modificadas logran mejorar sus características obteniendo las siguientes ventajas respecto a una mezcla convencional (véase figura 4):

- ✓ Baja rigidez o viscosidad a las temperaturas normales de manejo en planta y colocación en obra.
- ✓ Alta rigidez a las temperaturas altas en servicio para reducir el ahuellamiento.
- ✓ Baja rigidez y buenas características elásticas a temperaturas bajas de servicio para reducir el riesgo de la aparición de fisuras por cambios de temperatura.

⁷⁶ ARENAS, Lozano Hugo León. Tecnología del cemento asfáltico. En: Revista de ingeniería. Abril 2006, 5ª. Edición. 2006. Pág. 281

Figura 4. Características deseadas en una mezcla asfáltica



Fuente. Tecnología del Cemento Asfáltico. Hugo León Arenas

7.3.13 Ensayos realizados para caracterizar las mezclas asfálticas⁷⁷

La caracterización de cada uno de los componentes de las mezclas (agregados, asfalto y modificadores) es determinada de acuerdo a los siguientes ensayos (véase tabla 5 y tabla 6):

- ✓ Ductilidad
- ✓ Punto de ignición y llama por medio de la copa Cleveland
- ✓ Punto de ablandamiento
- ✓ Peso específico
- ✓ Penetración

Este último aspecto tiene un significado relevante a la hora de definir el tipo de cemento asfáltico a utilizar dependiendo de las condiciones del proyecto vial a ejecutar

⁷⁷ REYES LIZCANO, Fredy Alberto., FIGUEROA INFANTE, Ana Sofía. Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas. Síntesis de la investigación colombiana. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C., 2008. ISBN: 978-958-716-136-6

Tabla 4. Ensayos de laboratorio sobre los componentes de las mezclas asfálticas (agregados pétreos)

AGREGADOS PETREOS		
Ensayo	Norma	Objetivo
Granulometría	INV E – 213	Determinar cuantitativamente los tamaños de las partículas de los agregados gruesos y finos de un material.
Resistencia al desgaste	INV E –218	Determinar la resistencia al desgaste de agregados gruesos de tamaños mayores a 19 mm (3/4”) y de tamaños menores de 37,5 mm (1 1/2”), por medio de la máquina de los Ángeles.
Equivalente de arena	INV E – 133	Determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo, o material arcilloso, en los suelos o agregados finos.
Azul de metileno	INV E – 235	Determinar la presencia de elementos arcillosos en los materiales finos, como arenas naturales o de trituración, polvos minerales, etc. mediante la acción del azul de metileno.
Índice de forma y de textura de las partículas de agregado	INV E – 231	Determinar el valor índice de las características relativas de forma y textura de las partículas del agregado; el cual es una medida cuantitativa de estas características que pueden afectar el desempeño de la mezcla en los pavimentos.

FUENTE. Tomado del Capítulo 3 del libro Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas elaborado por los autores del presente trabajo

Tabla 5. (Continuación).

AGREGADOS PETREOS		
Ensayo	Norma	Objetivo
Sanidad de los agregados	INV E – 220	Determinar la resistencia a la desintegración de los agregados, por la acción de soluciones saturadas de sulfato de sodio o de magnesio.
Índice de alargamiento y aplanamiento	INV E – 230	Determinar los índices de aplanamiento y alargamiento de los agregados; donde el índice de aplanamiento se define como el porcentaje en peso de las partículas que la forman, cuya dimensión mínima (espesor) es inferior a 3/5 de la dimensión media de la fracción. El índice de alargamiento es definido como el porcentaje en peso de las partículas que la forman, cuya dimensión máxima (longitud) es superior a 9/5 de la dimensión media de la fracción. Este método no es aplicable a las fracciones del agregado inferiores a 6,3 mm (1/4”).
Porcentaje de caras fracturadas	INV E – 227	Determinar el porcentaje en peso del material que presente una o más caras fracturadas de las muestras de los agregados pétreos.
Peso específico de agregados gruesos	NV E – 223	Determinar los pesos específicos aparente y nominal, así como la absorción, después de 24 horas sumergidos en agua de los agregados con tamaño $\geq 4,75$ mm (tamiz No. 4).
Peso específico de arenas	INV E – 223	Determinar el peso específico aparente real a 23 /23 °C, así como la absorción después de 24 horas de sumergidos en agua, de los agregados con tamaño inferior a 4,75 mm (tamiz No. 4).

FUENTE. Tomado del Capítulo 3 del libro Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas elaborado por los autores del presente trabajo

Tabla 5. Ensayos de laboratorio sobre los componentes de las mezclas asfálticas (cemento asfáltico)

ASFALTOS		
Ductilidad	INV E – 702	Determinar la ductilidad de los materiales asfálticos, de consistencia sólida y semisólida
Punto de ignición y punto de llama mediante la copa abierta de Cleveland	INV E – 709	Determinar los puntos de ignición y de llama, mediante la copa abierta de Cleveland, de productos de petróleo y de otros líquidos, a excepción de aceites combustibles y materiales que tienen punto de ignición por debajo de 79°C.
Peso específico	INV E – 707	Determinar el peso específico y el peso unitario de materiales asfálticos sólidos y semisólidos y de alquitranes blandos, mediante el empleo de un picnómetro.
Punto de ablandamiento	INV E – 712	Determinar el punto de ablandamiento de productos bituminosos en el intervalo de 30 – 157°C, utilizando el aparato de anillo y bola sumergida en agua destilada, glicerina USP o glicol etileno.
Penetración	INV E – 706	Determinar la consistencia de los materiales asfálticos sólidos o semisólidos en los cuales el único o principal componente es un asfalto. La penetración se define como la distancia expresada en décimas de mm, hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja normalizada en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura.

FUENTE. Tomado del Capítulo 3 del libro Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas elaborado por los autores del presente trabajo

Tabla 6. (Continuación).

ASFALTOS		
Índice de penetración	INV E – 724	Determinar el índice de penetración de los cementos asfálticos. Este índice concebido por Pfeiffer y Van Doormal se calcula a partir de los valores de penetración y del punto de ablandamiento, y proporciona un criterio de medida de la susceptibilidad de estos materiales a los cambios de temperatura y de su comportamiento reológico. Determinar el índice de penetración de los cementos asfálticos. Este índice concebido por Pfeiffer y Van Doormal se calcula a partir de los valores de penetración y del punto de ablandamiento, y proporciona un criterio de medida de la susceptibilidad de estos materiales a los cambios de temperatura y de su comportamiento reológico.

FUENTE. Tomado del Capítulo 3 del libro Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas elaborado por los autores del presente trabajo

Para el desarrollo del diseño de una mezcla densa en caliente se utilizan ensayos como el Marshall el cual permite analizar dos propiedades relevantes en el comportamiento de una mezcla asfáltica, estas son la estabilidad y el flujo, a continuación, se define el ensayo basados en los conceptos de la norma INVIAS 2012.

7.3.13 Ensayo Marshall⁷⁸

Este ensayo es realizado a la mezcla asfáltica, para determinar el contenido óptimo de asfalto, para poder garantizar la suficiente estabilidad y así mismo las exigencias del servicio sin desplazamientos o distorsiones, un buen recubrimiento de partículas para lograr un pavimento durable incluyendo el factor de compactación. A continuación, se describe teóricamente el objetivo del ensayo Marshall (véase Figura 5).

⁷⁸ INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras INVIAS 2012. Bogotá D.C.: Especificaciones técnicas y criterios de evaluación del ensayo Marshall, 2014

Figura 5. Resultados del ensayo Marshall



Fuente. Diagnóstico de las nuevas tecnologías empleadas para el diseño de mezcla densa en caliente tipo MDC-2. Camargo. 2010.

7.3.14 Ahuellamiento

Es la falla causada por el efecto de esfuerzos verticales de compresión en la capa asfáltica de un pavimento, manifestada en ahuellamiento bajo la superficie de carga de las llantas y de esfuerzos horizontales que varían desde compresión en la parte superior de la capa a tensión en la parte inferior. La magnitud de estos esfuerzos depende de factores relacionados con la estructura de los agregados.

7.3.15 Módulo dinámico

Considerada como la propiedad más importante debido a que suministra información sobre el comportamiento dinámico de la mezcla, básicamente es la relación entre la deformación del material bajo una carga aplicada y el esfuerzo, siendo la magnitud del módulo complejo de una mezcla.

7.4 MARCO LEGAL

Dentro de la normativa vigente en Colombia para la construcción de carreteras, existen las siguientes:

7.4.1 Especificaciones INVIAS 2013

El Ministerio de Transporte a través de la Resolución No. 0001376 del 26 de mayo de 2014 actualizó las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras para los contratos de obra celebrados por el Instituto Nacional de Vías – INVIAS⁷⁹.

⁷⁹ Ibid., p. 43.

En estas especificaciones se contemplan los Artículos 400 y 450 los cuales describen:

✓ **Artículo 410 – 13**

Esta especificación se refiere al suministro de cemento asfáltico para la fabricación de mezclas asfálticas que se elaboren de conformidad con lo establecido en los Artículos correspondientes de estas especificaciones.

✓ **Artículo 450 – 13**

Mezclas asfálticas en caliente (Concreto asfáltico y Mezcla de Alto Modulo).

✓ **Artículo 414 -13**

Esta especificación se refiere al suministro de cemento asfáltico modificado con polímeros en el sitio de colocación de mezclas densas, semidensas y gruesas en caliente, mezclas de alto módulo, mezclas asfálticas discontinuas en caliente y mezclas drenantes.

Los ensayos de laboratorio a tener en cuenta se toman según los procedimientos a realizar en las normas INVIAS principalmente la norma correspondiente a ensayo Marshall (INVIAS E7-748-13), así mismo las normas INVIAS correspondiente a clasificación, granulometría y propiedades físicas de los materiales granulares y de las mezclas asfálticas, entre las cuales se encuentran:

- ✓ Ductilidad de materiales asfálticos (INV E-702-13).
- ✓ Punto de ablandamiento de anillo y bola (INV E-712-13).
- ✓ Penetración de los materiales asfálticos (INV E-706-13).
- ✓ Índice de alargamiento y aplanamiento (INV E-230).
- ✓ Porcentaje de caras fracturadas (INV E-227).
- ✓ Gravedad específica de agregado grueso.
- ✓ Gravedad específica de agregado fino.
- ✓ Azul de metileno (INV E-235-13).
- ✓ Abrasión en la máquina microdeval (INV E-238).
- ✓ Abrasión en la máquina de los ángeles (INV E-218 Y 219).
- ✓ Granulometría de agregados pétreos (INV E-213-214).
- ✓ Equivalente de arena (INV E-133).
- ✓ 10% de finos (INV E-224).
- ✓ Masa unitaria de agregados (INV E-224)
- ✓ Gravedad específica del cemento asfáltico
- ✓ Densidad Bulk (INV E-217).

7.5 ESTADO DEL ARTE

El uso de asfaltos para la adecuación de vías es una práctica que tiene sus orígenes en los principios del siglo XX, Cubides y Quijano⁸⁰ mencionan que este es utilizado principalmente como material para revestir carreteras e impermeabilizar o aislar estructuras, lo cual ha logrado que se constituya como un material de vital importancia en proyectos de construcción en vías pavimentadas.

Los primeros indicios de carreteras construidas datan alrededor del año 400 A.C. y consistían en calles pavimentadas con rocas, ubicadas en Iraq. Asimismo, Avellan⁸¹ esclarece que los productos asfálticos naturales han sido empleados por el hombre desde hace más de 700 años como impermeabilizantes. Antiguamente en Egipto elaboraban el asfalto para homogenizar las rocas, colocadas a lo largo de las vertientes de agua y así evitar la erosión.

Dentro de este orden de ideas se ve necesario una atención y desarrollo tecnológico adecuado frente a las circunstancias tanto ambientales, como a las políticas de transporte actual, puesto que el nivel de tránsito de vehículos en la actualidad demanda propiedades mecánicas y físicas que respondan adecuadamente a las nuevas condiciones de servicio.

En consecuencia, la modificación de asfaltos surge en la década de los 60's en Francia, Italia, Alemania y Estados Unidos, donde se elaboraron investigaciones para mejorar las propiedades mecánicas del asfalto y su duración. Carreño y Reyes⁸² tienen en cuenta que para garantizar una adecuada realización de la modificación se debe presentar; buena compatibilidad del asfalto con el modificador, es decir, debe ser miscible para obtener una mezcla monofásica. Un polímero es compatible con el asfalto cuando la mezcla no se puede apreciar visualmente.

Dentro de este marco Ramírez⁸³ alude que en la búsqueda de mejores características se han aplicado múltiples materiales tales como el caucho y el polvo de llanta entre otros, que proporcionen mejores propiedades físicas y mecánicas aumentando así su eficiencia operativa. En la rama de los materiales poliméricos se han estudiado diversas formas de estos elementos, las cuales al volverse un conjunto con el asfalto han arrojado resultados positivos.

⁸⁰ GUALTEROS, Daniel, et al. CUBIDES, Paula, et al. QUIJANO, Karen. Modificación De La Mezcla Asfáltica Con Polietileno. Bogotá D.C. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. Modalidad Proyecto de Investigación. 2016, p.3

⁸¹ AVELLAN, Martha. Asfaltos modificados con polímeros. Guatemala. Universidad de san Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Modalidad Proyecto de Investigación. 2007, p.29

⁸² CARREÑO, José y REYES, Eduardo. Estudio del efecto de aditivos reductores de temperaturas. Bogotá D.C. Universidad católica de Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. Modalidad Proyecto de Investigación. 2015, p.23

⁸³ RAMIREZ, Marcela. Pavimentos con polímeros reciclados. Envigado. Escuela de ingeniería de Antioquia. Facultad de Ingeniería. Modalidad Proyecto de Investigación. 2011, p.18

Es por esta razón que la implementación de asfaltos modificados con polímeros es una técnica que involucra bondades notorias en las mezclas asfálticas diseñadas, entregando a los pavimentos un mejor desempeño una vez se somete al efecto del tránsito y condiciones climáticas; sin embargo, los controles en los procesos de fabricación de mezcla y colocación en obra comúnmente no son los mejores para garantizar la conservación de los modificadores que se incluyen en estos asfaltos mejorados.

Aunado a la situación Casanova⁸⁴ precisa que los avances han generado cambios ambientales severos, como es el efecto invernadero, provocado por la emisión de CO₂ al ambiente, una de las principales fuentes de emisión de este gas es la producción de energía a partir de recursos no renovables, así como también la producción y aplicación de mezclas asfálticas en caliente.

Estos cambios sumados al incremento de la conciencia ambiental nos han llevado a buscar alternativas que Carreño⁸⁵ destaca, estas van de la mano con la regulación de las emisiones atmosféricas y un aporte a este proceso son las consideradas “mezclas tibias” que resultan de la implementación de los mencionados aditivos en el ligante.

En virtud de los resultados se desarrollaron las mezclas asfálticas en tibio en 1997 durante el tratado de KYOTO como respuesta a los gases del efecto invernadero, su producción involucra nuevas tecnologías a partir de los cuales es posible producir y colocar los concretos asfálticos a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales.

El objetivo de la implementación de las mezclas tibias es la producción de mezclas asfálticas con bajas temperaturas de mezclado y compactación lo cual aumenta la vida útil del pavimento, utilizando aditivos con ciertas características que favorecen su utilización en la producción de las mezclas asfálticas.

Dentro de esta perspectiva Ho y Zanzotto⁸⁶ intervinieron la modificación del asfalto con materiales de polietileno, una sustancia de desecho plástico importante, especialmente polietileno de baja densidad. Cuando se utiliza el polietileno de baja densidad (PEBD) reciclado en la modificación del asfalto, debemos considerar las propiedades del PEBD, tal como el peso molecular y la distribución del peso molecular.

⁸⁴ CASANOVA, Sandra Lorena y RODRIGUEZ, Paola. Caracterización física de ligantes asfálticos con cecabase para mezclas tibias. Bogotá DC: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería. Proyecto de grado para optar por el título de ingeniero civil. 2012, 32 p.

⁸⁵ CARREÑO y REYES, Op.cit., p.24.

⁸⁶ HO Susanna, et al. RONACA church, et al KLASSEN kristel, et al. BARKLEY law, et al. MACLEOD, daryl, et al. ZANZOTTO, ludo, et al. 2006. Study of recycled polyethylene materials as asphalt modifiers. Canadian Journal of Civil Engineering, 2006. Vol. 33, No. 8: pp. 968-981

Es así como de acuerdo con la proporción que se tenga, el polímero tendrá propiedades que responderán mejor como lo será la estabilidad de almacenamiento en caliente ya que al tener un polietileno con un bajo peso molecular y una mayor distribución de este, será un material más adecuado para su almacenaje ya que los tanques donde se guardan los asfaltos no disponen de mecanismos de homogenización continuos por tanto no será afectado y no disminuirá su desempeño al ser aplicado.

Por otra parte, se han planteado ensayos con el fin de encontrar un polímero que proporcione características más adecuadas frente a otros materiales como lo fue el que Giovanni Polacco, Berlincioni, Biondi, Jiri Stastna⁸⁷ hayan realizado pruebas a varios copolímeros basados en polietileno de baja densidad para así modificar un asfalto de grado de penetración 70/100 en destilación al vacío.

Entre los polímeros que fueron modificados, el polietileno de baja densidad permitió la preparación de una mezcla que tenía propiedades mecánicas sumamente mejoradas, con respecto a las del asfalto base. Por lo que la adición de polímeros ha demostrado ser la alternativa preferible si se quieren mejorar sustancialmente las propiedades mecánicas, en especial la recuperación elástica del material.

Aunado a esto Yildirim⁸⁸ propone una manera para aumentar el buen desempeño del producto, siendo el polímero combinado con el material asfáltico aportando ciertas características mecánicas, que incluyen: recuperación elástica, mayor temperatura de ablandamiento, mayor viscosidad, mayor fuerza cohesiva y mayor ductilidad; por otro lado, como asfalto o como agregado, el material plástico debe conferirle a la mezcla total un mayor rango de temperaturas de servicio, y tiempo de servicio, mayor resistencia al envejecimiento.

Ouyang y Wang⁸⁹ subrayan que los asfaltos modificados con polietileno de baja densidad tienen una estabilidad de almacenamiento a temperaturas de 165°C esta se ve mejorada si se prepara incorporando sílice en los compuestos de polietileno de baja densidad. No obstante, se ha evidenciado que el efecto de la sílice sobre la estabilidad de almacenamiento del asfalto a elevadas temperaturas afecta las propiedades reológicas, mecánicas dinámicas y las morfológicas de los asfaltos modificados.

⁸⁷ POLACCO, Giovanni, et al. BERLINCIONI Stefano, et al. BIONDI Darío, et al. STASTNA Jiri, et al. Zanzotto Ludovit et al. 2005. Asphalt modification with different polyethylene-based polymers. En: European Polymer Journal, 2005. Volume 41, Issue 12, Pages 2831-2844.

⁸⁸ Y, Yildirim. 2007. Polymer Modified Asphalt Binders. Construction and Building Materials, 2007: 66-72.

⁸⁹ OUYANG Chunfa, et al. WANG Shifeng, et al. Yong Zhang, et al. ZHANG Yinxi, Zhang et al. 2006. Low-density polyethylene/silica compound modified asphalts with high-temperature storage stability. Journal of Applied Polymer Science 2006, Volume 101, Issue 1 Pages 472-479

De esta manera, se ha encontrado que la relación polietileno de baja densidad / sílice en el compuesto tiene un gran efecto sobre la estabilidad de almacenamiento a altas temperaturas en el rango de 160°C - 165°C. Los asfaltos modificados son estables cuando la proporción de polietileno de baja densidad / sílice es alrededor de 100/60.

En efecto, el contenido de sílice en los asfaltos modificados deberá ser inferior al 3,2%, y tendrá una ligera influencia en las propiedades mecánicas de los asfaltos modificados. La sílice puede mejorar en cierta medida las propiedades reológicas del asfalto modificado. La estabilidad de almacenamiento a alta temperatura puede aumentarse mediante una diferencia de densidad decreciente entre el compuesto de polietileno de baja densidad / sílice.

Por otro lado, se han obtenido resultados positivos realizados por Hussein H. Mohammad H. I. Iqbal Wahhab Al-Abdul⁹⁰ que han evidenciado resultados prometedores relacionando el polietileno con otros materiales, también se ha estudiado el ligante de asfalto modificado mediante polietileno de baja densidad (LDPE) y polímeros de acetato de etilvinilo (EVA) para investigar las relaciones estructura-propiedad del asfalto modificado con polímero.

El asfalto modificado con polímero se preparó en una mezcladora de alto cizallamiento a 160°C, el tiempo de mezcla óptimo para cada polímero se determinó después de una investigación separada. No obstante, la influencia del polietileno de baja densidad y el contenido de acetato de vinilo se estudió mediante herramientas reológicas.

La modificación del polímero mejoró las propiedades reológicas del asfalto base. Se encontró que el acetato de etilvinilo en el asfalto modificado con polímero era menos sensible a la temperatura que los asfaltos modificados con polietileno de baja densidad.

Por otra parte, Luque y Solano⁹¹ han demostrado que a medida que se incrementa el contenido de polietileno de baja densidad (LDPE), se alteran las propiedades del ligante de la siguiente forma: se incrementa la consistencia, la temperatura de fluidez, la recuperación elástica torsional, y la viscosidad cinemática, y decrece la capacidad de elongación del material.

⁹⁰ HUSSEIN A, et al. H. Mohammad, H. I. Iqbal, et al. WAHHAB Al-Abdul, et al. 2005. Influence of Mw of LDPE and vinyl acetate content of EVA on the rheology of polymer modified asphalt. Springer-Verlag 2005, Volumen 45, Issue 1, pp 92-104

⁹¹ LUQUE, Hernando y RINCÓN, Álvaro José. 2011. Evaluación de las propiedades físicas de un cemento asfáltico 60/70 modificado con residuos de la fabricación de productos con polietileno de baja densidad. BOGOTA D. C. PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA, 2011.

Por tal motivo, análisis realizados por Carrillo y Méndez⁹² permiten esclarecer que los ensayos realizados a la mezcla convencional (sin el aditivo) y a la mezcla modificada (con los aditivos) mediante el método Marshall, logra evidenciar que el comportamiento de las propiedades presenta ciertas ventajas como el aumento a la rigidez al disminuir la temperatura de fabricación a 130°C ya que la cantidad de vacíos (18%-16%) de la mezcla disminuye significativamente, esto hace que la mezcla sea menos porosa por tanto más rígida.

Con base en resultados obtenidos por Rojas y Mendivelso⁹³ en el año 2015 en el cual mencionan que este tipo de mejoras encontradas en el asfalto, han evidenciado que el impacto ambiental causado por la producción de esta mezcla asfáltica modificada con PEBD es menor comparado con las mezclas convencionales debido a las temperaturas de mezclado y preparación del material, en su elaboración disminuyen hasta 30°C, indicadores como este son fundamentales a la hora del mezclado, su posterior colocación y compactación en obra.

En resumidas cuentas, en Colombia se están desarrollando nuevas técnicas de fabricación en las mezclas asfálticas, Arzayus y Villavon⁹⁴ demuestran que las elaboraciones de estas mezclas generan un gran beneficio económico para las plantas de asfalto al calentar los materiales a menor temperatura y así disminuir el desgaste de las plantas al trabajar con rangos menores. Los aspectos técnicos de la mezcla con desecho de polietileno de baja densidad permiten facilitar el proceso constructivo de compactación y también disminuir el impacto ambiental.

⁹² MÉNDEZ, Claudia y CARRILLO, Diego. 2016. Evaluación de la Resistencia bajo Carga Monotónica de una Mezcla Asfáltica Tibia Modificada con Husil y un Desecho de Polietileno de Baja Densidad (PEBD). BOGOTA D. C. Universidad distrital, 2016.

⁹³ ROJAS y MENDIVELSO, Op.cit., p.23.

⁹⁴ MENDEZ y CARRILLO, Op.cit., p.57.

8. METODOLOGÍA

Para obtener un análisis comparativo de las propiedades mecánicas y mitigaciones ambientales de una mezcla MDC-19 modificada con PEBD contra una mezcla convencional, se establece un punto de partida del tema, recopilando investigaciones dirigidas hacia la modificación de asfaltos con polietileno de baja densidad y así iniciar con una perspectiva de resultados ya evaluados y concluidos para tener estos como precedente, de esta manera se tiene una visión clara de lo que ya se ha expuesto en este tema.

Al iniciar con el proceso de diseño de mezcla se debe realizar previamente ensayos para la caracterización del material a emplear, por tanto, se siguen las especificaciones de INVIAS con los siguientes ensayos (ver tabla 7 y tabla 8):

✓ Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (INV. E-213), peso específico y absorción de agregados finos (INV. E-222), peso específico y absorción de agregados gruesos (INV. E-223), partículas fracturadas (INV. E-227), ensayo para medir el equivalente de arena (INV. E-133), índice de alargamiento aplanamiento (INV. E-230), Pérdida en ensayo de solidez utilizando sulfato de magnesio (INV. E-220), Micro Deval (INV. E-238) y 10% de finos (INV. E-224).

Tabla 6. Caracterización de agregados pétreos

Característica	Valor
Peso específico [-]	2,73
Equivalente de arena [%]	87
Caras fracturadas [%]	91
Índice de alargamiento [%]	6
Índice de aplanamiento [%]	9
Desgaste Micro Deval [%]	23,9
Resistencia al desgaste Máquina de los Ángeles [%]	22,7

Fuente. Los Autores

✓ Del mismo modo, al cemento asfáltico (60-70) se le realizan los ensayos típicos que exige la especificación INVIAS: penetración (INV. E-706), viscosidad absoluta (INV. E-715), ductilidad (INV. E-702), solubilidad en tricloroetileno (INV. E-713), contenido de agua (INV. E-704), punto de ablandamiento (anillo y bola) (INV. E-712) y ensayo de película delgada en horno rotatorio (RTFOT) (INV. E-720).

Tabla 7. Caracterización del cemento asfáltico

Característica	Valor
Ductilidad de materiales asfálticos 50mm/min [min]	120
Punto de Ignición y de llama mediante copa Cleveland [°C]	310
Punto de Ablandamiento de anillo y bola [°C]	43,5
Índice de Penetración 25°C, 100 g, 5 s [0.1 mm]	61
Gravedad Especifica de materiales asfálticos [-]	1,02

Fuente. Los Autores.

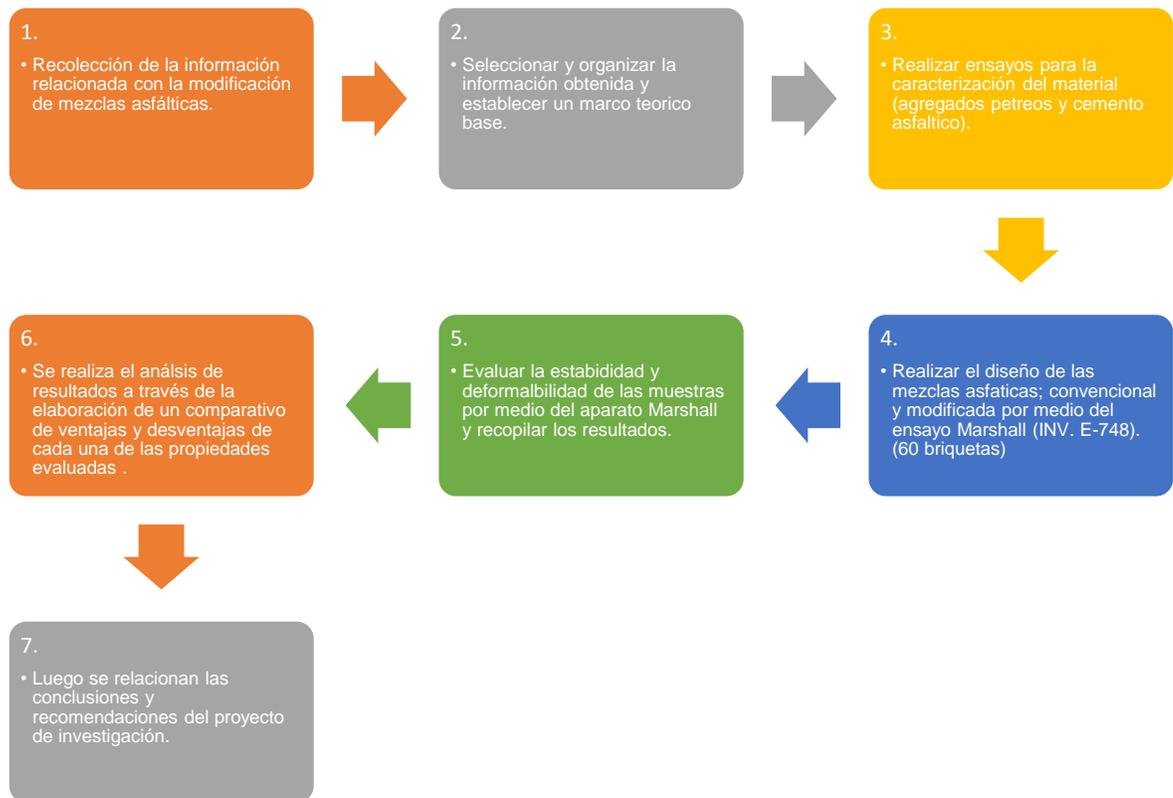
Inicialmente se realiza el ensayo Marshall sobre la mezcla convencional MDC-19 empleando porcentajes de asfalto de 4.5, 5.0, 5.5 y 6.0%, con el fin de realizar el diseño Marshall para determinar el contenido óptimo de asfalto. El ensayo que se realiza a la mezcla asfáltica es el de resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall (INV. E - 748).

Para el análisis y comparación de la modificación de asfalto es necesario la fabricación de 10 briquetas para cada una de las dosificaciones del polietileno de baja densidad, estas relaciones serán en PEBD/CA 0.5%, 1.0%, 1.5% y 2.0%. El tipo de polietileno (densidad 0.92 gr/cm³) será un residuo plástico (bolsas plásticas trituradas) generado por los desechos per cápita, estos obtenidos producto del reciclaje.

Durante el proceso de diseño para ocasionar el desarrollo de la resistencia de la mezcla asfáltica modificada, se genera en el cemento asfáltico una temperatura de 145+-5°C, posterior a esto se agrega el polímero a la mezcla por vía húmeda y también por vía seca como se hace usualmente que se integra a la mezcla previo calentamiento, de esta manera obteniendo la mezcla modificada y así determinar las alteraciones que se producen en comparación con la mezcla convencional en cuanto a factores de estabilidad y fluidez.

Otro factor importante es la energía empleada en su proceso de elaboración. Además, con estas variables se analiza que tan beneficioso es ambientalmente aplicar la técnica de modificación de asfaltos con polietileno de baja densidad, teniendo presente que se deben realizar acciones con el fin de reducir la huella ambiental humana.

Figura 6. Proceso metodológico empleado para el desarrollo del proyecto.



Fuente. Los Autores

9. RESULTADOS

9.1 MEZCLA ASFALTICA CONVENCIONAL MDC-19

En primera instancia se obtuvieron los resultados correspondientes al ensayo Marshall con el fin de definir el contenido óptimo de cemento asfáltico en la mezcla, y de esta manera realizar los diseños por vía húmeda y por vía seca para observar su comportamiento.

Tabla 8. Diseño Marshall CA 60-70 (4.5%)

CA 60-70 (4.5%)				
Estabilidad	Estabilidad [kg]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [kg/mm]
67	1373,66	150	3,81	360,54
67	1373,66	140	3,56	386,29
65	1332,66	150	3,81	349,78
65	1332,66	150	3,81	349,78
65	1332,66	150	3,81	349,78
65,80	1349,06	148,00	3,76	359,24

Fuente. Los Autores

En la tabla 9 están consignado los resultados obtenidos del ensayo Marshall cuando el contenido de cemento asfáltico es de 4.5 % en peso total de la mezcla asfáltica. Asimismo, se observa que la rigidez Marshall (estabilidad/flujo) tiene un valor promedio de 359,24 kg/mm. Este parámetro es fundamental para seleccionar el contenido óptimo.

Tabla 9. Diseño Marshall CA 60-70 (5.0%)

CA 60-70 (5.0%)				
Estabilidad	Estabilidad [kg]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [kg/mm]
70	1435,17	150	3,81	376,69
68	1394,17	155	3,94	354,12
69	1414,67	155	3,94	359,33
69	1414,67	155	3,94	359,33
71	1455,67	155	3,94	369,74
69,40	1422,87	154,00	3,91	363,84

Fuente. Autores

En la tabla 10 están consignado los resultados obtenidos del ensayo Marshall cuando el contenido de cemento asfáltico es de 5.0 % en peso total de la mezcla asfáltica. Asimismo, se observa que la rigidez Marshall (estabilidad/flujo) tiene un valor promedio de 363,84 kg/mm. Este parámetro es fundamental para seleccionar el contenido óptimo y su estabilidad (resistencia ante cargas constante) promedio es 1422,87 kg.

Tabla 10. Diseño Marshall CA 60-70 (5.5%)

CA 60-70 (5.5%)				
Estabilidad	Estabilidad [kg]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [kg/mm]
71	1455,67	160	4,06	358,19
70	1435,17	160	4,06	353,14
70	1435,17	160	4,06	353,14
72	1476,18	165	4,19	352,23
72	1476,18	160	4,06	363,23
71,00	1455,67	161,00	4,09	355,99

Fuente. Los Autores

En la tabla 11 están consignado los resultados obtenidos del ensayo Marshall cuando el contenido de cemento asfáltico es de 5.5 % en peso total de la mezcla asfáltica. Asimismo, se observa que la rigidez Marshall (estabilidad/flujo) tiene un valor promedio de 355,99 kg/mm. Este parámetro es fundamental para seleccionar el contenido óptimo y su estabilidad (resistencia ante cargas constante) promedio es 1455,67 kg.

Tabla 11. Diseño Marshall CA 60-70 (6.0%)

CA 60-70 (6.0%)				
Estabilidad	Estabilidad [kg]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [kg/mm]
64	1312,16	170	4,32	303,88
63	1291,65	165	4,19	308,20
61	1250,65	170	4,32	289,64
63	1291,65	170	4,32	299,13
65	1332,66	170	4,32	308,63
63,20	1295,76	169,00	4,29	301,90

Fuente. Los Autores

En la tabla 12 están consignado los resultados obtenidos del ensayo Marshall cuando el contenido de cemento asfáltico es de 6.0 % en peso total de la mezcla asfáltica. Asimismo, se observa que la rigidez Marshall (estabilidad/flujo) tiene un valor promedio de 301,90 kg/mm. Este parámetro es fundamental para seleccionar el contenido óptimo y su estabilidad (resistencia ante cargas constante) promedio es 1295,76 kg. Se observa que por encima del 5.5% de contenido de cemento asfáltico, los valores de estabilidad y rigidez Marshall disminuye, de igual manera presenta mayor deformación.

Tabla 12. Resumen promedio y corregido del ensayo Marshall

Resumen			Corregido		
CA [%]	Estabilidad [kg]	E/F [kg/mm]	Estabilidad [kg]	E/F [kg/mm]	Flujo [mm]
4,5	1349,06	359,24	1251,93	333,37	3,76
5,0	1422,87	363,84	1341,77	343,10	3,91
5,5	1455,67	355,99	1409,09	344,59	4,09
6,0	1295,76	301,90	1280,21	298,27	4,29

Fuente. Los Autores

En la tabla 13 se presenta el resumen de todos los resultados promedios obtenidos en el ensayo Marshall realizado para cada porcentaje de cemento asfáltico, con estos valores se relacionan los parámetros analizados en el ensayo (estabilidad, flujo y rigidez Marshall) comparada con cada uno de los porcentajes. Asimismo, en la tabla 14 se presentan los resultados de la densidad Bulk y porcentaje de vacíos presente en la mezcla asfáltica. Dichos parámetros también se relacionan en dos gráficos comparados con el porcentaje de cemento asfáltico.

Tabla 13. Densidad Bulk, porcentaje de vacíos y vacíos en AP

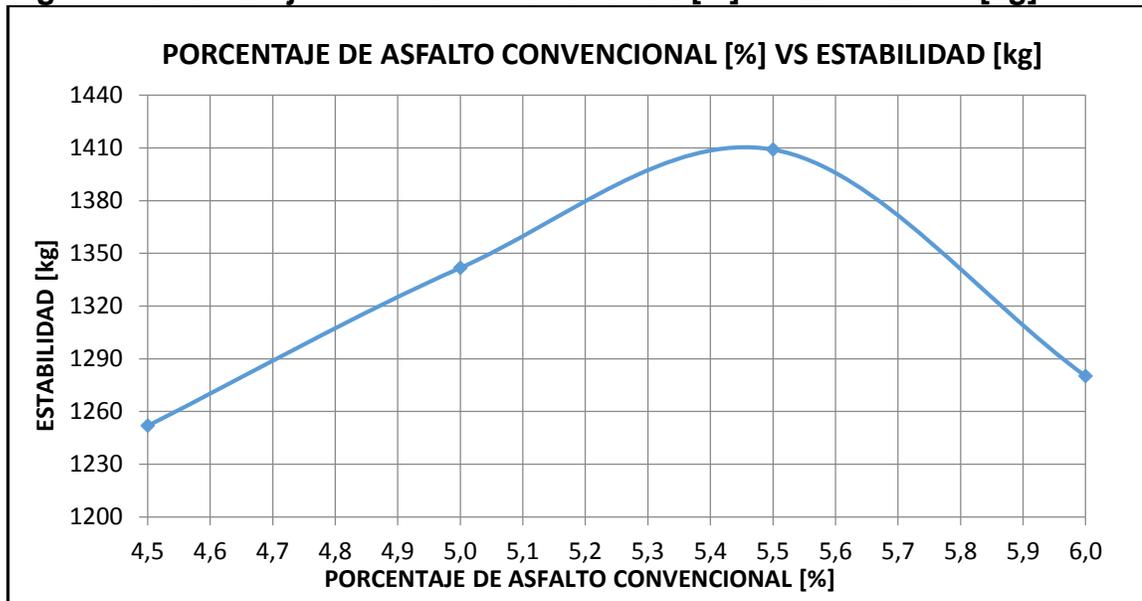
Densidad Bulk y Vacíos (superior)			
CA [%]	Densidad Bulk [g/cm ³]	Vacíos [%]	Vacíos en AP [%]
4,5	2,203	6,72	16,52
5,0	2,238	4,58	15,63
5,5	2,287	1,83	14,25
6,0	2,285	1,24	14,78

Fuente. Los Autores

En las figuras 7, 8 y 9 se presenta la relación de los parámetros (estabilidad, flujo y rigidez Marshall), con el fin de identificar los picos en la gráfica y establecer cuál de

los porcentajes presenta mayor estabilidad y menor deformación, a su vez la relación de estos parámetros permite determinar la rigidez Marshall, dicho valor es el parámetro más importante en el momento de seleccionar el contenido óptimo de cemento asfáltico.

Figura 7. Porcentaje de asfalto convencional [%] VS Estabilidad [kg]



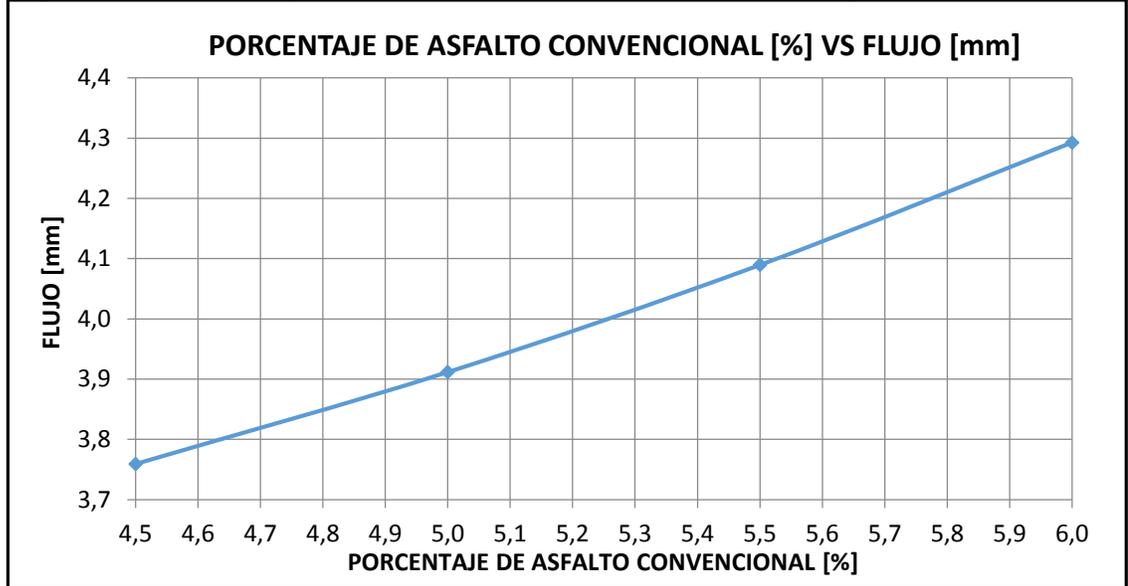
Fuente. Los Autores

El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador del cuadrante. En la figura 7 se presenta la relación de estabilidad comparado con los porcentajes de cemento asfáltico en la cual se observa que el porcentaje de asfalto que presenta una mejor resistencia ante la carga aplicada es el 5,5 % en la relación de peso.

En complemento, la figura 8 expone la deformación que sufre la briqueta al aplicar carga lentamente sobre ella, esta deformación es importante, porque permite predecir que tanto se puede evitar el problema de ahuellamiento al cual se va a ver enfrentado el pavimento al estar enfrentado a los esfuerzos del tránsito y la variación en la temperatura.

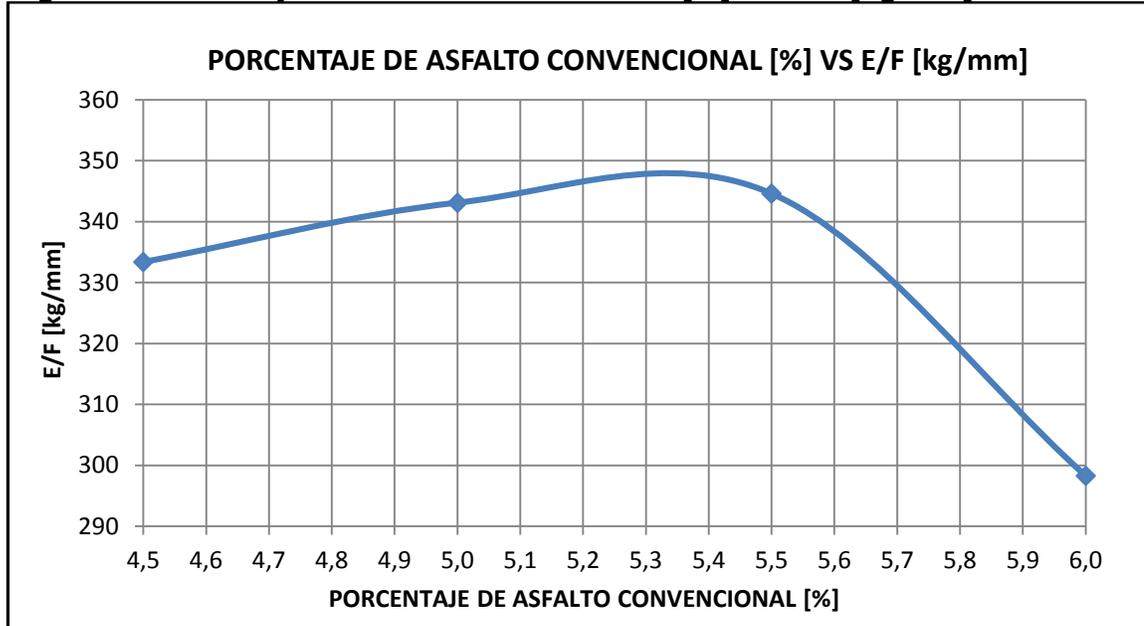
Seguidamente, en la figura 9 se establece una relación entre la capacidad que tiene la carpeta asfáltica de resistir las cargas del tránsito sin que se presenten deformaciones excesivas, a esto se le conoce como rigidez Marshall.

Figura 8. Porcentaje de asfalto convencional [%] VS Flujo [mm]



Fuente. Los Autores

Figura 9. Porcentaje de asfalto convencional [%] VS E/F [kg/mm]

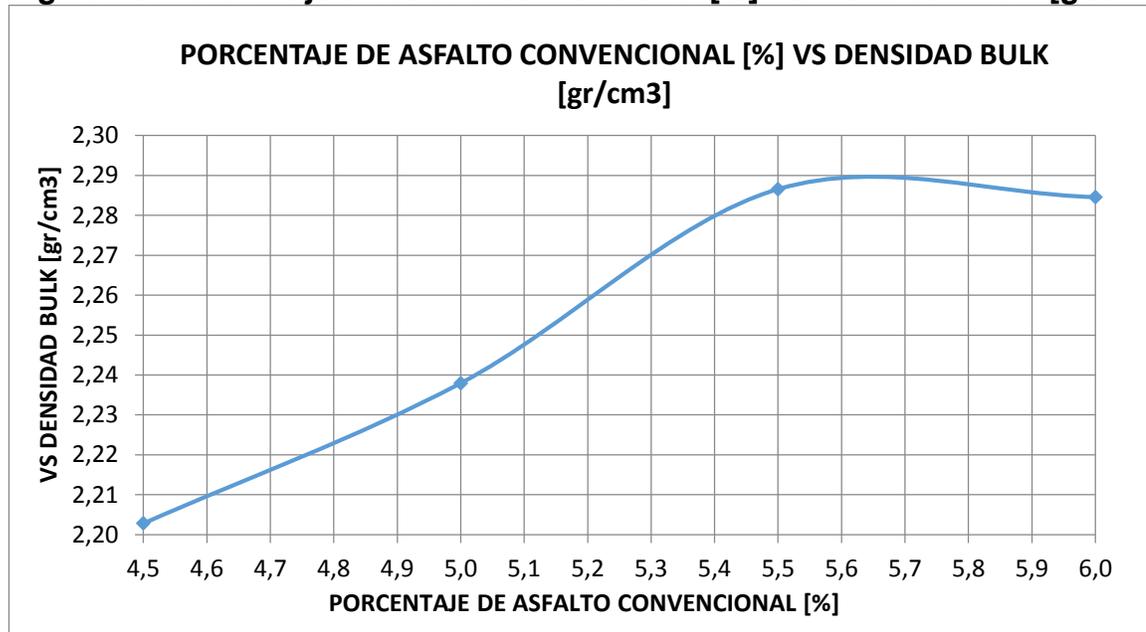


Fuente. Los Autores

El ensayo correspondiente a la densidad Bulk o también denominado peso unitario de la mezcla asfáltica, permite evaluar la briqueta de forma tal que se pueda utilizar

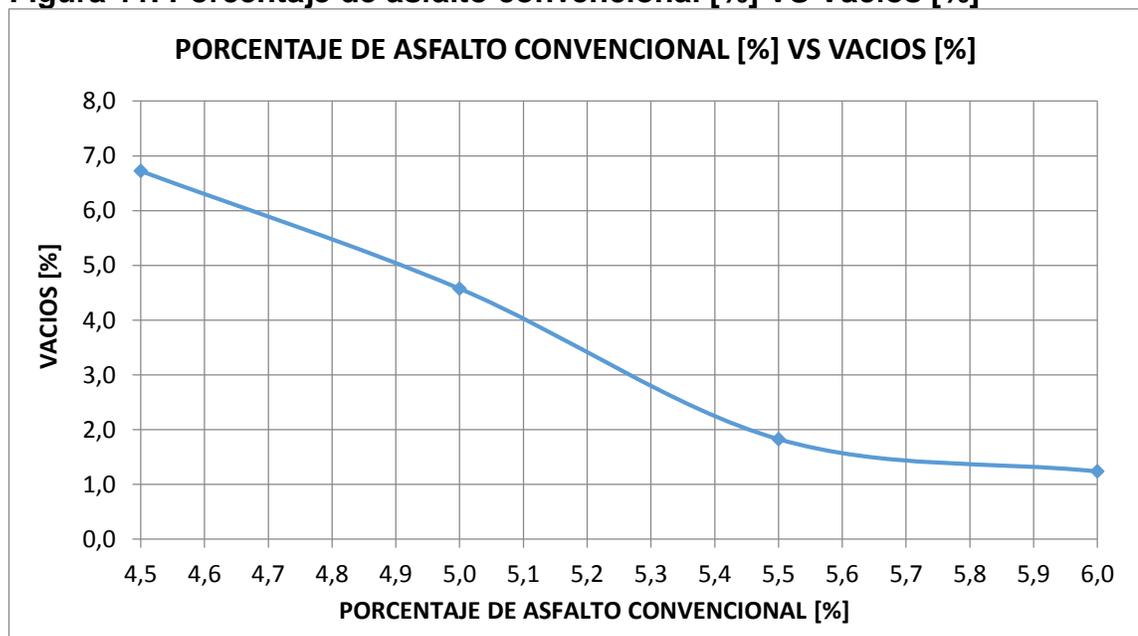
en la selección de del contenido óptimo de cemento asfáltico en la mezcla. Dicha densidad también permite establecer el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica.

Figura 10. Porcentaje de asfalto convencional [%] VS Densidad Bulk [gr/cm3]



Fuente. Los Autores

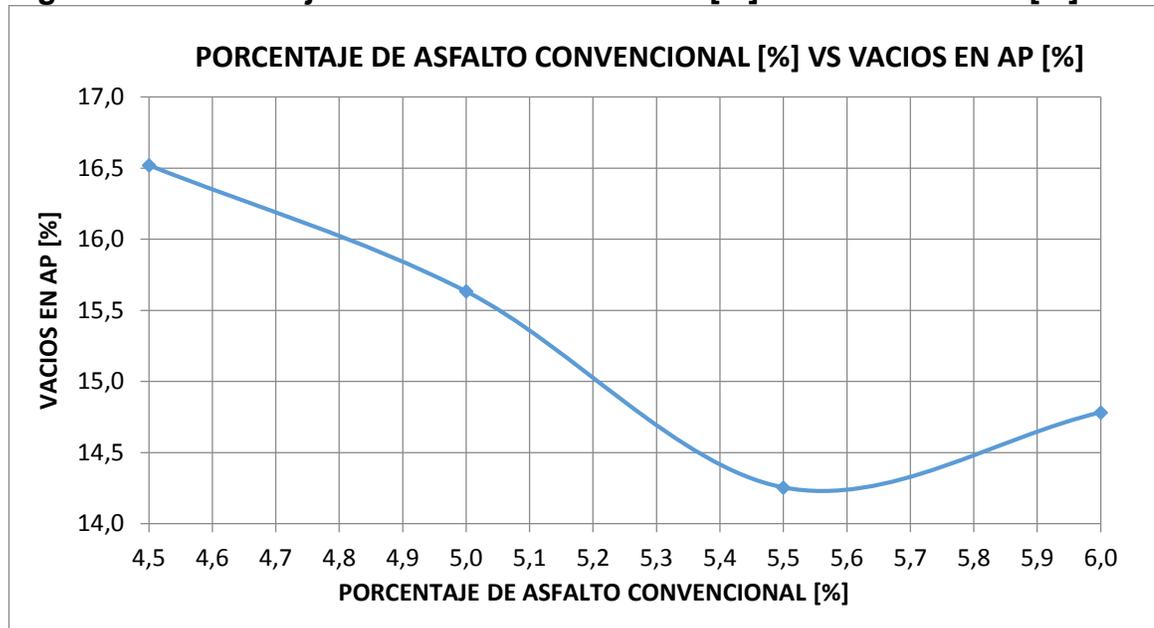
Figura 11. Porcentaje de asfalto convencional [%] VS Vacíos [%]



Fuente. Los Autores

El porcentaje de espacios vacíos en una mezcla asfáltica (véase figura 11 y figura 12) es usado como uno de los parámetros en los métodos de diseño y para la evaluación de la compactación en proyectos de pavimentación, además permite establecer que tan permeable será la carpeta asfáltica que se verá enfrentada a las inclemencias del clima.

Figura 12. Porcentaje de asfalto convencional [%] VS Vacíos en AP [%]



Fuente. Los Autores

9.2 MEZCLA ASFALTICA MDC-19 MODIFICADA CON PEBD-VÍA HÚMEDA

En esta parte se presentan los resultados obtenidos de realizar el ensayo Marshall (20 briquetas) a la mezcla modificada con polietileno de baja densidad, pero agregando el modificante por vía húmeda, lo cual consiste en mezclar el cemento asfáltico con el polímero previo al mezclado con los agregados. Del mismo modo se tienen en cuenta los parámetros analizados en la mezcla convencional (estabilidad, flujo y rigidez Marshall). Con estos parámetros se definen la variación que presenta la mezcla asfáltica al ser modificada con el desecho de polietileno.

El polietileno de baja densidad se agrega en diferentes relaciones de peso (PEBD/CA) con un contenido de cemento asfáltico del 5% previamente seleccionado en el ensayo Marshall realizado a la muestra convencional, sus resultados se presentan desde la tabla 15 a la tabla 18, los porcentajes analizados son; 0,5%, 1,0%, 1,5% y 2,0%.

Tabla 14. Diseño Marshall CA 60-70 (5.0%), Modificado con PEBD al 0.5%

CA 60-70 (5.0%) - 0.5% plástico				
Estabilidad	Estabilidad [kg]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [kg/mm]
78	1599,19	160	4,06	393,50
78	1599,19	150	3,81	419,74
80	1640,20	150	3,81	430,50
79	1619,69	160	4,06	398,55
80	1640,20	150	3,81	430,50
79,00	1619,69	154,00	3,91	414,56

Fuente. Los Autores

Tabla 15. Diseño Marshall CA 60-70 (5.0%), Modificado con PEBD al 1.0%

CA 60-70 (5.0%) - 1% plástico				
Estabilidad	Estabilidad [kg]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [kg/mm]
84	1722,21	160	4,06	423,77
88	1804,22	170	4,32	417,84
86	1763,21	170	4,32	408,34
87	1783,71	160	4,06	438,91
86	1763,21	160	4,06	433,86
86,20	1767,31	164,00	4,17	424,54

Fuente. Los Autores

Tabla 16. Diseño Marshall CA 60-70 (5.0%), Modificado con PEBD al 1.5%

CA 60-70 (5.0%) - 1.5% plástico				
Estabilidad	Estabilidad [kg]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [kg/mm]
86	1763,21	190	4,83	365,36
82	1681,20	180	4,57	367,72
84	1722,21	180	4,57	376,69
84	1722,21	180	4,57	376,69
81	1660,70	190	4,83	344,12
83,40	1709,91	184,00	4,67	366,11

Fuente. Los Autores

Tabla 17. Diseño Marshall CA 60-70 (5.0%), Modificado con PEBD al 2.0%

CA 60-70 (5.0%) - 2% plástico				
Estabilidad	Estabilidad [kg]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [kg/mm]
68	1394,17	230	5,84	238,65
65	1332,66	240	6,10	218,61
70	1435,17	240	6,10	235,43
67	1373,66	230	5,84	235,14
67	1373,66	230	5,84	235,14
67,40	1381,87	234,00	5,94	232,59

Fuente. Los Autores

Tabla 18. Resumen promedio y corregido del ensayo Marshall-Vía húmeda

Resumen			Corregido		
P [%]	Estabilidad [kg]	E/F [kg/mm]	Estabilidad [kg]	E/F [kg/mm]	Flujo [mm]
0,0	1422,87	363,84	1341,77	343,10	3,91
0,5	1619,69	414,56	1527,37	390,93	3,91
1,0	1767,31	424,54	1587,05	381,24	4,17
1,5	1709,91	366,11	1544,04	330,60	4,67
2,0	1381,87	232,59	1185,64	199,56	5,94

Fuente. Los Autores

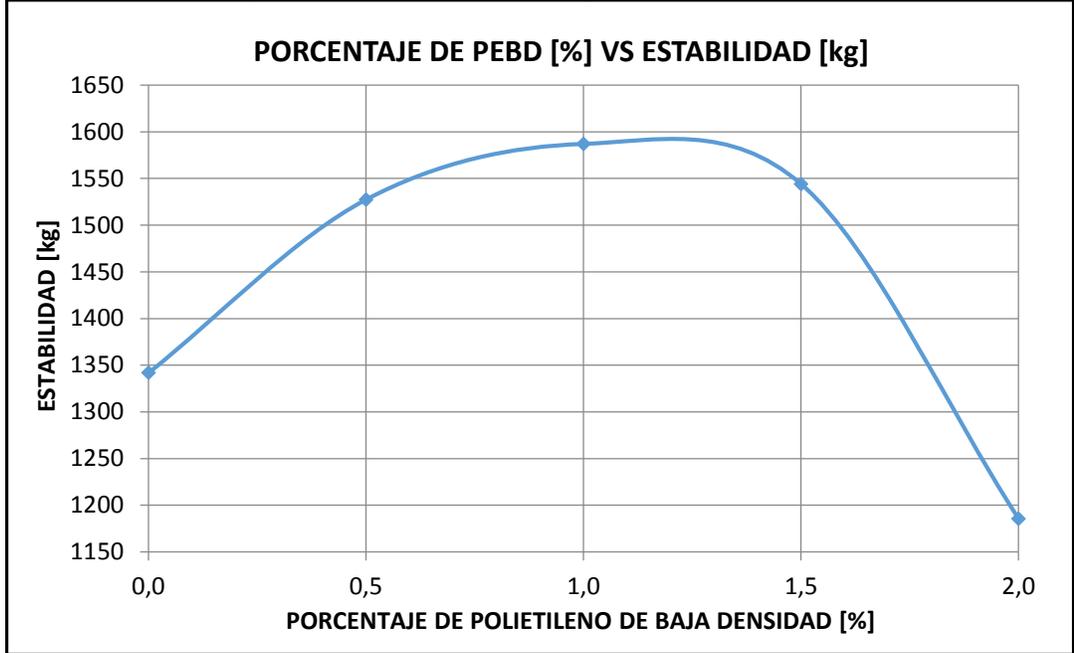
Tabla 19. Densidad Bulk, porcentaje de vacíos y vacíos en AP-Vía húmeda

Densidad Bulk y Vacíos (superior)-Vía húmeda			
CA [%]	Densidad Bulk [g/cm³]	Vacíos [%]	Vacíos en AP [%]
0,0	2,238	4,58	15,63
0,5	2,229	4,92	15,95
1,0	2,163	7,74	18,48
1,5	2,147	8,38	19,06
2,0	2,076	11,39	21,75

Fuente. Los Autores

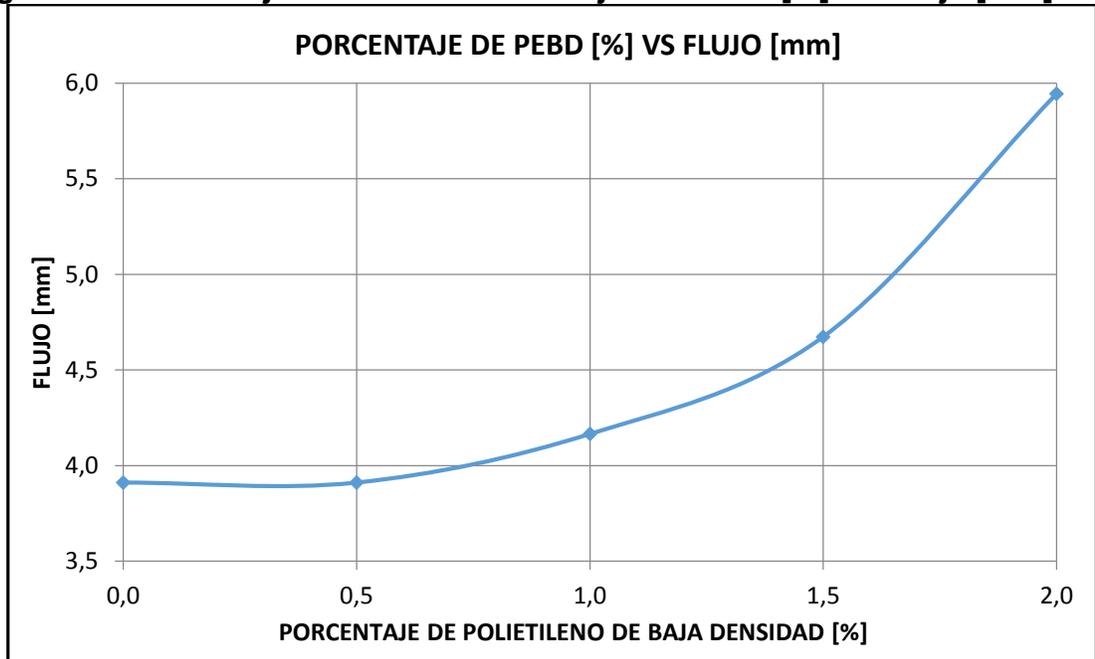
En la tabla 19 se presentan los resultados resumidos para cada una de las dosificaciones de polietileno de baja densidad estudiadas con el fin de realizar una serie de gráficos para cada propiedad analizada y así realizar la curva comparativa, entre el método de adición por vía húmeda y por vía seca.

Figura 13. Porcentaje de Polietileno de baja densidad [%] VS Estabilidad [kg]



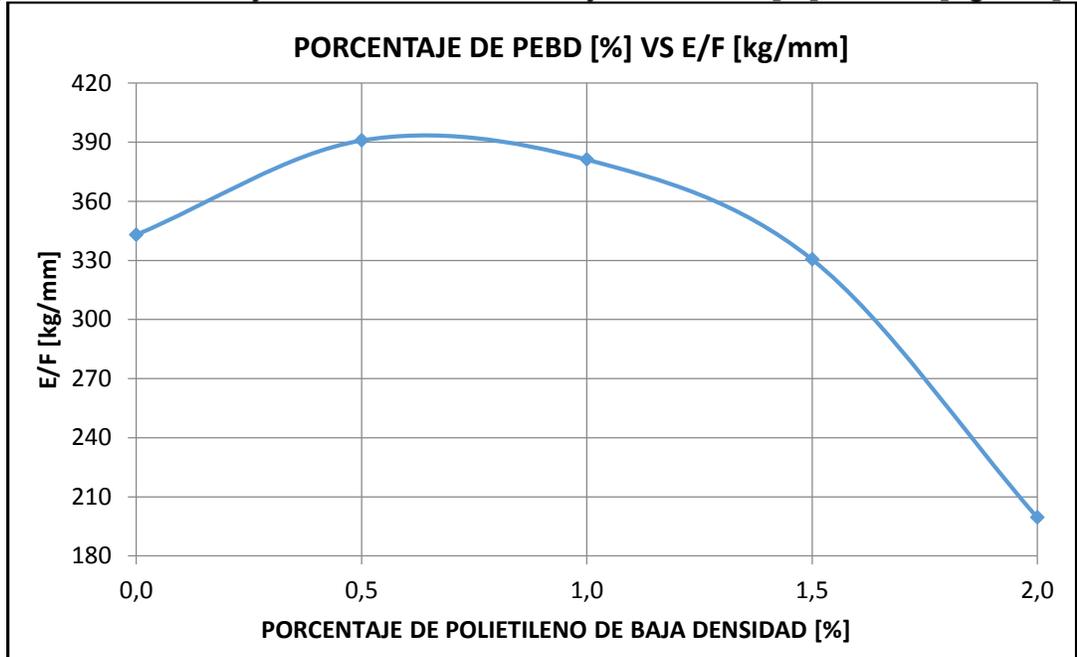
Fuente. Los Autores

Figura 14. Porcentaje de Polietileno de baja densidad [%] VS Flujo [mm]



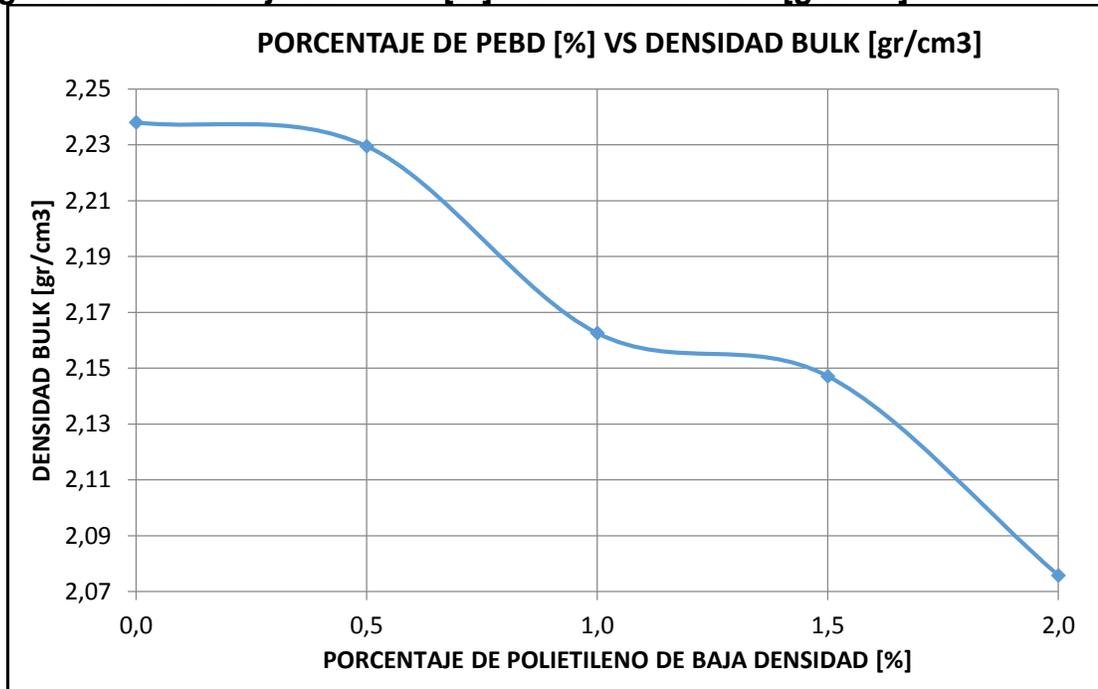
Fuente. Los Autores

Figura 15. Porcentaje de Polietileno de baja densidad [%] VS E/F [kg/mm]



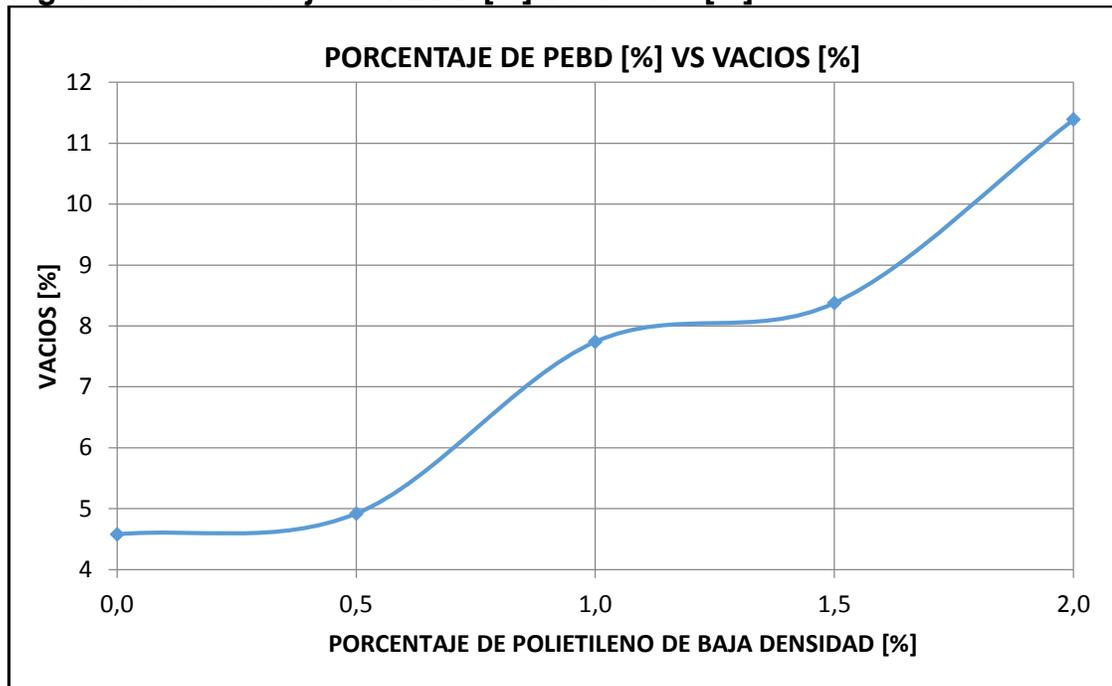
Fuente. Los Autores

Figura 16. Porcentaje de PEBD [%] VS Densidad Bulk [gr/cm3]



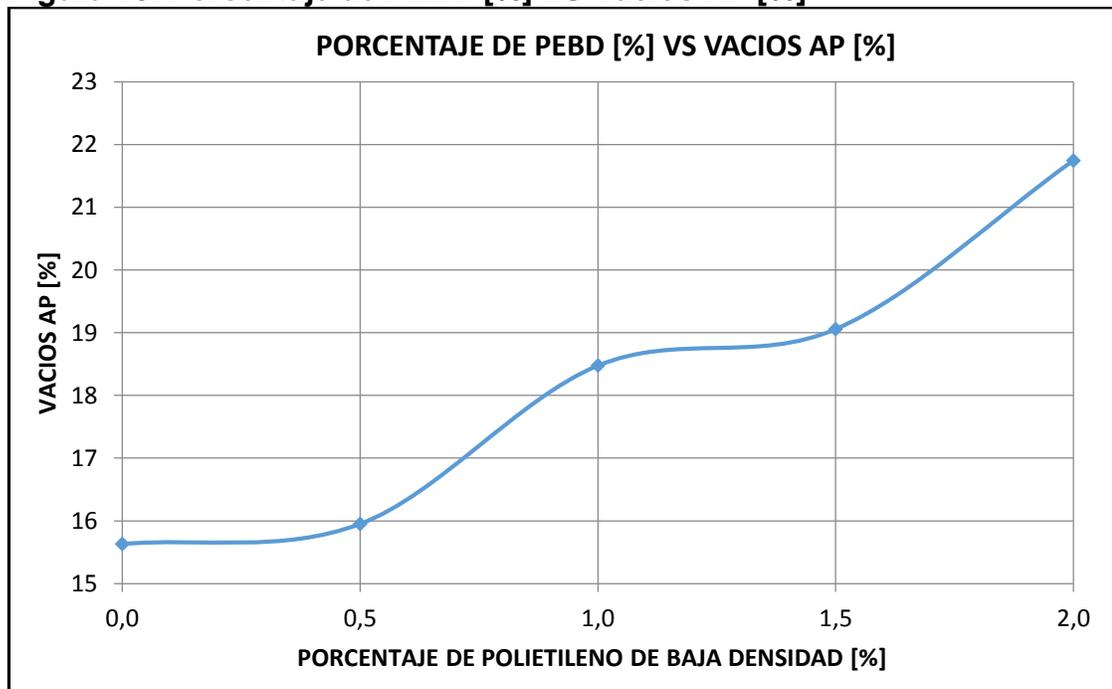
Fuente. Los Autores

Figura 17. Porcentaje de PEBD [%] VS Vacíos [%]



Fuente. Los Autores

Figura 18. Porcentaje de PEBD [%] VS Vacíos AP [%]



Fuente. Los Autores

9.3 MEZCLA ASFALTICA MDC-19 MODIFICADA CON PEBD-VÍA SECA

Se presentan los resultados al realizar el ensayo Marshall (20 briquetas) a la mezcla modificada con PEBD, pero agregando el modificante por vía seca, lo cual consiste en mezclar el cemento asfáltico con el polímero y los agregados pétreos al mismo tiempo asumiendo que el polímero se comporta como parte de los agregados. Asimismo, se tienen en cuenta los parámetros analizados en la mezcla convencional (estabilidad, flujo y rigidez Marshall). Con estos parámetros se definen la variación que presenta la mezcla asfáltica al ser modificada con el desecho de polietileno.

El polietileno de baja densidad se agrega en diferentes relaciones de peso (PEBD/CA) con un contenido de cemento asfáltico del 5% previamente seleccionado en el ensayo Marshall realizado a la muestra convencional, sus resultados se presentan desde la tabla 21 a la tabla 24, los porcentajes analizados son; 0,5%, 1,0%, 1,5% y 2,0%.

Tabla 20. Diseño Marshall CA 60-70 (5.0%), Modificado con PEBD al 0.5%

CA 60-70 (5.0%) - 0.5% plástico				
Estabilidad	Estabilidad [kg]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [kg/mm]
84	1722,21	170	4,32	398,84
85	1742,71	185	4,70	370,87
83	1701,70	175	4,45	382,84
86	1763,21	170	4,32	408,34
84	1722,21	180	4,57	376,69
84,40	1730,41	176,00	4,47	387,51

Fuente. Los Autores

Tabla 21. Diseño Marshall CA 60-70 (5.0%), Modificado con PEBD al 1.0%

CA 60-70 (5.0%) - 1% plástico				
Estabilidad	Estabilidad [kg]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [kg/mm]
95	1947,73	180	4,57	426,01
98	2009,24	180	4,57	439,47
100	2050,25	180	4,57	448,44
103	2111,75	175	4,45	475,09
99	2029,74	180	4,57	443,95
99,00	2029,74	179,00	4,55	446,59

Fuente. Los Autores

Tabla 22. Diseño Marshall CA 60-70 (5.0%), Modificado con PEBD al 1.5%

CA 60-70 (5.0%) - 1.5% plástico				
Estabilidad	Estabilidad [kg]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [kg/mm]
105	2152,76	200	5,08	423,77
107	2193,76	210	5,33	411,28
108	2214,27	220	5,59	396,25
108	2214,27	210	5,33	415,12
110	2255,27	220	5,59	403,59
107,60	2206,06	212,00	5,38	410,00

Fuente. Los Autores

Tabla 23. Diseño Marshall CA 60-70 (5.0%), Modificado con PEBD al 2.0%

CA 60-70 (5.0%) - 2% plástico				
Estabilidad	Estabilidad [kg]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [kg/mm]
95	1947,73	230	5,84	333,40
97	1988,74	230	5,84	340,42
93	1906,73	240	6,10	312,78
96	1968,24	230	5,84	336,91
96	1968,24	240	6,10	322,87
95,40	1955,93	234,00	5,94	329,28

Fuente. Los Autores

Tabla 24. Resumen promedio y corregido del ensayo Marshall-Vía seca

P [%]	Resumen		Corregido		
	Estabilidad [kg]	E/F [kg/mm]	Estabilidad [kg]	E/F [kg/mm]	Flujo [mm]
0,0	1422,87	363,84	1341,77	343,10	3,91
0,5	1730,41	387,51	1666,38	373,18	4,47
1,0	2029,74	446,59	1914,05	421,13	4,55
1,5	2206,06	410,00	2056,05	382,12	5,38
2,0	1955,93	329,28	1815,11	305,57	5,94

Fuente. Los Autores

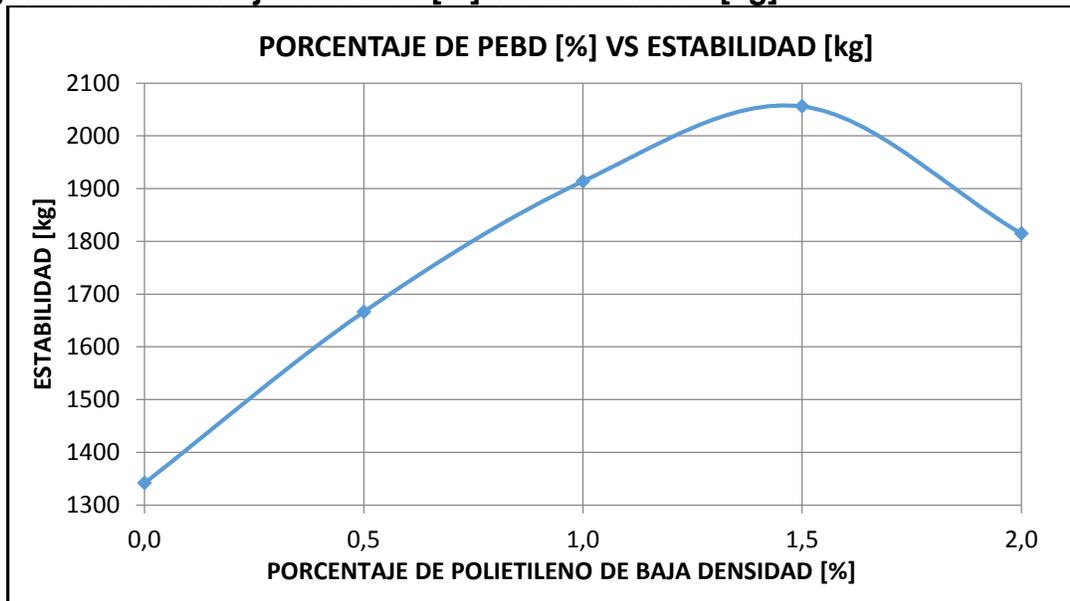
Tabla 25. Densidad Bulk, porcentaje de vacíos y vacíos en AP-Vía seca

Densidad Bulk y Vacíos (superior)-Vía seca			
CA [%]	Densidad bulk [g/cm³]	Vacíos [%]	Vacíos en AP [%]
0,0	2,238	4,58	15,63
0,5	2,251	4,01	15,15
1,0	2,227	4,99	16,04
1,5	2,218	5,35	16,38
2,0	2,182	6,84	17,73

Fuente. Los Autores

En la tabla 25 se presentan los resultados resumidos para cada una de las dosificaciones de polietileno de baja densidad estudiadas con el fin de realizar una serie de gráficos para cada propiedad analizada y así elaborar la curva comparativa, entre el método de adición por vía húmeda y por vía seca.

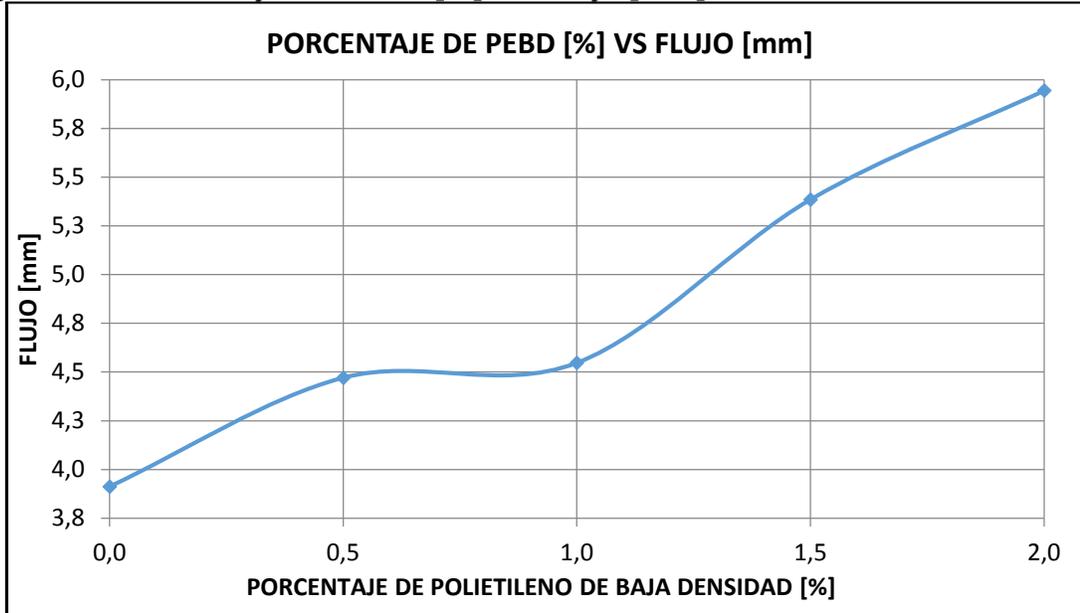
Figura 19. Porcentaje de PEBD [%] VS Estabilidad [kg]



Fuente. Los Autores

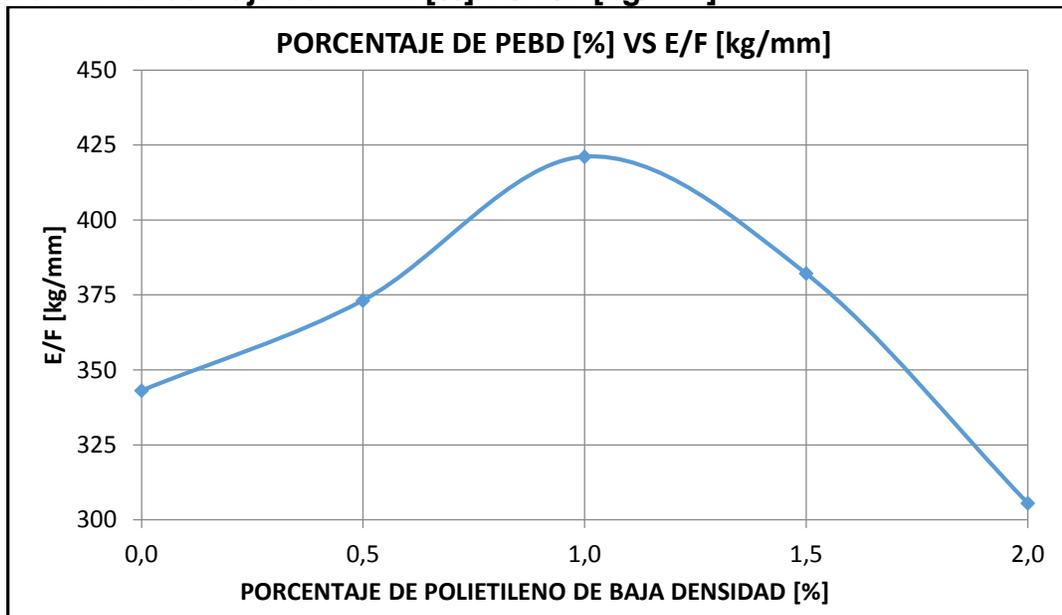
En la figura 19 se observa como la resistencia de la mezcla sube de manera precipitada por encima del rango de los 2000 kg, evidenciando que su incremento es del 21% con respecto a la convencional, sin embargo, hay que tener en cuenta el comportamiento del flujo con este mismo porcentaje del 1,5% (véase figura 20).

Figura 20. Porcentaje de PEBD [%] VS Flujo [mm]



Fuente. Los Autores

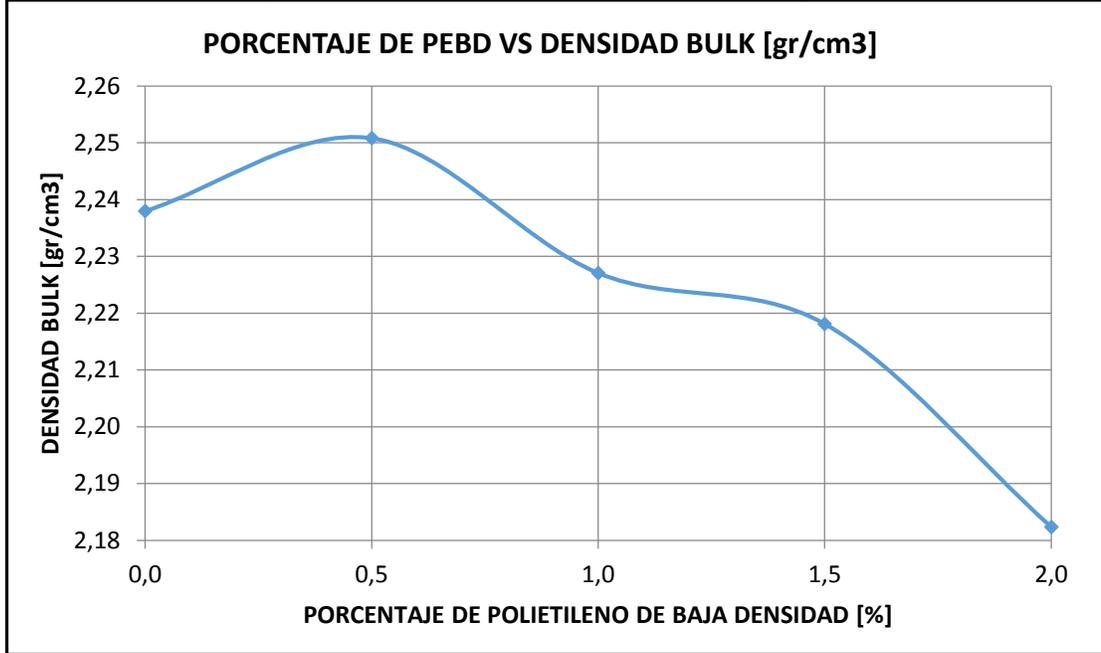
Figura 21. Porcentaje de PEBD [%] VS E/F [kg/mm]



Fuente. Los Autores

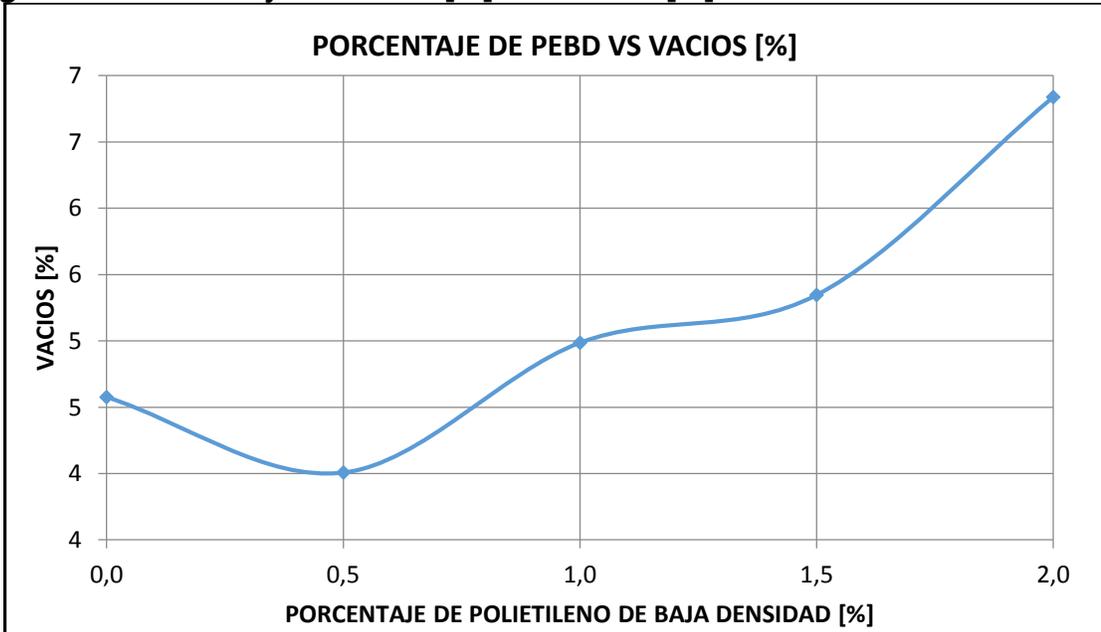
La rigidez Marshall aumenta significativamente al 1,0% de PEBD, esto ocurre debido a que el flujo disminuye en ese mismo porcentaje, haciendo que la relación entre la estabilidad y el flujo es proporcional, generando mayor resistencia.

Figura 22. Porcentaje de PEBD [%] VS Densidad Bulk [gr/cm³]



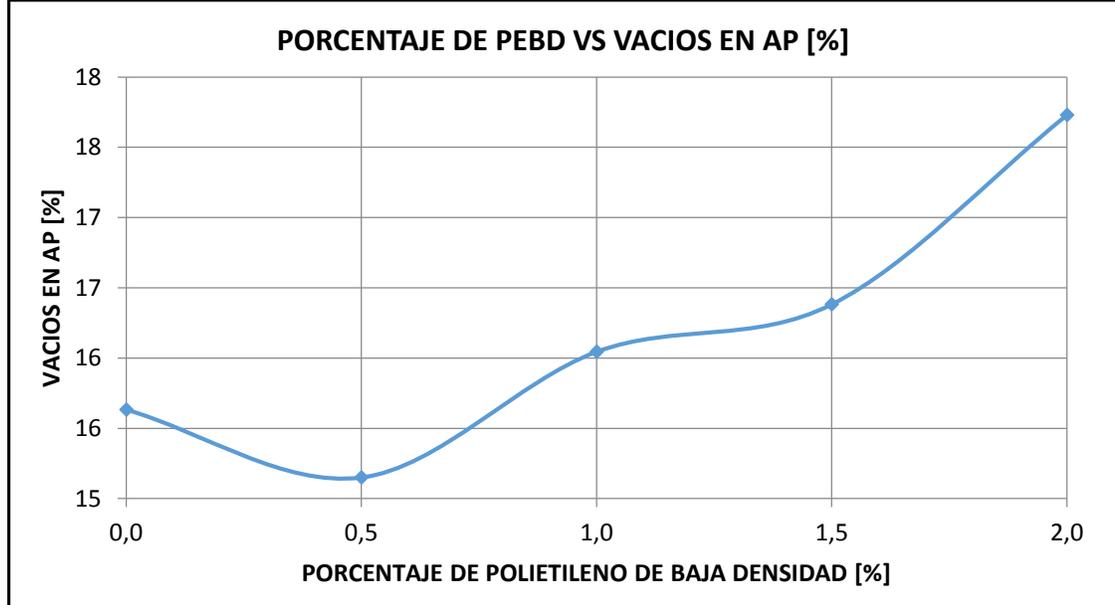
Fuente. Los Autores

Figura 23. Porcentaje de PEBD [%] VS Vacíos [%]



Fuente. Los Autores

Figura 24. Porcentaje de PEBD [%] VS Vacíos en AP [%]



Fuente. Los Autores

9.4 COMPARACIÓN MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA POR VÍA HÚMEDA Y POR VÍA SECA

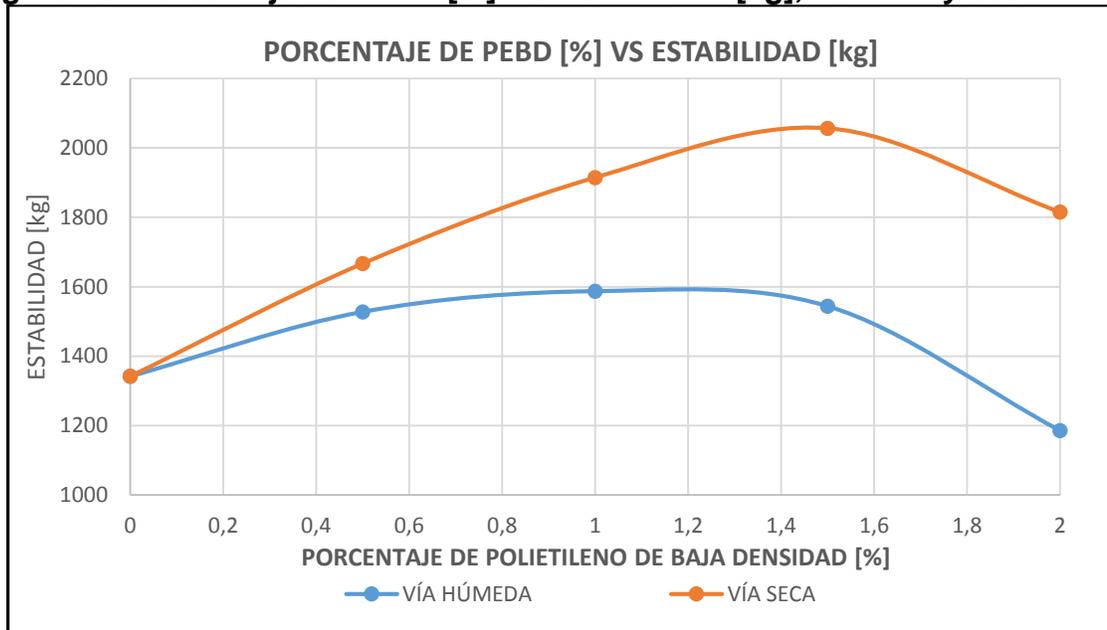
Es importante establecer una comparación en la variación de las propiedades al utilizar el método de vía húmeda y el método de vía seca, esto con el fin de definir la mejor forma de agregar el polímero a la mezcla asfáltica sin salirse de los parámetros establecidos por el INVIAS, en las figuras 25, 26 y 27 se presenta la comparación de las mezclas asfálticas evaluadas a diferentes dosificaciones de polietileno por ambos métodos utilizados.

Es importante tener en cuenta que el punto de partida cero en el porcentaje de polietileno se refiere al asfalto convencional seleccionado anteriormente a partir de esto se observa la variación en sus propiedades mecánicas estabilidad, flujo y rigidez Marshall. Además, la densidad es un factor importante para establecer la consistencia de la mezcla asfáltica y el porcentaje de vacíos presente en ella (véase tabla 28 y tabla 29).

Este último es uno de los parámetros que más se alteran en la mezcla modificada debido a las propiedades de adherencia del polímero, permitiendo más espacios entre los agregados pétreos y en cemento asfáltico, esto podría traer complicaciones de drenaje y socavación dentro de la estructura del pavimento. En

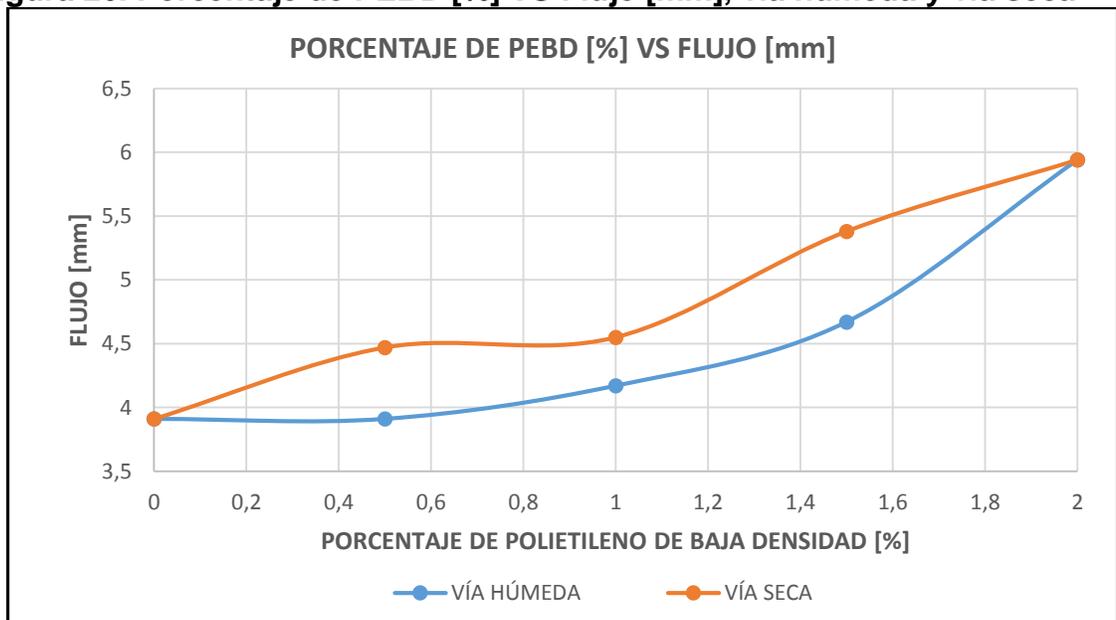
esta parte de los resultados se observa que el método por vía seca aumento sus propiedades en todos sus aspectos estructurales.

Figura 25. Porcentaje de PEBD [%] VS Estabilidad [kg], húmeda y seca.



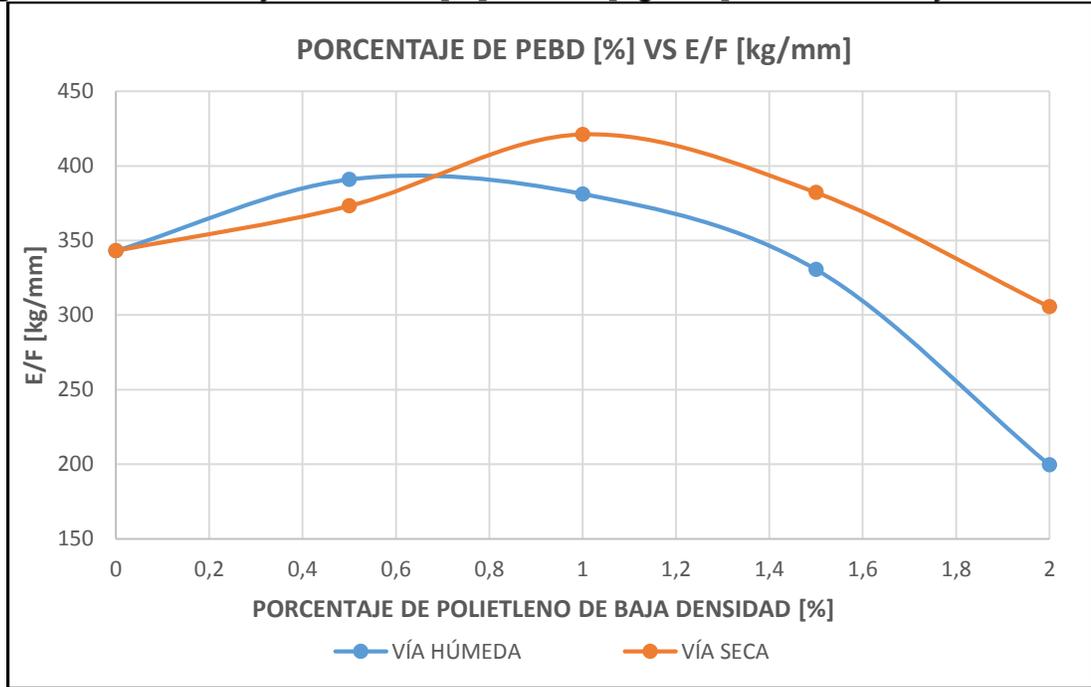
Fuente. Los Autores

Figura 26. Porcentaje de PEBD [%] VS Flujo [mm], vía húmeda y vía seca



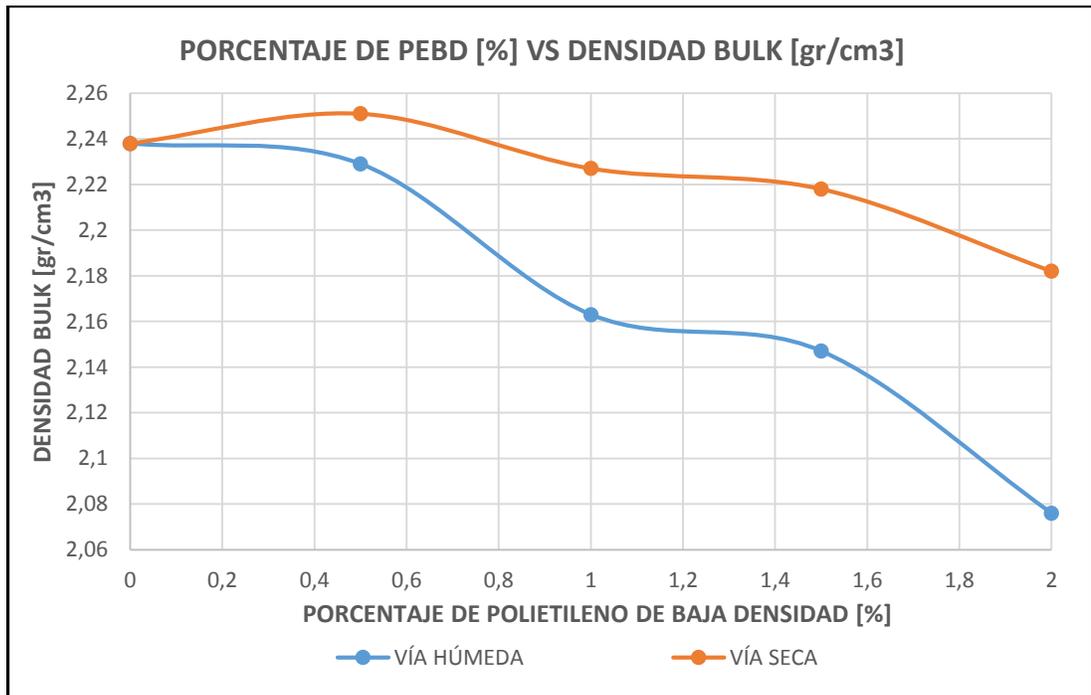
Fuente. Los Autores

Figura 27. Porcentaje de PEBD [%] VS E/F [kg/mm], vía húmeda y vía seca



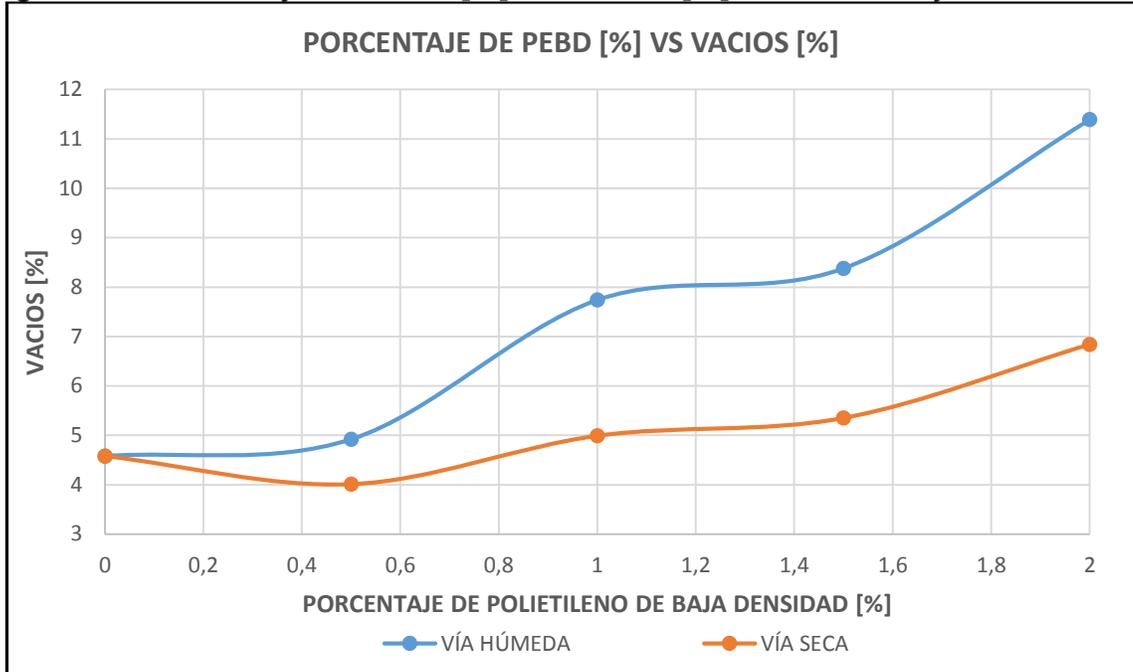
Fuente. Los Autores

Figura 28. Porcentaje de PEBD [%] VS Densidad Bulk [gr/cm³], húmeda y seca



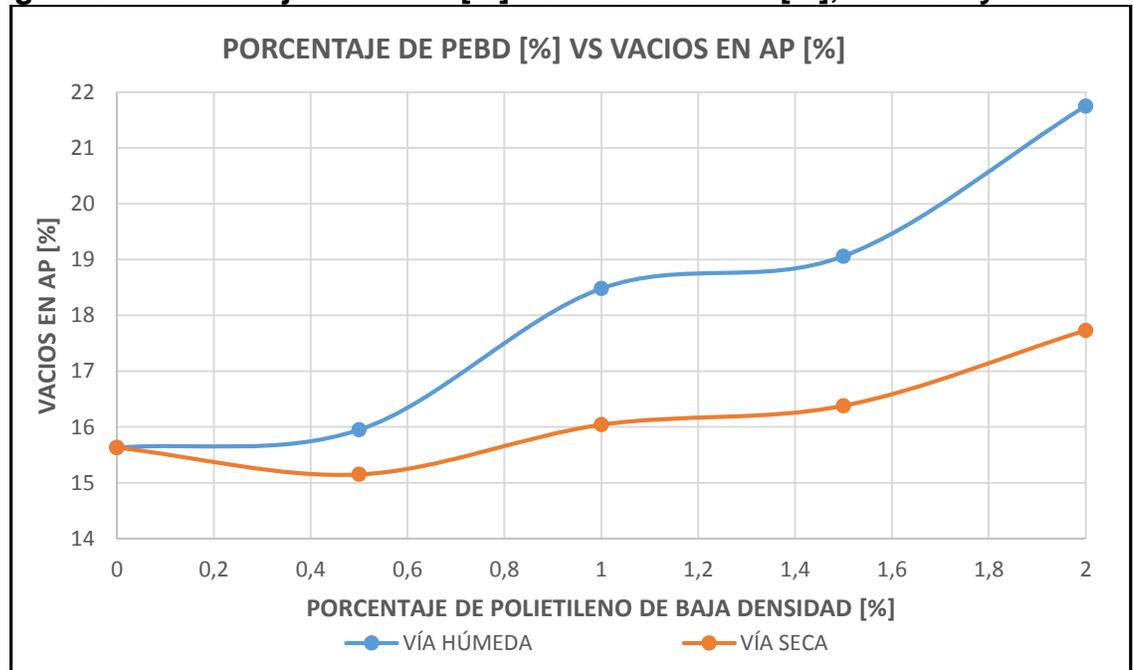
Fuente. Los Autores

Figura 29. Porcentaje de PEBD [%] VS Vacíos [%], vía húmeda y vía seca



Fuente. Los Autores

Figura 30. Porcentaje de PEBD [%] VS Vacíos en AP [%], húmeda y seca



Fuente. Los Autores

10. ANALISIS Y COMPARACIÓN

10.1 PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFALTO CONVENCIONAL

Como se observa en la figura 6, porcentaje de asfalto convencional vs estabilidad (véase figura 6) y la figura 8, porcentaje de asfalto vs estabilidad/flujo (véase figura 8) se observa claramente que el porcentaje óptimo de asfalto se manifiesta al 5.0%, debido a que los picos de las gráficas mencionadas están muy cerca del 5.0% de cemento asfáltico presente en la mezcla.

A su vez, el pico de la figura 9, porcentaje de asfalto convencional vs densidad Bulk (véase figura 9) se sitúa entre el 5.5% y el 6.0%, sin embargo, esta información no es suficiente para establecer el porcentaje óptimo entre estos dos valores. Por este motivo el criterio de selección se fundamenta en la estabilidad de la mezcla que nos da un valor aproximado de la resistencia a las cargas que deberá soportar el pavimento.

10.2 DISEÑO DE ASFALTO MODIFICADO POR VÍA HÚMEDA

En el diseño del asfalto modificado por vía húmeda se encuentra que el valor máximo de estabilidad se encuentra cercano a la dosificación PEBD/CA de 1.0%, con un valor de 1587,05 kg, también se observa que al 1.0% de PEBD el flujo tiene un valor de 4,17 mm, sin embargo, el porcentaje óptimo de PEBD por vía húmeda se establece en 0.5% debido a que la relación estabilidad/flujo que presenta mejor comportamiento está cercana al 0.5 %. Además, el porcentaje de vacíos tiende a subir al 1.0% y al 0.5% se sitúa por debajo del 5% de vacíos.

10.3 DISEÑO DE ASFALTO MODIFICADO POR VÍA SECA

En el diseño del asfalto modificado por vía seca se encuentra que el valor máximo de estabilidad se encuentra cercano al 1.5% de PEBD presente en la mezcla asfáltica con un valor de 2056,06 kg. También se observa que al 1.0% de PEBD el flujo presenta valores por debajo de 4,6 mm, teniendo como consecuencia en la relación de estabilidad/flujo mejor comportamiento al 1.0% de PEBD, de igual forma el porcentaje de vacíos para el 1.0% se sitúa cercano al 5%.

10.4 COMPARACIÓN ASFALTO MODIFICADO POR VIA SECA Y ASFALTO MODIFICADO POR VÍA HÚMEDA.

Como se observa en la comparación de método de vía húmeda y vía seca para mezclar el polímero con la mezcla asfáltica, se denota fácilmente que la mezcla

asfáltica modificada por vía seca presenta mejor comportamiento en cada una de sus propiedades (véase figura de la 25 a la 31).

Es importante resaltar que la estabilidad, flujo y relación estabilidad/flujo presentan mejor comportamiento asumiendo que el pavimento podrá resistir mayores cargas sin presentarse deformaciones excesivas. Por otra parte, la densidad bulk y el porcentaje de vacíos presente en la mezcla asfáltica modificada son inversamente proporcionales, es decir a mayor densidad menor porcentaje de vacíos.

El porcentaje de vacíos es importante a la hora de evitar filtraciones hacia el interior del pavimento, (véase figura 23 a la 25), sin embargo, debe existir un porcentaje de vacíos mínimos para evitar exudación. Todo esto está regulado por el instituto nacional de vías (INVIAS).

10.5 COMPARACIÓN MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL Y MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA POR VIA SECA.

De acuerdo a los valores arrojados en el diseño de la mezcla asfáltica modificada por vía seca (1.0% de PEBD) comparada con la mezcla asfáltica convencional (5.0% de CA), se observa que se ven mejoradas sus propiedades mecánicas, tales como la estabilidad, esta aumenta en un 42.65 %, el flujo aumenta en un 16,37%, la relación estabilidad/flujo aumenta en un 22.74%. Asimismo, sus propiedades físicas se vieron alteradas muy poco, es decir, la densidad Bulk disminuyó un 0,49%, sin embargo, el porcentaje de vacíos en AP aumento un 2,62%.

Por lo anterior cabe resaltar a manera general que la resistencia de la mezcla asfáltica aumento en un 23%, no obstante, el porcentaje de vacíos aumento, lo que quiere decir que el pavimento puede estar más expuesto a infiltración de fluidos al interior del pavimento, esto se ve reflejado al disminuir su densidad Bulk la cual se puede interpretar como disminución en la cohesión entre las partículas que conforman la mezcla asfáltica modificada.

11. CONCLUSIONES

✓ Se concluye que el método ideal para mezclar el modificador (trozos de bolsas plásticas) es el de post mezclado (vía seca), debido a que en los análisis se evidenció que todas sus propiedades variaron positivamente y en magnitud superior que por el método de vía húmeda (pre mezclado). Esto ocurre debido a que el polietileno de baja densidad presuntamente pierde propiedades al mezclarse previamente con el cemento asfáltico, causando pérdida de adherencia en el mezclado con los agregados pétreos.

Además, al adicionar el polietileno de baja densidad por vía seca (modificador como parte de los agregados), permite que el PEBD se adhiera simultáneamente al calentamiento del cemento asfáltico. Esto se comprueba debido a que la relación de vacíos no varía significativamente pero su resistencia aumenta y su deformación disminuye, esto provoca en la carpeta asfáltica mayor rigidez, sin disminuir su resistencia.

✓ La medida bajo la cual se fallaron las briquetas modificadas con polietileno se ve mejorada de manera importante con la adición de este aditivo (PEBD), teniendo así en la mezcla mejor desempeño, incluso superando el valor de estabilidad establecido por INVIAS de 15.000 N como mínimo (alto modulo) para tener un buen funcionamiento de la mezcla asfáltica, por tanto, la estabilidad de esta es superior (18.757 N) dando así una mayor resistencia a las cargas que recibe el asfalto.

El aumento de la estabilidad en un 25,04%, permite establecer mejor resistencia en el pavimento ante las cargas del tránsito que debe soportar, así mismo una reducción del 20% en posibles apariciones de grietas en la superficie de la carpeta asfáltica.

✓ De acuerdo al artículo 450 de la norma INVIAS, en la nota 2 de la tabla 450-10; criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall, especifica que, para mezclas elaboradas con asfaltos modificados con polímeros, se podrá aceptar un valor de flujo mayor (hasta 5.0 mm). Para tal efecto se encuentra que el valor del flujo de la mezcla asfáltica al modificarla con polietileno de baja densidad (4,55 mm) está dentro del valor máximo permitido por la norma (5 mm).

El valor en la deformación aumento en un 16% respecto a la mezcla convencional. Esto permite establecer que para que la mezcla sufra esta deformación necesita de mayores esfuerzos, pero si se encuentra sometida a menores esfuerzos su deformación disminuirá proporcionalmente.

✓ La norma INVIAS señala que, en cualquier caso, se deberá cumplir el requisito establecido en la respectiva columna de la tabla (450-10) para la relación Estabilidad/Flujo representado en kN/mm (3.0 a 6.0). Se concluye que este parámetro se cumple debido a que la relación E/F de la mezcla en kN/mm es de 4.13 kN/mm.

✓ La relación de estabilidad flujo representa el grado de ductilidad y fragilidad de la mezcla, este valor se ve mejorado con la adición de 1% de polietileno de baja densidad de tal forma que la aparición de fisuración temprana o ahuellamiento prematuro se verá menguada al situarse en un punto intermedio del rango señalado por INVIAS.

Cuando los valores de E/F están por encima del rango establecido por INVIAS, se presume que la mezcla asfáltica es susceptible a fallar porque presentara un comportamiento frágil (aparición de grietas en el pavimento), no obstante, si los valores de E/F están por debajo del rango establecido por INVIAS, se presume que la mezcla asfáltica es propensa a presentar deformaciones permanentes.

✓ La falla estructural ahuellamiento se mitigará debido a que la relación estabilidad permite asegurar que el pavimento será capaz de soportar cargas hasta de 18.757 N sin que se presenten deformaciones superiores a los 4,55 mm. Del mismo modo, la falla estructural agrietamiento se mitigará debido a que la mezcla asfáltica no se considera frágil al estar dentro del rango de relación E/F en (kN/mm) teniendo en cuenta que la mezcla se falló a una temperatura de 60° C.

✓ La relación de vacíos no se alteró considerablemente al estar en 4,99%, lo que quiere decir que la modificación tuvo un efecto neutral en este parámetro de servicio del pavimento, el cual determina que la relación de vacíos está en el rango (de 4% al 6%) establecido por INVIAS.

✓ La modificación de la mezcla asfáltica MDC-19 con polietileno de baja densidad, mejoro las propiedades mecánicas en un 23% respecto a la convencional MDC-19, determinando así que el desecho de polietileno presentado en trozos de bolsas plásticas puede ser utilizado como alternativa en la modificación de asfaltos con polímeros.

✓ El alcance de este proyecto limita los resultados y conclusiones desde la comparación de los métodos vía húmeda y seca, hasta la variación en las propiedades mecánicas (estabilidad y flujo) de la mezcla asfáltica modificada con PEBD, teniendo en cuenta los parámetros establecidos por INVIAS.

RECOMENDACIONES

Dado que no se realizó un estudio acerca de la temperatura de fabricación en función de la adición de polietileno, se recomienda realizar un estudio relacionado con esto, debido a que la variabilidad de la temperatura puede ser un parámetro determinante a la hora de analizar las ventajas ambientales que trae el adicionar PEBD sin desmejorar sus propiedades.

Debido a que algunos de los valores del asfalto modificado no cumplen con la normativa del INVIAS; para verificar dichos valores y constatar los resultados de la investigación, se requiere realizar un análisis dinámico para observar la deformación que presenta la briqueta cuando es sometida a una carga dinámica repetitiva, simulando una constante de tráfico y con esto poder observar el comportamiento mecánico de la mezcla de manera más detallada.

Es necesario hacer un análisis detallado de la preparación de la mezcla por vía seca, ya que este proceso de fabricación dio como resultado valores óptimos de la relación de estabilidad/flujo, por lo que profundizar acerca de esto daría un estado del conocimiento más completo en cuanto a métodos de preparación de mezclas modificadas.

Se recomienda revisar más a fondo la incompatibilidad que tienen los aditivos poliméricos con el asfalto ya que las macromoléculas del polímero presentan un gran peso molecular tornándose así más viscosa la mezcla, inhibiéndose de relacionarse con los componentes del asfalto por la poca miscibilidad entre ambos.

BIBLIOGRAFÍA

A.A. CUADRI, C y ROMAN, M. GARCÍA-MORALES, F. Guisado, E. MORENO, P. PARTAL. Formulation and processing of recycled low-density polyethylene modified bitumen emulsions for reduced-temperature asphalt technologies. En: Chemical Engineering Science. 2016. p. 34.

A.T. Papagiannakis y E.A. Masad. Pavement design and materials. 2 ed. Texas, Estados Unidos.: John Willy & Sons, 2017. 11 p. ISBN 978-0-471-21461-8.

ARENAS, Lozano Hugo León. Tecnología del cemento asfáltico. En: Revista de ingeniería. Abril 2006, 5ª. Edición. 2006. Pág. 281.

AVELLÁN CRUZ, Martha Dina. Asfaltos modificados con polímeros. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Civil. Trabajo de grado Ingeniera Civil. 2007, 91 p.

AWWAD, Mohammad y SHBEEB, Lina. The use of polyethylene in hot asphalt mixtures. Pavimentos flexibles: En: American Journal of Applied Sciences. Junio, 2007. Vol. 4, no. 390, p. 32.

BILMEYER, Fred. Ciencia de los polímeros. Editorial Reverté S.A. Propiedades de los polímeros y clasificación. Traducido por Areal Guerrero. 2004. 45 p. ISBN: 84-291-7048-0.

CAMARGO, Hugo y SUAREZ, Andrea. Diagnóstico de las nuevas tecnologías empleadas para el diseño de mezclas asfálticas densas en caliente MDC-2. Bogotá DC: Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de ingeniería. Monografía para optar por el título de especialista en pavimentos.

CAMPOS, Carlos, GUZMAN, Manuel y SANCHEZ, Rafael. Evaluación del desempeño de la carpeta de rodadura de mezcla asfáltica tibia en comparación con el de la mezcla asfáltica en caliente. Universidad del Salvador. Ciudad Universitaria. Facultad de ingeniería.

CARREÑO, Ricardo y REYES, Jesús. Estudio del efecto de aditivos reductores de temperaturas de trabajo, en el desempeño de mezclas bituminosas GAP-GRADED elaboradas con asfaltos modificados con grano de caucho reciclado. Bogotá DC: Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería. 2014, p. 44.

CASANOVA, Sandra Lorena y RODRIGUEZ, Paola. Caracterización física de ligantes asfálticos con cecabase para mezclas tibias. Bogotá DC: Pontificia

Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería. Proyecto de grado para optar por el título de ingeniero civil.

CATRIEL, Gisela. Reología en ligantes asfálticos. La Plata: Universidad Tecnológica Nacional. Facultad de ingeniería civil. Tesis para optar por el título de ingeniero civil. 2008, 2 p.

FIGUEROA INFANTE, Ana Sofía, FONSECA SALTANILLA, Elsa Beatriz y REYES LIZCANO, Freddy Alberto. Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado. En: Ing. Univ. Bogotá. Enero – junio de 2009. 47 p. ISSN 0123-2126.

FLORES, Daniel. Ensayo Marshall. [En línea] Bogotá D.C: SlideShare [Julio 18 de 2017]. Disponible en internet:< <https://es.slideshare.net/HERNIELO/ensayo-marshall>>.

<http://investigacion.lanamme.urc.ac.cr/sitionuevo/images/ca>, UNIVERSIDAD DE COSTA RICA. Laboratorio nacional de materiales y modelos estructurales. Mezclas asfálticas tibias. [En línea]. Bogotá D.C. [Citado el: 03 de marzo de 2017.] Disponible en internet:<.

<http://ub.edu/cmateriales/es/content/polietileno-de-baja-densidad.>, UNIVERSIDAD DE BARCELONA. 2009. Polietileno de baja densidad materiales. [En línea] octubre de 2009. [Citado el: 26 de febrero de 2017.].

<http://www.goodfellow.com/s/polietileno-baja-densidad.html.>, GOODFELLOW. Polietileno de baja densidad. [En línea] GOODFELLOW. [Citado el: 26 de febrero de 2017.]. Disponible en internet.

INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Especificaciones Técnicas Generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público en Bogotá D.C. – IDU ET 2005. Bogotá D.C.: El Instituto, 2005.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras INVIAS 2007. Bogotá D.C.: El Instituto, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras INVIAS 2012. Bogotá D.C.: Especificaciones técnicas y criterios de evaluación del ensayo Marshall, 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras INVIAS 2013. Bogotá D.C.: Artículo 450-13, 2014.

KWANG W. Kim, SEUNG JUN, Kweon, YOUNG S, Doh, y TAE-SOON, Park. Fracture toughness of polymer-modified asphalt concrete at low temperatures. En:

International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS. Diciembre, 2011. Vol. 11 no. 06. 43 p.

LEON DEL RIO, Christian Camilo y SEGURA LOPEZ, Jaime Andrés. Análisis del diseño de una mezcla asfáltica MDC-25 modificada con polietileno de baja densidad. Bogotá D.C: Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería civil. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil. 2007, p.34.

LOPERA PALACIO, Conrado Hernando. Diseño y producción de mezclas asfálticas tibias a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma (ELAEIS GUINEENSIS). Informe final de investigación para optar al título de Máster en Ingeniería Infraestructura. 2013, p.45.

LUQUE, Hernando y RINCÓN, Álvaro José. Evaluación de las propiedades físicas de un cemento asfáltico 60/70 modificado con residuos de la fabricación de productos con polietileno de baja densidad. Bogotá D.C: Pontificia universidad javeriana, Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil. 2013, p.23.

M. A, Shafii y M. Y, Abdul Rahman y J., Ahmad. Polymer Modified Asphalt Emulsion. Selangor, Malaysia: University Teknologi MARA. Facultad de ingeniería civil. Trabajo de grado para optar por el título de especialista en pavimentos. 2011, 43 p.

M. A. Shafii, M. Y. Abdul Rahman and J. Ahmad. Polymer Modified Asphalt Emulsion. Selangor, Malaysia: University Technology MARA. Facultad de ingeniería civil. Trabajo de grado para optar por el título de especialista en pavimentos, 2011. 43 p.

MAILA PAUCAR, Manuel Elias. Comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA). Ecuador. Quito: Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ingeniería. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil. 2008, p. 32.

MARIN HERNANDEZ, Alberto. Asfaltos modificados y pruebas de laboratorio para caracterizarlos. México D.F: Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería y Agricultura. Tesis para obtener el título de ingeniero civil, 2004.26 p.

MARTINEZ, Juan Camilo. Asfalto modificado. [En línea]. Bogotá: Cybertesis. [Citado el: 09 de marzo de 2017]. Disponible en internet:<http://cybertesis.urp.edu.po/urp/2009/martinez_jc/pdf/martinez_jc-TH.4.pdf>.

METAUTE, Diana Milena y CASAS, Daniel Mauricio. Desarrollo de una mezcla asfáltica utilizando residuos plásticos. Medellín: Universidad EAFIT. Departamento de ingeniería de procesos. Proyecto de grado para aspirar al título de ingeniero de procesos. 2009.

MIRANDA REBOLLEDO, Ricardo Javier. Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la ingeniería. Tesis para optar por el título de ingeniero constructor. 2010. 16 p.

MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras. 2 ed. Bogotá, Colombia y Universidad Católica de Colombia Ediciones y Publicaciones, 2002. 8 p. ISBN: 95896036-2-9.

MUNERA, Camilo. Modificación polimérica de asfaltos. Antioquía. Medellín: Universidad EAFIT. Memorias congreso internacional de materiales. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil. 2012, 25 p.

N-CMT-4-05-001/00. Materiales para Pavimentos, Calidad de Pavimentos Asfálticos. SCT. 1p.

OCELIC, Vesna y REK, V. Polymer modified bitumen Materials. Croacia: Universidad de Zagreb. Facultad de ingeniería química y tecnología. Tesis para optar por el título de ingeniero civil. 2013, 3 p.

OCHOA DIAZ, Ricardo. Diseño de mezclas bituminosas para pavimentos con alquitrán, usando metodología Marshall y Ramcode. Colombia, Bogotá D.C: Universidad pedagógica de Colombia. Facultad de ingeniería. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil. 2015, p. 14.

PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. México D.F: Universidad Politécnica de Cataluña. Facultad de ingeniería. Tesis para optar por el título de ingeniero civil. 2009, p.45.

PALOS, Artemio. PALOS, Artemio; SOUZA, Nandika Anne De; SNIVELY, Todd; REIDY, Richard. Modification of cement mortar with recycled ABS. En: Cement and Concrete research. Abril 2001. no. 31. p. 1003 – 1007.

POLACCO Giovanni, BERLINCIONI, Stefano, BIONDI, Darío, STASTNA Jiri y ZANZOTTO, Ludovit. Asphalt modification with different polyethylene-based polymers. En: Europa Polymer Journal. Julio. 2005. Vol 1., no. 41, p. 22.

RAMA LABRADOR, Francisco. Las carreteras y sus firmes. En: Cimbra. Julio, 2016. Vol. 6, no. 406, p. 21.

RAMOS, Rubén. Las carreteras y sus firmes. En: Cimbra. Agosto, 2010. Vol. 6, no. 382, p. 42.

Revista de la facultad de ingeniería. EPSILON. Bogotá D.C. 2007, No. 009 ISSN 1962 – 1259.

REYES LIZCANO, Fredy Alberto., FIGUEROA INFANTE, Ana Sofía. Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas. Síntesis de la investigación colombiana. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C., 2008. ISBN: 978-958-716-136-6.

REYES, Alberto, MADRID, Fernanda y SALAS, Ximena. Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómeros (tiras de bolsas de leche con asfalto 80-100). Mezclas asfálticas: En y Infraestructura Vial. Febrero, 2007. Vol. 2, no. 17, p. 16.

RICO RODRIGUEZ, Alfonso. Pavimentos flexibles, problemática, metodologías de diseño y tendencias. En: Instituto Mexicano de transporte. Enero, 1995. Vol. 2, no. 104, p. 32.

RODRIGUEZ, Yerson y SANABRIA, Wilfer. Modulo dinamico y deformacion permanente en mezclas asfalticas. Bogotá : Universidad Catolica de Colombia. Facultad de Ingenieria. Trabajo de grado para optar por el titulo de ingeniero civil, 2016.

ROJAS, Camilo y MENDIVELSO, Kevin. Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente tipo MDC-10 modificada con un desecho de polietileno de baja densidad. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería civil. 2014, p.16.

RONDÓN QUINTANA, Hugo Alexander y REYES LIZCANO, Fredy Alberto. Pavimentos: Materiales, construcción y diseño. Primera. Bogotá DC: ECOE Ediciones, 2015. p. 34-37. ISBN 978-958-771-175-2.

RONDÓN, Hugo, FERNÁNDEZ GÓMEZ, Wilmar y CASTRO LÓPEZ, William. Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa caliente modificada con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD). En: Revista Ingeniería de Construcción. Abril, 2010. Vol. 06.

SALINAS RETO, Patricia Inés. Aplicación de micropavimento usando asfalto modificado con polímero en la vía Sullana-Aguas Verdes. Piura, Perú: Universidad de PIURA. Facultad de ingeniería. Tesis para optar por el título de ingeniero civil. 2009, 36 p.

SANCHEZ SABOGAL, Fernando. Ingeniería de pavimentos en vías terrestres 2 ed. Vol. 2. Bogotá, Colombia: Editorial Limusa. 1977, 9 p. ISBN: 5675-909884-0098.

TALAVERA. RODRÍGUEZ, Rogelio; CASTAÑO MENESES, Victor Manuel; MARTÍNEZ MADRID, Miguel; HERNÁNDEZ PADRÓN, Genoveva. Desarrollo de aditivos para asfaltos modificados con bajos contenidos de hule. México. 2001. Publicación técnica No. 160. ISSN 0188-7297.

ULLOA CALDERÓN, Andrea. Programa de infraestructuras del transporte. En: Boletín técnico PITRA. Abril 2011, Vol. 2. no. 15. 10. p.

WAHR, Carlos y MONTENEGRO, Chistian. Comparación de diseños de pavimentos flexibles nuevos según el método de diseño AASHTO 93, la Normativa Chilena vigente y la guía de diseño de pavimentos empírico-mecánica. Pavimentos flexibles. 2006, p. 58.

WARDLAW, Kenneth y SCHULER, Scott. Polymer modified asphalt binders. Estados Unidos. ASTM, 1992. 361 p. ISBN 0803114133, 9780803114135.

WULF RODRIGUEZ, Fernando Andrés. Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de ciencias de la ingeniería. Tesis para optar al título de Ingeniero Constructor, 2008. 9 p.

YILDIRIM, Yetkin. Polymer modified asphalt binders. En: Construction and Building Materials. Agosto 2005. no. 21, p. 328 – 337.

ANEXOS

ANEXO 1. ENSAYO MARSHALL CONVENCIONAL MDC-19 (1)



PINZ - LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES
INTERV. - INSPECT. - LAB/TA - ING. CIVL.

ENSAYO MARSHALL (INV. E-748-13) - CONCRETO ASFÁLTICO

PROYECTO TESIS LUIS FERNANDO UNIVERSIDAD CATOLICA

TEMPERATURA DE MEZCLA 150°C

TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN 135° - 140°C

No. DE GOLPES POR CAPA 75 GOLPES

PROCEDENCIA AGREGADOS PETREOS CONCRESCOL Gs.A.PETREOS 2,57

TIPO DE CEMENTO ASFALTICO 60-70 Gs. ASFALTO 1,012

Briqueta No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tipo de Mezcla	MDC-19									
% Asfalto	4,5%	4,5%	4,5%	4,5%	4,5%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%
Altura Briqueta (cm)	6,7	6,7	6,7	6,7	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6
Paso briqueta en aire Seca (g)	1188	1187	1190	1186	1192	1192	1188	1185	1195	1184
Peso briqueta en aire SSS (g)	1195	1192	1198	1192	1199	1195	1190	1188	1198	1186
Peso briqueta en agua (g)	656	657	653	656	656	664	658	658	664	657
Lectura de carga (KN)	67	67	65	65	65	70	68	69	69	71
Flujo (1/100")	150	140	150	150	150	150	155	155	155	155

LA LECTURA DE CARGA SE DEBE MULTIPLICAR POR LA CONSTANTE DE CALIBRACION DEL ANILLO (45.1) PARA EXPRESAR LA ESTABILIDAD EN lb

OBSERVACIONES 1 A 5 = 4,5% ASFALTO

6 A 10 = 5% ASFALTO

Lab/ta

Ray. Saez S.

Reviso

PINZ LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES

Fuente. Los Autores

ANEXO 2. ENSAYO MARSHALL CONVENCIONAL MDC-19 (2)



PINZ - LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES
INTERV. - INSPECT. - LAB/TA - ING. CIVL.

ENSAYO MARSHALL (INV. E-748-13) - CONCRETO ASFÁLTICO

PROYECTO	TESIS LUIS FERNANDO UNIVERSIDAD CATOLICA		
TEMPERATURA DE MEZCLA	150°C		
TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN	135° - 140°C		
No. DE GOLPES POR CAPA	75 GOLPES		
PROCEDENCIA AGREGADOS PETREOS	CONCRESCOL	Gs.A.PETREOS	2,57
TIPO DE CEMENTO ASFALTICO	60-70	Gs. ASFALTO	1,012

Briqueta No.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tipo de Mezcla	MDC-19									
% Asfalto	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%
Altura Briqueta (cm)	6,4	6,5	6,5	6,5	6,5	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4
Paso briqueta en aire Seca (g)	1194	1191	1189	1190	1197	1188	1172	1185	1188	1184
Peso briqueta en aire SSS (g)	1196	1193	1191	1192	1199	1190	1173	1186	1189	1186
Peso briqueta en agua (g)	676	672	671	670	675	669	658	670	670	667
Lectura de carga (KN)	71	70	70	72	72	64	63	61	63	65
Flujo (1/100")	160	160	160	165	160	170	165	170	170	170

LA LECTURA DE CARGA SE DEBE MULTIPLICAR POR LA CONSTANTE DE CALIBRACION DEL ANILLO (45,1) PARA EXPRESAR LA ESTABILIDAD EN lb

OBSERVACIONES

11 A 15 = 5,5%

16 A 20 = 6%

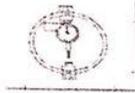
Lab/ta

Fay. Saez S.

Reviso

PINZ LAB
LABORATORIO

ANEXO 3. MEZCLA MODIFICADA POR VÍA HÚMEDA (1)



PINZ - LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES
INTERV. - INSPECT. - LAB/TA - ING. CIVL.

ENSAYO MARSHALL (INV. E-748-13) - CONCRETO ASFÁLTICO

PROYECTO	TESIS LUIS FERNANDO UNIVERSIDAD CATOLICA		
TEMPERATURA DE MEZCLA	150°C		
TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN	135° - 140°C		
No. DE GOLPES POR CAPA	75 GOLPES		
PROCEDENCIA AGREGADOS PETREOS	CONCRESCOL	Gs.A.PETREOS	2,57
TIPO DE CEMENTO ASFALTICO	60-70	Gs. ASFALTO	1,012

Briqueta No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tipo de Mezcla	MDC-19									
% Asfalto	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%
Altura Briqueta (cm)	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8
Paso briqueta en aire Seca (g)	1196	1186	1192	1190	1193	1192	1184	1194	1197	1195
Peso briqueta en aire SSS (g)	1200	1190	1196	1194	1197	1202	1192	1200	1203	1203
Peso briqueta en agua (g)	664	660	662	659	660	648	643	650	650	652
Lectura de carga (KN)	78	78	80	79	80	84	88	86	87	86
Flujo (1/100")	160	150	150	160	150	160	170	170	160	160

LA LECTURA DE CARGA SE DEBE MULTIPLICAR POR LA CONSTANTE DE CALIBRACION DEL ANILLO (45,1) PARA EXPRESAR LA ESTABILIDAD EN lb

OBSERVACIONES

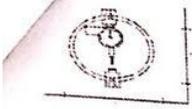
1 A 5 = 0,5% (PLASTICO) VIA HUMEDA

6 A 10 = 1% (PLASTICO) VÍA HUMEDA

Lab/ta fay. Lora

Reviso: PINZ LAB

ANEXO 4. MEZCLA MODIFICADA POR VÍA HÚMEDA (2)



PINZ - LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES
INTERV. - INSPECT. - LAB/TA - ING. CIVL.

ENSAYO MARSHALL (INV. E-748-13) - CONCRETO ASFÁLTICO

PROYECTO	TESIS LUIS FERNANDO UNIVERSIDAD CATOLICA		
TEMPERATURA DE MEZCLA	150°C		
TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN	135° - 140°C		
No. DE GOLPES POR CAPA	75 GOLPES		
PROCEDENCIA AGREGADOS PETREOS	CONCRESCOL	Gs.A.PETREOS	2,57
TIPO DE CEMENTO ASFALTICO	60-70	Gs. ASFALTO	1,012

Briqueta No.	VÍA HUMEDA									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tipo de Mezcla	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19
% Asfalto	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%
Altura Briqueta (cm)	6,8	6,8	6,7	6,8	6,8	7	7	7	7	7
Paso briqueta en aire Seca (g)	1188	1172	1190	1183	1180	1190	1188	1186	1191	1194
Peso briqueta en aire SSS (g)	1192	1176	1196	1188	1185	1206	1205	1202	1200	1202
Peso briqueta en agua (g)	642	630	640	636	635	632	630	632	629	626
Lectura de carga	86	82	84	84	81	68	65	70	67	67
Flujo (10-3)"	190	180	180	180	190	230	240	240	230	230

LA LECTURA DE CARGA SE DEBE MULTIPLICAR POR LA CONSTANTE DE CALIBRACION DEL ANILLO (45,1) PARA EXPRESAR LA ESTABILIDAD EN lb

OBSERVACIONES

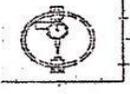
11 A 15 = 1,5% PLÁSTICO (VÍA HUMEDA)

16 A 20 = 2% PLÁSTICO (VÍA HUMEDA)

Lab/ta: fay. de la S.

Reviso: PINZ LAB B
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES

ANEXO 5. MEZCLA MODIFICADA POR VÍA SECA (1)



PINZ - LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES
INTERV. - INSPECT. - LAB/TA - ING. CIVL.

ENSAYO MARSHALL (INV. E-748-13) - CONCRETO ASFÁLTICO

PROYECTO tesis Luis Fernando (U Católica)
 TEMPERTURA DE MEZCLA 150°C
 TEMPERTURA DE COMPACTACIÓN 135°C - 140°C
 No. DE GOLPES POR CAPA 75 Golpes
 PROCEDENCIA AGREGADOS PETREOS COPACABANA Gs.A.PETREOS 2.52
 TIPO DE CEMENTO ASFALTICO 60-70 Gs. ASFALTO 1.012

VIA (Secca)

Briqueta No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tipo de Mezcla	MDC-19									
% Asfalto	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Altura Briqueta (cm)	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6
Peso briqueta en aire Secca (g)	1194	1190	1194	1193	1189	1194	1196	1188	1189	1157
Peso briqueta en aire SSS (g)	1186	1192	1196	1195	1192	1196	1198	1190	1191	1199
Peso briqueta en agua (g)	666	666	664	665	662	660	664	656	656	660
Lectura de carga	84	85	83	86	84	95	98	100	103	99
Flujo (1/100)	170	185	175	170	180	180	180	180	175	180

LA LECTURA DE CARGA SE DEBE MULTIPLICAR POR LA CONSTANTE DE CALIBRACION DEL ANILLO (45,1) PARA EXPRESAR LA ESTABILIDAD EN lb

OBSERVACIONES

1 a 5 = 0.5% (Plastico) (VIA Secca)
6 a 10 = 1% (Plastico) (VIA Secca)

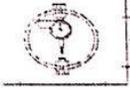
Lab/ta:

Fay. Leca S

Reviso:

PINZ LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES

ANEXO 6. MEZCLA MODIFICADA POR VÍA SECA (2)



PINZ - LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES
INTERV. - INSPECT. - LAB/TA - ING. CIVL.

ENSAYO MARSHALL (INV. E-748-13) - CONCRETO ASFÁLTICO

PROYECTO tesis Luis Fernando V. Católica.
 TEMPERTURA DE MEZCLA 150°C
 TEMPERTURA DE COMPACTACIÓN 135° - 140°C
 No. DE GOLPES POR CAPA 75 golpes.
 PROCEDENCIA AGREGADOS PETREOS CONCRESCOL. Gs.A.PETREOS 2.52
 TIPO DE CEMENTO ASFALTICO 60-70 Gs. ASFALTO 1.012.

VIA SECA

Briqueta No.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tipo de Mezcla	MOC-19-		MOC-19-		MO		C-19-		MOC-19-	
% Asfalto	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Altura Briqueta (cm)	6.7	6.7	6.6	6.6	6.7	6.7	6.6	6.7	6.7	6.7
Paso briqueta en aire Seca (g)	1190	1192	1192	1195	1191	1188	1192	1192	1192	1196
Peso briqueta en aire SSS (g)	1192	1194	1194	1198	1194	1190	1194	1196	1195	1199
Peso briqueta en agua (g)	656	658	656	658	657	646	648	650	649	650
Lectura de carga (KN)	105	107	108	108	110	95	97	93	96	96
Flujo (1/100")	200	210	220	210	220	230	230	240	230	240

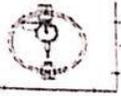
LA LECTURA DE CARGA SE DEBE MULTIPLICAR POR LA CONSTANTE DE CALIBRACION DEL ANILLO (45,1) PARA EXPRESAR LA ESTABILIDAD EN lb

OBSERVACIONES 11 a 15 = 1.5% plastico (VIA) Secca
16 a 20 = 2% plastico (VIA) Secca

Lab/ta: Fay. Lacerda S.

Reviso: PINZ LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES

ANEXO 7. DUCTILIDAD DE MATERIALES ASFÁLTICOS



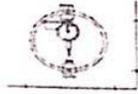
PINZ - LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES
INTERV. - INSPECT. - LAB/TA - ING. CIVL

TOMA DE DATOS MATERIALES ASFÁLTICOS					
INSTRUCTIVO DE ENSAYO: IE-AF1-02 / IE-AF1-03 / EI-AF1-05 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO: INV E 702-07 INV E 709-07 INV E 712-07					
CÓDIGO ORDEN: <u>Luis Fernando C.</u>			Fecha de Ensayo: <u>Agosto /2017</u>		
Referencia: <u>CA: 60-70</u>					
Descripción: <u>CONVENCIONAL</u>					
I. DUCTILIDAD DE MATERIALES ASFÁLTICOS (INV E -702-07)					
EQUIPO UTILIZADO (No de inventario)					
Ductilómetro <input checked="" type="checkbox"/>		Termómetro <input checked="" type="checkbox"/>		Baño María <input checked="" type="checkbox"/>	
PRUEBA No.	TEMPERATURA (°C)	VELOCIDAD (mm/min)	Probeta No. 1 (cm)	Probeta No. 2 (cm)	Probeta No. 3 (cm)
1	25.0	50	117	120	
2					
3					
OBSERVACIONES: _____					
II. PUNTO DE IGNICIÓN Y DE LLAMA MEDIANTE LA COPA ABIERTA CLEVELAND (INV E-709-07)					
EQUIPO UTILIZADO (No. De inventario)					
Equipo Copa Abierta de Cleveland <input checked="" type="checkbox"/>		Termómetro <input checked="" type="checkbox"/>			
PRUEBA No.		1	2	3	
	Temperatura del punto de ignición A [°F]	298°C			
	Temperatura del punto de llama A [°F]	310°C			
OBSERVACIONES: _____					
III. PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE ANILLO Y BOLA (INV E-712-07)					
EQUIPO UTILIZADO (No. De inventario)					
Aparato de Anillo y Bola <input checked="" type="checkbox"/>		Termómetro <input checked="" type="checkbox"/>		Baño María <input checked="" type="checkbox"/>	
Placa de Calentamiento <u>MECHERO</u>					
ANILLO No.		Líquido utilizado	Punto de ablandamiento (°C)		
1		AGUA DESTILADA	43.5°C		
2		AGUA DESTILADA	44.0°C		
OBSERVACIONES: _____					
 EJECUTO: LABORATORISTA			 REVISO: TECNOLOGO		

Archivo: AF-01_ Gravedad Especifica de materiales asfálticos sólidos y semisólidos-Método del picnómetro
Revisión: 09-04-06V1

7

ANEXO 9. GRAVEDAD ESPECÍFICA DE MATERIALES ASFÁLTICOS (2)



PINZ - LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES
INTERV. - INSPECT. - LAB/TA - ING. CIVIL

TOMA DE DATOS GRAVEDAD ESPECÍFICA DE MATERIALES ASFÁLTICOS SÓLIDOS Y SEMISÓLIDOS – MÉTODO DEL PICNÓMETRO		
INSTRUCTIVO DE ENSAYO: IE-AF1-01	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO: INV E 707-07	
CÓDIGO ORDEN: <u>Luis Fernando C.</u>	Fecha de Ensayo: <u>Agosto /2017</u>	
EQUIPO UTILIZADO (No de Inventario)		
Picnómetro: <u>✓</u>	Baño de Agua: <u>✓</u>	Balanza: _____
Termómetro: <u>✓</u>	_____	
Referencia: <u>CA: 60-70</u>		
Descripción: <u>CONVENCIONAL</u>		
PRUEBA No.	1	2
Temperatura de ensayo [°C]	25.1	
Peso del picnómetro (incluido el tapón), A [g]	32.081	
Peso del picnómetro con agua, B [g]	56.293	
Peso del picnómetro parcialmente lleno con asfalto, C [g]	44.735	
Peso de picnómetro con asfalto y con agua, D [g]	56.410	
Gravedad específica	1.02,25	
	1.012,25	
OBSERVACIONES: _____		

 EJECUTO: LABORATORISTA	 REVISO: TECNOLOGO	

Archivo: AF-01, Gravedad Especifica de materiales asfálticos sólidos y semisólidos-Método del picnómetro
Revisión: 09-04-06V1

Fuente. Los Autores

ANEXO 10. PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS AGREGADOS

	ENSAYO AGREGADOS PETREOS PORCENTAJE CARAS FRACTURADAS NORMA INV E-227
--	--

Descripción: COMBINACION AGREGADOS Fecha de muestra: MARZO DE 2017
 Fuente: CONCRESCOL Fecha de ensayo: MARZO DE 2017

COMBINACION AGREGADO GRUESO 3/4"

Tamices		Peso Material	Peso Particulas	% Particulas	% Retenido	Caras
Pasa	Retiene	fracción (A)	fracturadas (B)	fracturadas (C)	original (D)	Fracturadas E=(C+D)
1 1/2"	1"					
1"	3/4"	1140,0	1020,0	89,5	47,7	4268
3/4"	1/2"	1174,0	1075,0	91,6	50,4	4615
1/2"	3/8"	0,0	0,0	0,0	0,0	0
TOTALES :				181,0	95,1	8553
TOTAL PONDERADO =						91%

COMBINACION AGREGADO GRUESO 1/2"

Tamices		Peso Material	Peso Particulas	% Particulas	% Material	Caras
Pasa	Retiene	fracción A	fracturadas B	fracturadas C	retenido D	Fracturadas E=C+D
1 1/2"	1"					
1"	3/4"					
3/4"	1/2"	1239,0	1181,0	95,7	7,5	702,8
1/2"	3/8"	374,0	295,0	79,9	19,4	1551,0
TOTALES :				173,7	25,9	2253,7
TOTAL PONDERADO =						54%

Observaciones: Ensayos correspondientes a las muestras entregadas en el laboratorio.


 EJECUTO

PINZ LAB
 TORIOS - ING. CIVIL
 IT 19 214.315-3
 REVISO

Fuente. CONCRESCOL

10

ANEXO 11. ENSAYO AGREGADOS PETREOS EQUIVALENTE DE ARENA

ENSAYO DE AGREGADOS PETREOS EQUIVALENTE DE ARENA NORMA INV E-133			FECHA DE MUESTREO MARZO DE 2017	FECHA DE ENSAYO MARZO DE 2017
TIPO DE MATERIAL	AGREGADOS FINOS			
PROCEDENCIA DEL MATERIAL				
ARENA NATURAL				
PRUEBA No.	No. 1	No. 2	No. 3	
LECTURA DE ARCILLA (A)	4	4.1	4.2	
LECTURA DE ARENA (B)	3.6	3.9	3.9	
EQUIVALENTE DE ARENA (WPA%)	90	93	93	
PROMEDIO (%)				
ARENA TRITURACION				
PRUEBA No.	No. 1	No. 2	No. 3	
LECTURA DE ARCILLA (A)	4.2	4.2	4	
LECTURA DE ARENA (B)	3.5	3.1	3.3	
EQUIVALENTE DE ARENA (WPA%)	83	81	83	
PROMEDIO (%)				
COMBINACION AGREGADOS FINOS				
PRUEBA No.	No. 1	No. 2	No. 3	
LECTURA DE ARCILLA (A)	4.2	4.3	4.1	
LECTURA DE ARENA (B)	3.7	3.8	3.5	
EQUIVALENTE DE ARENA (WPA%)	88	86	85	
PROMEDIO (%)				
Observaciones : Ensayos correspondientes a las muestras entregadas en el laboratorio.				

RINZ LAB
 TOROS - ING. CIVIL
 T 19 214 315-3
 REVISO


 DIRECTO

ANEXO 12. INDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO AGREGADOS

	ENSAYO AGREGADOS PETREOS INDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO NORMA INV E-230
--	---

Descripción: AGREGADO GRUESO Fecha de muestra: MARZO DE 2017
 Fuente: CONCRESCOL Fecha de ensayo: MARZO DE 2017

INDICE DE APLANAMIENTO

Tamices		Peso Material	Peso Particulas	% Particulas	% Retenido	Particulas
Pasa	Retiene	Inicial (A)	Aplanadas (B)	Aplanadas (C)	original (D)	Aplanadas E=(C-D)
1 1/2"	1"					
1"	3/4"	1140,0	123,0	10,8	12,5	133
3/4"	1/2"	1174,0	135,0	11,5	17,2	195
1/2"	3/8"	0,0	45,0	0,0	9,0	0
TOTALES :				22,3	37,5	330
TOTAL PONDERADO =						9%

INDICE DE ALARGAMIENTO

Tamices		Peso Material	Peso Particulas	% Particulas	% Retenido	Particulas
Pasa	Retiene	Inicial (A)	Alargadas (B)	Alargadas (C)	original (D)	Alargadas E=C-D
1 1/2"	1"					
1"	3/4"	1140,0	108,0	9,5	9,6	90,9
3/4"	1/2"	1174,0	112,0	9,5	9,5	91,5
1/2"	3/8"	0,0	42,0	0,0	13,5	0,0
TOTALES :				19,0	32,6	182,5
TOTAL PONDERADO =						6%

Observaciones : Ensayos correspondientes a las muestras entregadas en el laboratorio


 EJECUTO

PINZ L 3
 LABORATORIOS - ING. CIVIL
 NIT. 19.214.315-3

REVISO

Fuente. CONCRESCOL

ANEXO 13. GRANULOMETRIA DE AGREGADOS PETREOS INVIAS-E 213-214

GRANULOMETRIA DE AGREGADOS PETREOS INVIAS-
E- 213-214

Fecha de muestra
MARZO DE 2017

Fecha de ensayo
MARZO DE 2017

TIPO DE MATERIAL
GRAVA 3/4

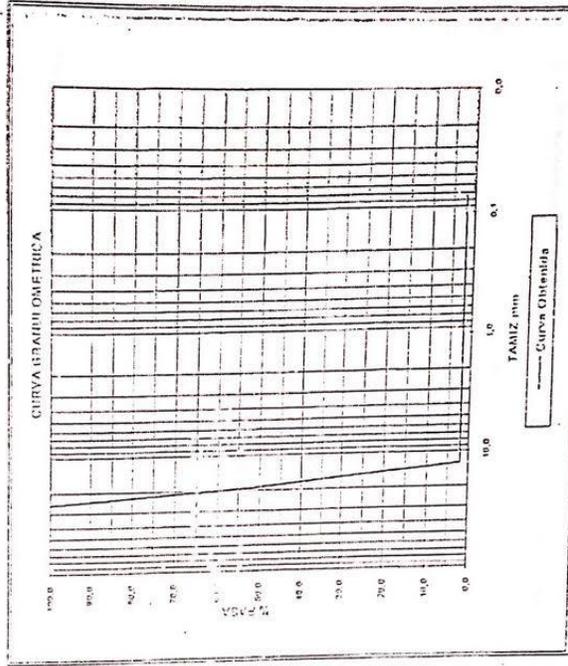
PROCEDECIA DEL MATERIAL
CONCRESCOL

Peso Total de la Muestra (g)	620.0
Peso Unitario Suelto (g/cm ³)	1.460
Peso Especifico S.S. (g/cm ³)	2.85
Pasa Tamiz #200 - Lavado (%)	1.9
Cont. de Materia Organica	N/A
Solidéz - Sulfato de Sodio (%)	5.56
Equivalente de Arena (%)	N/A
(*) No aplica	

ANALISIS GRANULOMETRICO

PESO INICIAL (g) 620.0

ALERTURA (mm)	(PESO METRICO)	% PASA	% RETENIDO	% PASA ACUMULADA	% PASA
25.000	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
19.100	205.8	47.7	47.7	52.3	
12.700	312.2	50.4	98.1	98.1	
5.520	3.0	0.0	98.1	98.1	
4.760	0.0	0.0	98.1	98.1	
2.000	0.0	0.0	98.1	98.1	
0.420	0.0	0.0	98.1	98.1	
0.177	0.0	0.0	98.1	98.1	
0.075	0.0	0.0	98.1	98.1	
FONDO	12.0	1.9	100.0	100.0	



EJECUTO *Huy Quetzels*

PINZ LAB
LABORATORIOS - ING. CIVIL
REVISO: PIT 19 214.315-3

Fuente. CONCRESCOL

ANEXO 14. GRANULOMETRIA DE AGREGADOS PETREOS INVIAS-E 213-214

GRANULOMETRIA DE AGREGADOS PETREOS INVIAS-
E- 213

VARZO DE 2017
MARZO DE 2017

Fecha de muestra
Fecha de ensayo

AREIA TRITURACION
CONCRESCOL

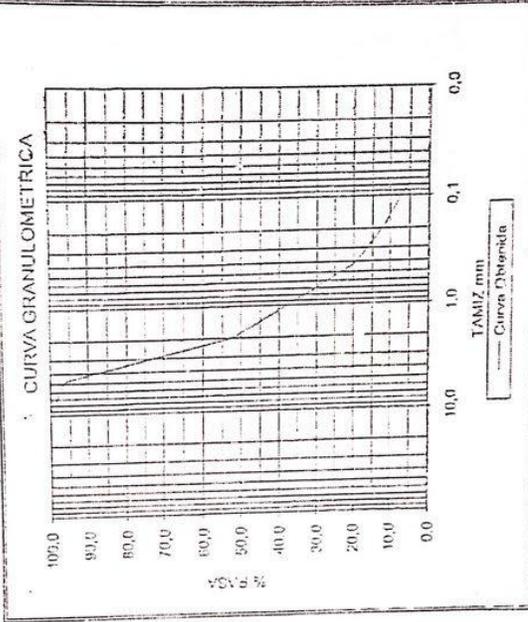
MATERIAL
PROCEDENCIA DEL MATERIAL

Peso Total de la Muestra (g)	720,4
Peso Unitario Suelto (g/cm ³)	1,473
Peso Especifico Aparente (g/cm ³)	2,56
Cont. de Materia Organica	1
Solidez - Sulfato de Sodio (%)	11,90
Equivalente de Arena (%)	87%

ANALISIS GRANULOMETRICO

PESOTOTAL (g): 720,4

ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% ACUMULADO	% PASA
25,400	0,0	0,0	0,0	100,0
19,100	0,0	0,0	0,0	100,0
12,700	0,0	0,0	0,0	100,0
9,520	0,0	0,0	0,0	100,0
4,760	20,1	3,0	3,0	96,1
2,090	315,0	43,7	47,6	52,4
0,420	235,4	32,7	80,3	19,7
0,177	60,7	8,4	88,7	11,3
0,074	46,1	6,4	95,1	4,9
FONDO	35,1	4,9	100,0	0,0



PINZ LAB
LABORATORIOS - ING. CIVIL
NIT 19 214.315-3

REVISOR

EJECUTO: *[Signature]*

Fuente. CONCRESCOL

ANEXO 15. GRANULOMETRIA DE AGREGADOS PETREOS INVIAS-E 213-214

GRANULOMETRIA DE AGREGADOS PETREOS INVIAS-E-213-214

Fecha de muestra
Fecha de ensayo

MARZO DE 2017
MARZO DE 2017

TIPO DE MATERIAL: ARENA NATURAL
PROVENIENCIA DEL MATERIAL: CONCRESCOL

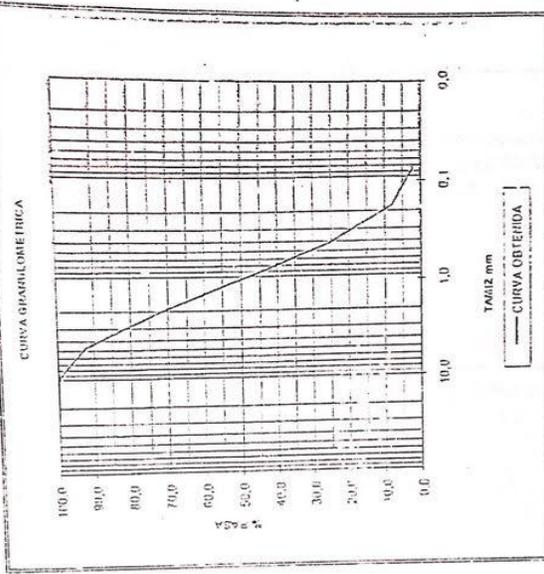
Peso Total de la Muestra (g)	4887,0
Peso Unitario Suelto (g/cm ³)	1,473
Peso Especifico Agregado (g/cm ³)	2,59
Peso Tamiz #200 - Lavado (%)	2,0
Cont. de Materia Organica	1
Solidaz - Sulfato sin Solio (%)	11,90
Equivalente de Arena (%)	92,0

(H.A) No aplica

ANALISIS GRANULOMETRICO

PEQUERNA (g) 487,0

ABERTURA (mm)	PEQUERNA (g)	% PASADO	% RETENIDO	% PASADO ACUMULADO	% PASA
25.400	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0
19.100	3,4	0,0	0,0	0,0	100,0
12.700	1,2	0,0	0,0	0,0	100,0
9.520	3,0	2,7	0,6	0,6	99,4
4.760	16,4	34,0	7,1	7,6	92,4
2.000	102,1	209,9	20,5	20,5	71,4
0.420	116,40	224,1	45,9	74,5	25,5
0.177	10,80	45,7	17,5	92,1	7,9
0.074	16,200	28,9	5,9	98,0	7,0
FONDO	9,7	2,0	2,0	100,0	0,0



PINZ LAB
LABORATORIOS - ING. CIVIL
RIT 19 214.315-3

REVISO:

EJECUTO: *Hay Records*

Fuente. CONCRESCOL

ANEXO 16. GRANULOMETRIA DE AGREGADOS PETREOS INVIAS-E 213-214

GRANULOMETRIA DE AGREGADOS PETREOS INVIAS-E-213-214

Fecha de muestra: MARZO DE 2017
 Fecha de ensayo: MARZO DE 2017

TRITURADO 1/2"
 CONCRESCOL

TIPO DE MATERIAL: _____
 PROCEDENCIA DEL MATERIAL: _____

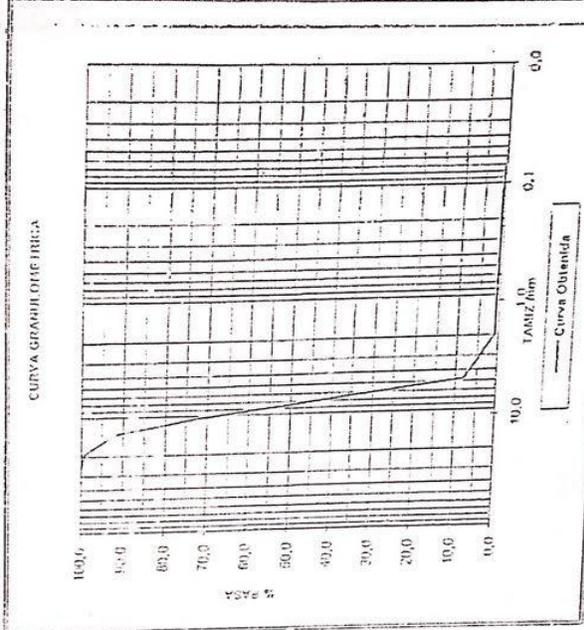
Peso Total de la Muestra (g)	1150,2
Peso Unitario Suelo (g/cm ³)	1,432
Peso Especifico SSS (g/cm ³)	2,68
Peso Tamiz #200 - Lavado (%)	0,4
Cont. de Materia Organica	N/A
Solidaz - Sulfato de Sodio (%)	9,55
Equivalente de Arena (%)	N/A

(N/A) No aplica

ANALISIS GRANULOMETRICO

PESOSICUAL (g): 1150,2

ABERTURA (mm)	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	% Pasado
25,400	0,0	0,0	0,0	100,0
19,100	11,0	1,0	1,0	99,0
12,700	86,4	7,5	0,5	91,5
9,520	223,5	19,4	27,9	72,1
4,760	737,1	64,1	97,0	0,0
2,990	80,9	7,0	99,0	1,0
0,420	2,1	0,2	99,2	0,8
0,177	1,0	0,1	99,3	0,7
0,075	3,4	0,3	99,6	0,4
FONDO	4,8	0,4	100,0	0,0



EJECUTO: *[Handwritten Signature]*

PINZ LAB
 LABORATORIOS - ING. CIVIL
 RIT 19 214.315-3
 REVISO: _____

Fuente. CONCRESCOL

ANEXO 17. DENSIDAD Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO

	ENSAYO AGREGADOS PETREOS DENSIDAD Y ABSORCIÓN DE AGREGADO GRUESO NORMA INV E-223
--	--

Descripción: GRAVA TRITURADA 3/4 " Y 1/2" Fecha de muestra: MARZO DE 2017
 Fuente: CONCRESCOL Fecha de ensayo: MARZO DE 2017

	Tipo de muestra	Triturado 3/4	Triturado 1/2	Promedio
1	Masa de material ssc	980	1020	
2	Masa de material sumergido en agua	615	639	
3	Masa de material seco	970	1010	

4	Agua absorbida	10	10	
5	Volumen muestra saturada	365	381	
6	Volumen de sólidos	355	371	
7	Peso específico aparente seca (g/cm ³)	2,66	2,65	2,65
8	Peso específico ssc (g/cm ³)	2,68	2,68	2,68
9	Peso específico nominal (g/cm ³)	2,73	2,72	2,73
10	Absorción	1,03	0,99	1,01

Observaciones: Ensayos correspondientes a las muestras entregadas en el laboratorio.


 EJECUTO

PINZ LAB
 LABORATORIOS - ING. CIVIL
 NIT 13 214.315-3

REVISO

Fuente. CONCRESCOL

ANEXO 18. ENSAYO DE AGREGADOS PETREOS FINOS AZUL DE METILENO

<p>ENSAYO DE AGREGADOS PETREOS FINOS AZUL DE METILENO NORMA UNE-EN-933-9</p>		TIPO DE MATERIAL PROCEDENCIA DEL MATERIAL	COMBINACION AGREGADOS FINOS CONCRESCOL	FECHA DE MUESTREO FECHA DE ENSAYO	MARZO DE 2017 MARZO DE 2017
<p>COMBINACION AGREGADOS FINOS (Mezclas INVIAS)</p>					
PRUEBA No.	No. 1	No. 2	No. 3		
Peso de azul de metileno (g)	6,8				
Peso suelo seco (g)	230,1				
Indice de azul de metileno (%)	3,40				
PROMEDIO (%)			3,4		
<p>COMBINACION AGREGADOS FINOS (Mezclas IDU)</p>					
PRUEBA No.	No. 1	No. 2	No. 3		
Peso de azul de metileno (g)	7,2				
Peso suelo seco (g)	199,8				
Indice de azul de metileno (%)	3,60				
PROMEDIO (%)			3,6		

OBSERVACIONES: Ensayos correspondientes a las muestras entregadas en el laboratorio
Especificación del 8% máximo.


PINZ LAB
 LABORATORIOS - ING. CIVIL
 TEL 19 214.315-3

Fuente. CONCRESCOL

ANEXO 19. ABRASION EN LA MAQUINA MICRODEVAL

	ENSAYO DE AGREGADOS PETREOS ABRASION EN LA MAQUINA MICRODEVAL NORMA INV E-238
--	---

Descripción	AGREGADOS FINOS	Fecha de muestra	MARZO DE 2017
Fuente	CONCRESCOL	Fecha de ensayo	MARZO DE 2017

Tipo de Agregado	TM 1/2"	TM 3/4"
Muestra No.	1	2
Masa de esferas	B	B
Tiempo de saturación (Horas)	11	11
No. de revoluciones	500	500
Pa= Peso muestra seca inicial	5004.0	5002.0
Pb= Peso muestra seca final	3824.0	3808.0
Pérdida= Pa-Pb	1180.0	1194.0
% Desgaste (Pa-Pb)/Pa	23.8	23.9
Especificación (% Máximo)	30	31

DATOS SOBRE GRADACION, CARGA ABRASIVA Y REVOLUCIONES

Tamices		Masa y granulometría de la muestra		
Pasa	Retiene	1	2	3
3/4"	5/8"	375		
5/8"	1/2"	375		
1/2"	3/8"	750	750	
3/8"	1/4"		375	750
1/4"	No. 4		375	750
Peso de esferas (g)		5000±5	5000±5	5000±5
No. de revoluciones / min.		100 ± 5	100 ± 5	100 ± 5
Tiempo de ensayo (min.)		120	105	95

Observaciones: Ensayos correspondientes a las muestras entregadas en el laboratorio


 EJECUTO

PINZ LAB
 LABORATORIOS - ING. CIVIL
 TEL: 09 214 315-3
 REVISO

Fuente. CONCRESCOL

ANEXO 20. DENSIDAD Y ABSORCIÓN DE AGREGADO FINO

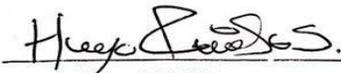
	ENSAYO AGREGADOS PETREOS DENSIDAD Y ABSORCIÓN DE AGREGADO FINO NORMA INV E-222
--	---

Descripción: ARENA TRITURADA
 Fuente: MELGAR

Fecha de muestra: MARZO DE 2017
 Fecha de ensayo: MARZO DE 2017

	Tipo de muestra	ARENA TRITURACION	ARENA NATURAL	Promedio
1	Temperatura del ensayo	21	21	
2	Masa de material sss	500	500	
3	Masa frasco volumetrico + agua	627,1	627,1	
4	Masa frasco volumetrico + material + agua	936,4	937,5	
5	Masa de material seco	489,0	491,0	
6	Volumen de solidos	179,7	180,6	
7	Volumen muestra saturada	190,7	189,6	
8	Peso especifico aparente seca (g/cm ³)	2,56	2,59	2,58
9	Peso especifico sss (g/cm ³)	2,62	2,64	2,63
10	Peso especifico nominal (g/cm ³)	2,72	2,72	2,72
11	Absorcion	2,25	1,83	2,04

Observaciones: Ensayos correspondientes a las muestras entregadas en el laboratorio.


 EJECUTO

PINZ LAB
 LABORATORIOS - ING. CIVIL
 RIT. 19 214.315-3
 REVISO

Fuente. CONCRESCOL

ANEXO 21. ABRASIÓN EN LA MAQUINA DE LOS ANGELES

	ENSAYO DE AGREGADOS PETREOS ABRASION EN LA MAQUINA DE LOS ANGELES NORMA INV E-218 y 219.
--	--

Descripción	AGREGADOS FINOS	Fecha de muestra	MARZO DE 2017
Fuente	CONCRESCOL	Fecha de ensayo	MARZO DE 2017

Tipo de Agregado	TM 1/2"	TM 1/2"	TM 1/2"	TM 3/4"	TM 3/4"	TM 3/4"
Muestra No.	1	2	3	4	5	6
Gradación usada	B	B	B	B	B	B
No. de esteras	11	11	11	11	11	11
No. de revoluciones	500	500	100	500	500	100
P _a = Peso muestra seca inicial	5004.0	5003.0	5001.0	4999.0	5001.0	5003.0
P _b = Peso muestra seca final	3817.0	3116.0	4804.0	3892.0	3451.0	4656.0
Pérdida = P _a - P _b	1187.0	1887.0	197.0	1107.0	1550.0	147.0
% Desgaste (P _a - P _b) / P _a	23.7	37.7	3.9	22.1	31.0	2.9
Especificación (% Máximo)	30	50	6	30	50	6
Relación húmedo / Seco (Máximo)	1.59			1.40		
Cumple con la Especificación	CUMPLE			CUMPLE		

** TM = Tamaño Máximo.
 Muestra No. 1 Y 4 (500 REVOLUCIONES EN SECO)
 Muestra No. 2 Y 5 (500 REVOLUCIONES - SATURACION 48 HORAS)
 Muestra No. 3 Y 6 (100 REVOLUCIONES EN SECO)

DATOS SOBRE GRADACION, CARGA ABRASIVA Y REVOLUCIONES

Tamices		Masa y granulometría de la muestra						
Para	Retiene	A	B	C	D	E	F	G
3"	2 1/2"					2500		
2 1/2"	2"					2500		
2"	1 1/2"					5000	5000	
1 1/2"	1"	1250					5000	5000
1"	3/4"	1250						
3/4"	1/2"	1250	2500					
1/2"	3/8"	1250	2500					
3/8"	No. 3			2500				
No. 3	No. 4			2500				
No. 4	No. 8				3000			
No. de esteras		12	11	5	6	12	12	12
No. de revoluciones		500	500	500	500	1000	1000	1000

Observaciones: Ensayos correspondientes a las muestras entregadas en el laboratorio.


 EJECUTO

PINZ L. B.
 LABORATORIOS - ING. CIVIL
 TEL. 19 214 315-3

REVISO

Fuente. CONCRESCOL

ANEXO 22. AGREGADOS GRUESOS-PESOS ESPECIFICOS

	ENSAYOS DE AGREGADOS GRUESOS PESOS ESPECIFICOS (SUELTO / APISONADO) NORMA INV E-217
--	--

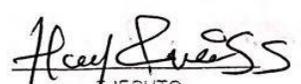
Descripción: AGREGADOS FINOS Fecha de muestra: MARZO DE 2017
 Fuente: CONCRESCOL Fecha de ensayo: MARZO DE 2017

AGREGADOS FINOS

PESO UNITARIO SUELTO	
Masa agregado + Recipiente (g)	1. 7517
	2. 7522
	3. 7520
Masa Prom. - Agregado+Recip. (g)	7520
Masa Recipiente (g)	3100
Masa del agregado (g)	4420
Volumen del recipiente (cm ³)	3000
Peso Unitario (g/cm ³)	1,473

PESO UNITARIO APISONADO	
Masa agregado + Recipiente (g)	1. 7750
	2. 7730
	3. 7744
Masa Prom. - Agregado+Recip. (g)	7741
Masa Recipiente (g)	3100
Masa del agregado (g)	4641
Volumen del recipiente (cm ³)	3000
Peso Unitario (g/cm ³)	1,547

Observaciones: Ensayos correspondientes a las muestras entregadas en el laboratorio.


 EJECUTO

PINZ LAB
 LABORATORIOS - ING. CIVIL
 TEL 19 214 315-3

REVISO

Fuente. CONCRESCOL

ANEXO 23. EVIDENCIA ENSAYO MARSHALL CON POLIETILENO



Fuente. Los Autores

ANEXO 24. EVIDENCIA ENSAYO MARSHALL CON POLIETILENO



Fuente. Los Autores

ANEXO 25. EVIDENCIA ENSAYO MARSHALL CON POLIETILENO



Fuente. Los Autores

ANEXO 26. EVIDENCIA ENSAYO MARSHALL CON POLIETILENO



Fuente. Los Autores

ANEXO 27. EVIDENCIA ENSAYO MARSHALL CON POLIETILENO



Fuente. Los Autores

ANEXO 28. EVIDENCIA ENSAYO MARSHALL CON POLIETILENO



Fuente. Los Autores