

**COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON
POLÍMEROS PROVENIENTES DE BOTELLAS PET RECICLADAS**



**PROPUESTA DE TRABAJO DE GRADO
OPCIÓN DE GRADO: TRABAJO DE GRADO**

JUAN CARLOS LOPEZ SABOGAL

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE ESTUDIOS A DISTANCIA - FAEDIS
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C, DICIEMBRE DE 2020**

**FORMULACIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON
POLIMEROS PROVENIENTES DE BOTELLAS PET RECICLADAS**



JUAN CARLOS LOPEZ SABOGAL

D7301334

**Propuesta de grado presentada como requisito parcial para optar por derechos de
grado**

Director:

Ing. EDGAR RODRIGUEZ RINCON

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE ESTUDIOS A DISTANCIA - FAEDIS

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C, DICIEMBRE DE 2020

Nota de aceptación

Aprobado por el comité según los requisitos

Exigidos por la Universidad Militar Nueva

Granada

Director

Jurado

Jurado

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mi hermano Camilo y hermana Adriana por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida. A todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional y como ser humano.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a la Universidad Militar Nueva Granada, directivos y profesores por haberme brindado tantas oportunidades y enriquecerme en conocimiento.

Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
1.1.1	Pregunta de Investigación	2
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1	Objetivo General	2
1.2.2	Objetivos Específicos.....	2
1.3	JUSTIFICACIÓN	2
2	ANTECEDENTES	5
3	MARCO TEÓRICO.....	11
3.1	MARCO CONCEPTUAL	11
3.1.1	Mezclas asfálticas	11
3.1.2	Polímeros	13
3.1.3	Mezcla asfáltica modificada con polímeros de reciclaje	15
3.1.4	Identificación visual de plásticos	16
3.2	MÉTODO DE DISEÑO MARSHALL	18
3.3	MARCO NORMATIVO	19
4	METODOLOGÍA	21
4.1	Agregados pétreos y cemento asfáltico.....	21
4.2	Fabricación de las muestras de ensayo	24
4.3	Procedimientos de caracterización física y mecánica de las muestras de ensayo	27
4.3.1	Determinación del flujo y el valor de estabilidad de las mezclas asfálticas	28
5	RESULTADOS OBTENIDOS	29
5.1	Determinación de la mezcla de trabajo	29
5.2	Mezcla asfáltica con la adición de PET	33
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS	37
6.1	Mezcla modificada.....	37

6.2	Verificación.....	39
6.3	Trabajabilidad	40
7	Conclusiones	41
8	Recomendaciones:	43
	Bibliografía.....	44

1 INTRODUCCIÓN

Las mezclas asfálticas modificadas han sido objeto de investigación por su sinergia con diferentes materiales, Estrella (2016) indica en su estudio que los polímeros no tienen la misma compatibilidad en comparación con la del grano de caucho en la mezcla asfáltica u otros materiales que se han empleado con éxito en la modificación de mezclas, pero el uso y reciclaje de polímero como el PET resulta un componente de bajo costo y contribuye en la solución del problema de la contaminación que genera la disposición de este material.

En el presente documento se estudia el comportamiento de una mezcla asfáltica cuando se le adicionan polímeros resultantes del polietileno tereftalato (PET) que han sido obtenidos del proceso de reciclaje, comparando sus propiedades con las de una mezcla patrón sin ningún tipo de adición. Para lograr lo anterior fue necesario la obtener la fórmula de trabajo de la mezcla patrón mediante diseño Marshall, a partir de la cual se fue modificando progresivamente con la adición de los siguientes porcentajes de PET de 1, 2, 3 y 4 %, para ello se llevaron a cabo los métodos descritos en la norma INV E-748 (2013), se fabricaron 27 muestras, las cuales 15 correspondieron a la determinación de la fórmula de trabajo y 12 a mezclas con diferentes porcentajes de PET.

El propósito de esta investigación es establecer el porcentaje máximo de polímeros provenientes de botellas PET recicladas para una mezcla asfáltica modificada de modo que cumpla con los requerimientos de diseño de la norma Invias (2013). para obtener la mejor mezcla de trabajo posible para uso de pavimentos con cierto porcentaje de material reciclado, que pueda ser usado en una vía con bajo nivel de tránsito.

1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1.1 Pregunta de Investigación

¿Cuál es el porcentaje máximo de polímeros provenientes de botellas PET recicladas que podrían producir una mezcla asfáltica modificada que cumpla con los requerimientos mínimos de diseño para una vía NT1 de acuerdo con la norma INVIAS?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de los polímeros provenientes de botellas PET recicladas en una mezcla asfáltica modificada para aprovechar parte de residuos poliméricos que se generan actualmente estableciendo recomendaciones con relación a requerimientos mínimos de diseño.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar una mezcla asfáltica mediante el método Marshall estableciendo el porcentaje óptimo de cemento asfáltico.
- Evaluar el efecto en las principales propiedades físico-mecánicas de una mezcla asfáltica cuando se incluyen diferentes porcentajes de material polimérico en la mezcla y compararlo con la mezcla patrón.
- Determinar la cantidad máxima de plástico proveniente del reciclado de botellas plásticas PET que se pueden adicionar a la mezcla asfáltica sin salirse de los requerimientos mínimos de diseño.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Una ciudad sostenible significa que gran parte de los proyectos económicos, de infraestructura y transporte pueden mantenerse durante largo tiempo sin agotar los recursos

o causar grave daño al medio ambiente (Sareb, 2020). A pesar de esto, la ONU (2016) indica que el 70% de las emisiones totales de CO₂ en el mundo provienen de las ciudades. Por esta razón el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF por sus siglas en inglés), exige una transformación urgente de las ciudades para que su consumo de energía sea cien por ciento renovable para el año 2050, adoptando medidas de mitigación y adaptación al cambio climático.

La ciudad de Bogotá no es indiferente al efecto de sus proyectos sobre el medio ambiente; por ejemplo, uno de los propósitos de la ciudad para el año 2030 es ser líder en el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (Veeduría Distrital, 2020). En ese sentido, la ciudad ha estado fortaleciendo alternativas en medios de movilidad urbana tales como la bicicleta y se ha convertido en una de las ciudades líderes en el uso del medio de transporte que más contribuye a la mitigación de emisiones de CO₂ al medio ambiente. La amplia red de ciclorrutas y constante promoción del uso de la bicicleta en Bogotá, la consolidan como la ciudad que más ha invertido en este tipo de infraestructura (Secretaría de Movilidad Bogotá, 2020). La ciudad de Bogotá contaba con una red de 532 km de Ciclorrutas para el año 2019, la cual resulta ser la red de vías para este tipo de transporte más amplia en Latinoamérica.

Por otra parte, se considera pertinente que las autoridades locales tomen acciones no solo para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) durante la vida útil o uso de una infraestructura, sino que también deben tomarse en cuenta las posibles emisiones de estos en procesos de constructivos, de transporte y fabricación de materiales como, por ejemplo, el de las mezclas asfálticas en caliente (HMA, por sus siglas en inglés). Estas mezclas son el material más recomendado para la construcción de las ciclovías porque proporcionan las condiciones óptimas para la construcción de ciclorrutas urbanas de acuerdo con la Guía de Ciclo-Infraestructura Colombiana (Mintransporte, 2016). A partir del análisis de ciclo de vida de la construcción de una vía hecha con HMA, Sampedro *et al.* (2012) calcularon que se generan alrededor de 61.87 kg de CO₂ eq/t de (HMA) para fabricar una tonelada de este tipo de mezcla mientras que para una mezcla modificada como

la fabricada con pavimento asfáltico reciclado (RAP, por sus siglas en inglés) se reduce hasta un 13.5%.

De esta manera, es posible considerar el uso de materiales alternos o complementarios en proyectos de pavimentación urbana sostenibles para contribuir en la reducción de emisiones de GEI. Específicamente se plantea el uso del Tereftalato de Polietileno (PET), un material con un gran potencial reciclable que constituye el polímero que se encuentra en mayor volumen en los depósitos de basura debido a que se usa en miles de productos de vida útil corta (Téllez, 2012). Parte de la propuesta del presente documento, es incentivar de manera general el uso de este tipo de material en ampliaciones o rehabilitación de su red de ciclorrutas, o vías con niveles de tránsito bajos, clasificados como NT1 de acuerdo con el Instituto Nacional de Vías (INV) o T0 según el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU).

2 ANTECEDENTES

Algunos estudios con avances importantes se han desarrollado alrededor del uso de polímeros en mezclas de pavimento asfáltico, entre los más destacados están:

En el estudio de Arteaga (2018) se utilizó el material PET como aditivo para una base granular estabilizada con cemento y se evaluó la resistencia de este material. Se construyeron muestras de bases granulares estabilizadas con 3%, 4% y 5% de cemento, con adición de 2%, 4% y 6% de PET con tamaño de partícula No4. Arteaga (2018) observó que al aumentar la cantidad de PET se debe incrementar el porcentaje de cemento en la base para obtener una resistencia a la compresión de 3.5 MPa que es el valor mínimo permitido por el artículo 351 de la norma INVIAS (2013). La resistencia máxima a la compresión (6.65 MPa) de la base estabilizada se obtuvo para un contenido de 5% de cemento y 6% de PET, la cual resultó ser 21% mayor a la registrada por la base estabilizada con 4% sin adición de PET. Arteaga (2018) concluyó que, debido a las propiedades de impermeabilidad que presenta el PET, la adición de este material a la base granular no modificó el contenido de humedad por lo que la humedad óptima de la base se mantuvo constante. Así mismo, la adición del PET a la base granular no causó ningún cambio significativo en el volumen de la muestra y se endureció a los 7 días, al igual que la mezcla natural de base cemento, por lo que Arteaga (2018) resaltó que el uso del PET en la base no presenta reacciones negativas. Finalmente, Arteaga (2018) concluyó que el material PET reciclado al 2%, puede ser usado como aditivo para las bases granulares estabilizadas con cemento, reemplazando el material No. 4, manteniendo la resistencia a la compresión mínima de 3.5 MPa, con el menor porcentaje de cemento estudiado que fue 3.3%.

El uso de PET en mezclas asfálticas también ha sido estudiado en otros lugares del mundo. Por ejemplo, en Ecuador, en el estudio de Flores *et al.* (2018) se utilizó el PET, proveniente del reciclaje de botellas, como material constitutivo adicional de mezclas asfálticas en caliente y se comparó con una mezcla asfáltica convencional con base en los

resultados de la medición del peso unitario, porcentaje de vacíos, estabilidad y flujo de cada grupo de mezclas. El porcentaje óptimo de asfalto obtenido a partir de los ensayos Marshall fue de 6.5% y la adición del PET Tipo 1 se realizó en forma de fibras con longitud menor a 8 mm y ancho mayor a 3 mm en la primera serie de muestras. En la segunda serie de muestras se adicionó PET Tipo 1 triturado con tamaño de partículas pasando el tamiz 3/8 y retenido en el tamiz #4. Finalmente, la tercera serie de muestras incluyó PET tipo 1 triturado con tamaño de partícula pasando el tamiz #10 y retenido en el tamiz #40. En las 3 series de muestras se adicionó 3%, 6%, 9%, 12%, 15%, 18% y 20% de PET tipo 1. Flores *et al.* (2018) afirmó que la mejor forma de adicionar el PET a la mezcla asfáltica en caliente corresponde al material triturado que pasa el tamiz No10 y es retenido por el tamiz No.#40, debido a que presentó una estabilidad y flujo 33.3% y 32% mayor a los valores de estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica convencional con 6.5% de asfalto, respectivamente. Finalmente, Flores *et al.* (2018) recomendó que el PET tipo fibra tenga un ancho mayor a 3 mm porque las fibras con un ancho menor no resisten el calor de la mezcla y compactación de una briqueta, y causa que las fibras se deformen en exceso y pierdan desde su longitud hasta su consistencia.

En Chile, en el trabajo de Movilla-Quesada *et al.* (2019) se estudió el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica en caliente con adición de partículas de PET no mayor de 10 mm, obtenidas del reciclaje de botellas. La adición de las partículas PET a la mezcla asfáltica se realizó por vía seca en porcentajes de 6, 10, 14, 18 y 22% para un contenido de cemento asfáltico de 5.3% y produciendo un total de 24 probetas. Las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica se evaluaron a partir de los ensayos de estabilidad Marshall y flujo según la norma AASHTO T245 (2015) y módulo resiliente de acuerdo con la norma UNE-EN 12697-26 (2006). Movilla-Quesada *et al.* (2019) encontraron a partir de la prueba de estabilidad Marshall que el contenido óptimo de PET era 14% mientras que para porcentajes entre 6% y 14% de PET, el flujo estuvo por debajo de 4 mm que es el límite máximo de acuerdo con las especificaciones técnicas generales de construcción de carreteras de Chile. Con respecto al ensayo de modulo resiliente, en el estudio encontraron que el módulo de rigidez disminuyó al incrementar la temperatura del

ensayo de 10°C a 22°C lo que causó la aparición de deformaciones plásticas. Sin embargo, la adición de PET generó un incremento en la rigidez inicial de la mezcla. Finalmente, los valores de rigidez obtenidos fueron menores a 5000 MPa, de modo que se obtuvo una mezcla con mayor estabilidad y flujo dentro de los límites de la normativa, pero con menor rigidez.

En Nigeria, Moses (2019) reemplazó el contenido óptimo de bitumen por 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14% y 16% de PET reciclado de botellas de agua y sometió a ensayo Marshall las muestras obtenidas con estos porcentajes. De acuerdo con Moses (2019) se presentó una disminución en la estabilidad del 20.4% de la mezcla modificada con PET en comparación con la muestra asfáltica de referencia. Asimismo, los resultados obtenidos mostraron que el flujo disminuye con excepción de las muestras con 14% y 16% de PET lo cual indica que la adición de PET reciclado puede mejorar la resistencia a la deformación permanente del asfalto, aunque también es posible que haya una reducción en la resistencia a la fatiga.

En Colombia también se han realizado estudios sobre pavimentos modificados con polímeros diferentes al PET. En el estudio de Rodríguez *et al.* (2006) se utilizó el desecho de PVC proveniente de PETCO (Petroquímica Colombiana) S. A. como material de adición en diferentes porcentajes (1%, 3% y 5%) con el fin de modificar el comportamiento de una subbase granular y compararlo con el comportamiento de un material natural a partir de los resultados de ensayos de Proctor y CBR. Los resultados de la investigación muestran que el CBR de una mezcla de material granular, tipo subbase, y material de desecho, puede presentar un incremento de hasta 85% con respecto al CBR del material natural. Adicionalmente, la mezcla modificada logró disminuir el peso unitario del material, de manera tal que se obtuvo una mezcla con mayor resistencia y menor peso.

Por su parte, Reyes *et al.* (2013) evaluaron las propiedades físicas y reológicas a temperaturas altas de servicio de un cemento asfáltico (CA) modificado con desechos de PVC, específicamente se utilizaron fracciones de contenido de PVC y CA de 5%, 10%,

15%, 20% y 25%, y mezcladas por vía húmeda a una temperatura de 155 °C. Las propiedades físicas medidas del cemento asfáltico modificado correspondieron a penetración (a la temperatura estándar de 25 °C) y punto de ablandamiento, mientras que las propiedades reológicas (módulo de corte y ángulo de fase) fueron evaluadas realizando ensayos en un reómetro dinámico de corte (DSR). Reyes *et al.* (2013) concluyeron que la resistencia a la penetración, viscosidad y punto de ablandamiento incrementaron porque el aditivo rigidiza el ligante. Adicionalmente, en este estudio se obtuvo que el mejor comportamiento del asfalto modificado fue para una fracción de contenido de PVC y CA de 10% para el cual la temperatura máxima de funcionamiento del ligante para evitar el fenómeno de ahuellamiento incrementó en un 16 %. Finalmente, Reyes *et al.* (2013) concluyen que, debido al incremento en la viscosidad y rigidez del ligante, y la evolución de los parámetros reológicos con la adición de PVC, el CA modificado puede ser empleado en vías para altos volúmenes de tránsito y/o zonas con Temperaturas Medias Anuales Promedio (TMAP) elevadas donde se presenten problemas de ahuellamiento.

En el estudio de Rondón *et al.* (2010) utilizaron un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD) obtenido del reciclaje de palillos utilizados como mezcladores para modificar una mezcla asfáltica densa en caliente tipo MDC-2. La evaluación del comportamiento de las mezclas asfálticas sin aditivo y modificadas se realizó a partir de ensayos Marshall y la medición del módulo dinámico, deformación permanente y resistencia a fatiga, mientras que para el CA tipo CA 80-100 utilizado para la elaboración de las mezclas con y sin aditivo, fue caracterizado a partir de ensayos tales como penetración y punto de ablandamiento. La modificación de las mezclas se realizó por vía húmeda utilizando fracciones de contenido de PEBD y CA de 1%, 3% y 5%. De acuerdo con el ensayo Marshall se obtuvo un contenido óptimo de CA de 5% y fracción de PEBD y CA de 5%. Rondón *et al.* (2010) encontraron que las mezclas modificadas con este contenido de PEBD y CA tuvieron un incremento en la estabilidad y relación estabilidad/flujo del 36% y 24%, respectivamente con respecto a las mezclas sin aditivos. Adicionalmente, la rigidez y la resistencia a la deformación permanente de la mezcla modificada resultaron mayores que las mezclas sin aditivos. Por ejemplo, el módulo

resiliente de las mezclas modificadas incrementa entre 25 a 65% con respecto a las convencionales. El máximo incremento en rigidez (65%) lo experimentan las mezclas sometidas a la mayor temperatura del ensayo (30°C). A pesar de esto, la resistencia a fatiga de las mezclas convencionales disminuye cuando se adiciona PEBD al CA.

Más adelante, en el estudio de Castro *et al.* (2015) se evaluaron las propiedades reológicas y térmicas de un cemento asfáltico CA 60-70 convencional y uno modificado con PEBD. De manera similar al estudio de Rondón *et al.* (2010), en Castro *et al.* (2015) se utilizaron desechos de mezcladores con una densidad de 0,92 g/cm³, los cuales se mezclaron por vía húmeda al CA 60-70 con una fracción de contenido entre el PEBD y CA de 5%, según con los resultados de Rondón *et al.* (2010), a una temperatura de 150±5 °C. De acuerdo con Castro *et al.* (2015) el grado de desempeño a temperaturas elevadas de servicio se incrementó a 70 °C al adicionar el PEBD en el asfalto CA 60-70 de modo que es posible utilizarlo como un ligante más resistente a fenómenos como el ahuellamiento en climas de alta temperatura. Sin embargo, estos resultados no fueron los mismos obtenidos a temperaturas intermedias y el grado de desempeño desmejoró (aumentó de 22 a 26° C). Por lo tanto, el asfalto con PEBD es menos resistente a fenómenos de agrietamientos cuando es sometido a temperaturas de servicio menores a 26° C puede volverse frágil y así mismo, experimentará un comportamiento frágil cuando la temperatura de este en la mezcla asfáltica sea menor a la temperatura de transición vítrea (T_g) de 37,63°C obtenida a partir de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).

En el estudio de Sánchez (2006) se realizó la caracterización física de asfaltos modificados con poliestireno y/o llanta triturada, y se comparó con los resultados obtenidos de la caracterización física de un asfalto convencional. La caracterización física se realizó en términos de la ductilidad, penetración, peso específico, punto de ignición y llama, punto de ablandamiento, lámina asfáltica en movimiento y viscosidad de Brookfield. Se estudiaron muestras que incluyeron 1% de poliestireno y adicionalmente muestras que incluyeron este mismo porcentaje de poliestireno con 12%, 14%, 16%, 18% y 20% de llanta triturada, respectivamente. Se obtuvieron dos series de muestras de los asfaltos

modificados por vía húmeda a 135 °C y 170 °C, respectivamente. Sánchez (2006) encontró que la ductilidad en promedio de las muestras de los asfaltos modificados con poliestireno y llanta triturada a temperatura de 135 °C, fue 13% y 18% de la ductilidad obtenida para el asfalto convencional y el asfalto modificado con 1% de poliestireno, respectivamente. En el caso del asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada obtenido a 170 °C, la ductilidad en promedio registrada fue 18% de la obtenida para el asfalto convencional y el asfalto modificado con 1% de poliestireno. De acuerdo con Sánchez (2006) los asfaltos modificados con poliestireno y llanta triturada presentaron propiedades ligantes menores a las del asfalto convencional, mientras que el asfalto modificado solamente con poliestireno presentó valores de ductilidad similares a los del asfalto convencional. En estos dos últimos casos, los materiales cumplieron con los requisitos mínimos de materiales de alto grado de adhesividad y buenas propiedades como ligante. Sánchez (2006) resalta que la condición de asfalto dúctil lo hace mejor para controlar la fatiga y el fisuramiento en los pavimentos. Sánchez (2006) concluyó que hubo una mejor incorporación del grano de caucho reciclado (GCR) y el poliestireno a 170 °C, obteniendo un cemento asfáltico modificado con mayor homogeneidad.

3 MARCO TEÓRICO

La construcción de carreteras en el país ha requerido que las empresas contratistas desarrollen mejoras para dar durabilidad y calidad a la infraestructura vial y al mismo tiempo disminuyan los costos de los proyectos y minimicen los impactos ambientales. Por esta razón, se ha presentado la necesidad de implementar innovaciones en los materiales y métodos utilizados en la construcción de las carreteras. Actualmente las investigaciones realizadas y las experiencias desarrolladas en otros países incluyen materiales agregados en la mezcla asfáltica como elementos PET, donde se ha demostrado que cumplen con los criterios normativos. A continuación, se definen algunos conceptos fundamentales que serán tratados en este estudio.

3.1 MARCO CONCEPTUAL

3.1.1 Mezclas asfálticas

De acuerdo con Rondón y Reyes (2015) las mezclas asfálticas se obtienen a partir de la mezcla entre agregados pétreos y un ligante asfáltico, y aunque normalmente se preparan en plantas mezcladoras también se pueden fabricar en obra. Dentro de las principales mezclas asfálticas se pueden destacar las mezclas en frío y en caliente, mezclas densas en frío y en caliente, los tratamientos superficiales, lechadas, mezclas asfálticas drenantes, discontinuas, tibias y mezclas asfálticas modificadas entre otras. A continuación, se describen los principales tipos de mezclas asfálticas.

- **Mezclas asfálticas en frío.** Este tipo de mezclas se componen de agregados pétreos con tamaño de partículas predominantemente gruesas (19 a 38 mm), y una emulsión asfáltica tipo CMR. Se caracterizan porque permiten ser extendidas y compactadas a temperatura ambiente, y su aplicación es principalmente en bacheos y capas de rodadura. Adicionalmente, estas mezclas presentan un contenido de vacíos mayor

a 10% debido al tamaño de partículas de los agregados y la mala gradación que caracteriza la granulometría de estos agregados.

- **Mezclas asfálticas en caliente.** En este tipo de mezclas se utilizan agregados pétreos con tamaño de partículas predominantemente gruesas (50 a 75 mm) y cemento asfáltico como ligante. La temperatura de fabricación varía entre 110 y 120 °C y se deben extender y compactar preferiblemente a estas mismas temperaturas. Su principal aplicación son los bacheos y capas de rodadura. A pesar que permiten reducir el fenómeno de hidropelaje, presentan buena textura superficial y disminuyen el ruido de rodadura, estas mezclas son de baja rigidez y resistencia mecánica debido a la alta porosidad.
- **Mezclas asfálticas densas en frío.** Las mezclas densas en frío están compuestas de agregados pétreos con una granulometría bien gradada incluyendo algunos porcentajes de finos, y con emulsiones tipo CRL-1 o CRL-1h como ligante asfáltico. Debido a la gradación de los agregados y bajo una adecuada compactación, es posible reducir el porcentaje de vacíos en la mezcla lo que conlleva al incremento de resistencia mecánica y disminución de la permeabilidad. Por lo anterior, la principal aplicación de estas mezclas es como capa de rodadura y base asfáltica, las cuales se extienden y compactan a temperatura ambiente.
- **Mezclas asfálticas densas en caliente o Concreto asfáltico.** Estas mezclas contienen agregados pétreos con granulometría bien gradada y diferentes tamaños de partículas como gravas, arenas, finos, llenantes minerales, etc. y cemento asfáltico como ligante. Son mezclas densas en caliente porque su fabricación se realiza a temperaturas que están entre 140 y 180 °C. Así mismo, la extensión y compactación en obra debe realizarse a altas temperaturas. El contenido de vacíos con aire en volumen oscila entre 3% y 9% por lo cual se consideran mezclas de alta calidad que pueden ser utilizadas como capa de rodadura, base intermedia y/o base asfáltica. Debido a su baja porosidad, estas mezclas son de alta resistencia y rigidez, aunque reducen la fricción entre el neumático y el pavimento; impermeabilizan superficialmente el pavimento, aunque esto puede ayudar a formar láminas de agua superficiales que aumentan la probabilidad del hidropelaje; finalmente, son más

durables y resistentes al envejecimiento en comparación con las mezclas asfálticas mencionadas previamente. Sin embargo, debido a las altas temperaturas de fabricación, la producción de concreto asfáltico impactan notablemente el medio ambiente debido al alto consumo de energía.

- **Mezclas asfálticas modificadas.** Las mezclas asfálticas modificadas con polímeros o aditivos se pueden obtener por medio de dos técnicas denominadas vía seca o húmeda. En la primera técnica el agregado pétreo es reemplazado en parte por el aditivo o polímero el cual se adiciona a altas temperaturas y finalmente se agrega el cemento asfáltico. En el proceso por vía húmeda, el aditivo o polímero se mezcla con el asfalto a alta temperatura y posteriormente se adiciona el agregado pétreo. De acuerdo con Rondón y Reyes (2015), por vía seca el tiempo de compactación de la mezcla es mayor y requiere de mayor cantidad de ligante asfáltico, aunque resulta más económico en comparación con la técnica por vía húmeda debido a que no requiere los equipos necesarios para producir mezclas asfálticas modificadas por vía húmeda. Fernández (2007) señala que el objetivo de las mezclas asfálticas modificadas con polímeros es obtener ligantes más viscosos a temperaturas más elevadas, un incremento de la rigidez, reducción del fisuramiento por fatiga, aumento de la elasticidad (para cambios térmicos) y mayor capacidad de adhesión del ligante. Esto conlleva a aumentar el tiempo de vida útil de la carpeta asfáltica o disminuir el espesor de ésta.

3.1.2 Polímeros

De acuerdo con Askeland *et al.* (2017) los polímeros son materiales formados por cadenas de moléculas, con pesos moleculares que varían entre 10000 y 1 millón de gramos por mol (g/mol), unidas por enlaces covalentes que terminan formando macromoléculas. A pesar de que la mayoría de los polímeros contienen carbono e hidrógeno como la composición básica de estos, es el caso del polietileno, polipropileno, polibutileno, poliestireno y polimetilpenteno, también pueden incluir otros elementos tales como el oxígeno, cloro, flúor, nitrógeno, silicio, fósforo y azufre; por ejemplo, el cloruro de

Polivinilo (PVC) contiene cloro mientras que el Nylon contiene nitrógeno y oxígeno. Los polímeros orgánicos se componen a partir de moléculas de carbono mientras que los polímeros inorgánicos tienen moléculas compuestas de silicio o fósforo.

Los polímeros se pueden clasificar en dos grandes grupos, a saber: los termoendurecidos y termoplásticos. Los polímeros termoendurecidos se descomponen al calentarse, en contraste con los polímeros termoplásticos los cuales se ablandan y funden al calentarse (Askeland *et al.*, 2017). Debido a lo anterior, Rondón y Reyes (2015) indican que los polímeros termoendurecidos no pueden ser utilizados como modificadores de asfalto. Sulyman *et al.* (2016) y Fernández (2007) indican que existen dos tipos de polímeros utilizados en modificaciones asfálticas que son los polímeros termoestables como elastómeros y resinas (cauchos), y los polímeros termoplásticos o plastómeros (plásticos) como los polietilenos de alta y baja densidad, o el policloruro de vinilo (PVC). A continuación, se mencionan sus principales características.

- **Elastómeros.** Los elastómeros son resistentes a la deformación generada por tensiones y recuperan su estado inicial rápidamente sin una deformación apreciable. Generan un aumento de la resistencia a la tensión. Su trabajo es fundamentalmente elástico alcanzando deformaciones elásticas mayores a 200%. La tecnología implica un aumento en el costo de producción del asfalto y dificultades en la aplicación, pero se observan mejores propiedades en cuanto a la resistencia a la fractura, ahuellamiento, susceptibilidad térmica y permeabilidad alargando la vida útil del pavimento (Palma *et al.*, 2015). Rondón y Reyes (2015) señalan que los elastómeros más utilizados para modificar asfaltos son los cauchos naturales como el estireno-butadieno-estireno (SBS, por sus siglas en inglés), estireno-butadieno-caucho (SBR, por sus siglas en inglés) y el grano de llanta reciclado y triturado (GCR, por sus siglas en inglés).
- **Plastómeros.** Estos polímeros se caracterizan porque al sobrepasar su límite elástico se fracturan. Entre los plastómeros que se utilizan para modificar asfalto se encuentran: polietileno, polipropileno, acetato de vinilo (EVA), cloruro de

polivinilo (PVC), etileno propileno (EPDM) y paliiolefinas. El principal efecto de la adición de polímeros a mezclas asfálticas es el incremento de la viscosidad debido a la forma en la que los plastómeros se ligan al bitumen.

Askeland *et al.* (2017) señalan que dentro de los termoplásticos más comunes están los polietilenos (PE) de alta y baja densidad, el cloruro de vinilo (PVC), el polipropileno (PP), el poliestireno (PS), entre otros. A su vez, dentro de los polietilenos está el polietileno tereftalato (PET) el cual es el polímero que se incluyó en el presente estudio. El PET es un polímero semicristalino producto de la condensación del ácido tereftálico y el glicol de etileno (o etilenglicol), con buenas propiedades mecánicas y buena estabilidad dimensional bajo carga (Sulyman *et al.*, 2016).

3.1.3 Mezcla asfáltica modificada con polímeros de reciclaje

El uso de polímeros se originó aproximadamente hace 50 años y la investigación en este tema empezó en los países más industrializados. Inicialmente el uso de los polímeros se enfocó en crear películas impermeabilizantes de la carpeta asfáltica y posteriormente se incorporó a la estructura del concreto asfáltico para producir una carpeta de acuerdo con las necesidades de diseño. El uso de polímeros en concretos asfálticos incrementa aproximadamente 25% el precio. Sin embargo, se ha demostrado que la adición de polímeros aumenta la adherencia del bitumen al material granular generando una mejora para las diferentes circunstancias de temperatura, tránsito y humedad, lo cual reduce los costos de mantenimiento. Consecuentemente a esto se prolonga de manera satisfactoria la vida útil del pavimento. De acuerdo con Rodríguez y Castillo (2016), el objetivo de agregar polímeros a la mezcla asfáltica es mejorar su reología, es decir:

- Disminuir la susceptibilidad térmica la cual busca reducir la fragilidad del asfalto en presencia de temperaturas bajas y aumentar la cohesión con temperaturas altas.
- Reducir la susceptibilidad a los tiempos de aplicación de carga.
- Aumentar la resistencia a la deformación permanente y a la rotura en un rango más amplio de temperaturas tensiones y tiempos de carga.

- Mejorar la adherencia de los agregados.

En el caso del uso del polietileno en mezclas asfálticas, Estrella (2016) indica que este tipo de polímero no tiene la misma compatibilidad en comparación con la del grano de caucho en la mezcla asfáltica, pero resulta un componente de bajo costo y contribuye en la solución del problema de la contaminación que genera la disposición de este material. Dentro de los principales efectos de adicionar en la mezcla asfáltica se pueden destacar las siguientes:

- Aumenta la resistencia al calor
- Aumenta la vida útil del pavimento
- Aumenta la viscosidad
- Aumenta la resistencia Marshall de 2 a 2.5
- Buena flexibilidad a baja temperatura
- Buena resistencia a la deformación

3.1.4 Identificación visual de plásticos

La Sociedad de Industria de Plásticos ha implementado unos códigos que son marcados en el fondo de casi todos los elementos plásticos para poderlos distinguir fácilmente, cabe aclarar que no todos los envases lo tienen. En la Tabla 1 se resumen las principales características y propiedades de algunos termoplásticos mientras que en la Fig. 1 se presentan los códigos implementados por la Sociedad de Industrias de Plásticos.

Tabla 1. Características físicas, propiedades y aplicaciones de algunos polímeros.

Polímero	Características
Polietileno tereftalato (PET)	Generalmente se presentan transparentes o de color claro o cristal, lavable, no posee absorción de la humedad y delgados. Generalmente de este material se realizan las botellas de bebidas gaseosas y las botellas de agua, bandejas, guardabarros de bicicletas. Son resistentes al calor y al contacto con grasa
Polietileno de alta densidad (PE-HD)	Buena resistencia al impacto y a la abrasión. Se encuentra en los envases opacos y translucidos, en envases de champú, detergentes líquidos, cloro, envases de lácteos, bolsas de supermercado, envases de helado, uso sanitario, etc.

Cloruro de polivinilo (PVC)	Alta resistencia química, transparencia, resistencia química y aislamiento eléctrico. Se usa en: tuberías, marcos de ventanería, aislamiento de cables, bolsas de suero, de sangre tubería transparente flexible, empaques de alimentos
Polietileno de baja densidad (LD-PE)	Buen aislante eléctrico su punto de fusión es bajo. Se presenta en laminas, generalmente como bolsas plásticas, recubrimiento de alambres y cables.
Polipropileno (PP)	Buena resistencia al ataque químico, Su estructura es parcialmente cristalina, lo que le permite un uso muy variado. Juguetes, partes automotrices, fibras para telas y tapetes laminas. Tapas rosca de las botellas.
Poliestireno (PS)	Claro duro y quebradizo posee un bajo punto de fusión. Se encuentra en empaques de alimentos, cajas de discos compactos vasos, platos y cubiertos transparentes.

Símbolo	Tipo de plástico	Propiedades	Usos comunes	Densidad
	Tereftalato de polietileno PET	Contacto alimentario, resistencia física, propiedades térmicas, propiedades barreras, ligereza y resistencia	Envases para alimentos, bebidas, cremas, farmacéuticos. etc.	1.39
	Polietileno de alta densidad HDPE	Poco flexible, resistente a químicos, opaco, fácil de pigmentar, fabricar y manejar. Se suaviza a los 75°C	Bolsas de supermercado, bolsas para congelar, envases para leche, helados jugos, shampoo, químicos y	0.95-0.97
	Polícloruro de vinilo PVC	Es duro, resistente, puede ser claro, puede ser utilizado con solventes, se suaviza a los 80°C. Flexible, duro, elástico.	Envases para plomería, tuberías, blister, envases en general,	1.4
	Polietileno de baja densidad	Suave flexible, traslucido, se suaviza a los 70°C, se raya fácilmente.	Películas para empaque, bolsas de basura, envases para laboratorio	0.92-0.94
	polipropileno	Difícil pero aun flexible, se suaviza a los 140°C, traslucido, soporta solventes, versátil.	Bolsas para frituras, sorbetes, equipo para jardinería, cajas de alimentos, mantas para empacar, envases para uso	0.90-0.91
	poliestireno	Claro, rígido, opaco, se rompe con facilidad, se suaviza a los 95°C. Afectado por grasas y solventes.	Cajas para discos compactos, cubiertos de plástico, imitaciones de cristal, juguetes, envases de cosméticos.	1.05-1.07
	Otros: Teflón, Nylon, ABS, Etc.	Incluye a muchas resinas y materiales. Sus propiedades dependen de la combinación de los plásticos	Autopartes, hieleras, electrónicos, piezas de empaques.	TEFLON: 2.2 Acrílico: 1.24 PMP: 0.83

Figura 1. Marca Normalizada de los plásticos.

3.2 MÉTODO DE DISEÑO MARSHALL

El método Marshall tiene como propósito determinar el contenido óptimo de asfalto de las mezclas asfálticas en caliente para una combinación específica de agregados a partir de la medición de peso volumétrico, porcentaje de vacíos, resistencia en términos de estabilidad (E) y deformación en términos del flujo (F). La estabilidad es la carga monotónica máxima que resiste una briqueta con dimensiones de 4" de diámetro y 2.5" de altura, a una temperatura de 60°C, en el equipo Marshall. El flujo es el desplazamiento de la probeta sometida a carga monotónica en el momento que se alcanza la estabilidad. El contenido óptimo de asfalto de una mezcla permite en teoría obtener el mejor comportamiento mecánico de esta (Rondón y Reyes, 2015).

El ensayo Marshall consiste en aplicar una carga constante a la muestra a una velocidad de 50 mm/min $\pm$ 5 de acuerdo con el aparato Marshall descrito en la sección 4.9 de la norma de ensayo INV E-748 (2013) (ver Fig. 2) y registrar la lectura de la deformación plástica que está sufriendo la muestra de ensayo. Las etapas del método Marshall se resumen en la Fig. 3. El ensayo Marshall ha sido ampliamente utilizado como base para el diseño de mezclas MDC, MSC, MGC y MAM entre otras, y recientemente ha sido empleado en los estudios de Moses (2019), Movilla-Quesada *et al.* (2019), Flores (2018) y Rondón *et al.* (2010) que incluyeron mezclas asfálticas modificadas.



Figura 2. Equipo para ensayo Marshall Fuente elaboración propia.

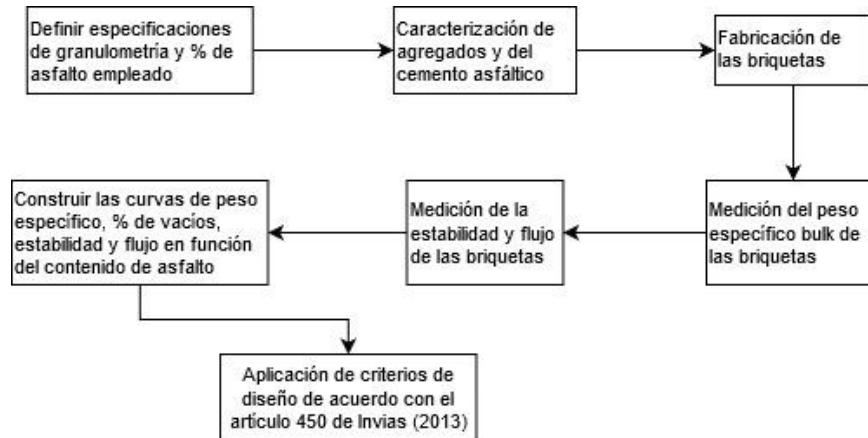


Figura 3. Etapas del método Marshall. Fuente elaboración propia.

3.3 MARCO NORMATIVO

La presente investigación es del tipo experimental por lo que es necesario realizar distintas pruebas de laboratorio para cumplir los principales objetivos. Estas pruebas se realizan con base en normas de ensayo establecidas en la Invias (2013) y se presentan a continuación:

- INV E - 748 (2013) Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente mediante el aparato Marshall; es un documento técnico donde se describen los procedimientos necesarios para la fabricación, caracterización y cuidados necesarios para determinar la resistencia de una mezcla asfáltica a las deformaciones plásticas, el cual tiene como objetivo determinar las proporciones óptimas de agregados en una mezcla de pavimento flexible.
- INV E - 733 (2013) Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas asfálticas es un documento técnico que describe el procedimiento necesario para la determinación de las propiedades físicas de muestras cilíndricas de pavimento asfáltico fabricado en laboratorio, dichos parámetros que se obtienen como resultados de la prueba son esenciales para predecir o garantizar el comportamiento de una mezcla asfáltica.

- INV E - 735 (2013) Gravedad específica máxima. En este documento técnico se describe el procedimiento para la determinación de la gravedad específica máxima o nominal de una mezcla asfáltica densa, dicho valor es empleado como valor de referencia teórico que equivale a una mezcla idealizada a un grado de compactación del 100%.
- INV E - 736 (2013) Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas es un documento dedicado a explicar el método que se debe seguir para calcular la cantidad de vacíos llenos de aire que hay en una mezcla asfáltica de pavimento, dicho procedimiento es el indicado para determinar este parámetro de diseño. Para nuestro estudio se considerara el ensayo ´para mezclas asfálticas densas.
- INV E - 782 (2013) Análisis Granulométrico de los agregados de mezclas asfálticas, este documento describe el procedimiento que se debe seguir para la correcta determinación de la distribución granulométrica que compondrá un pavimento asfáltico, para el caso de la presente investigación se empleó como referencia para la cantidad de partículas que serán parte de la mezcla de pavimento asfáltico.

La normatividad colombiana no se limita a pruebas sobre los materiales, en el artículo 450 de la Invias (2013) se proporciona los lineamientos necesarios para el trabajo, la colocación y la calidad de los materiales que se deben usar en carreteras de mezclas asfálticas en caliente. Dicho documento técnico tiene por objeto reglamentar los procesos y materias primas con el fin de cumplir con requisitos de calidad económica, social y ambiental.

4 METODOLOGÍA

La metodología de este trabajo consiste principalmente en la preparación de muestras y realización de los ensayos para la caracterización física y mecánica de la mezcla asfáltica sin modificar y con adición de 1%, 2%, 3% y 4% de PET. A continuación, se presentan las principales características y propiedades de los materiales que se utilizaron para la elaboración de las muestras y que fueron suministradas directamente por el fabricante.

4.1 Agregados pétreos y cemento asfáltico

Los agregados pétreos y el llenante mineral que se presentan en la Fig. 3 son de origen natural sedimentario de río suministrados por la empresa Concrecol los cuales cumplen con los requisitos de calidad de la tabla 450.3 de la Invias (2013) de acuerdo con las especificaciones del proveedor. Estos requisitos se presentan en la Tabla 2.



Figura 4. Agregado pétreo empleado para elaboración de las mezclas.

Tabla 2. Cumplimiento de los requisitos de calidad de los agregados pétreos.

Característica	Norma de ensayo INV	Requerimiento para nivel de tránsito			Resultado de laboratorio	Cumple/No cumple
		NT1	NT2	NT3		
Dureza, agregado grueso requisitos para rodadura						
Desgaste en máquina de los Ángeles, máximo (%)						
500 revoluciones	E-218	25	25	25	22,9	Cumple
100 revoluciones		5	5	5	3,4	Cumple
Degradación por abrasión en el equipo micro-deval, máximo (%)						
	E-238	-	25	20	24	Cumple para NT1 y NT2
Limpieza, gradación combinada						
Índice de plasticidad (%) máx.	E-125 y E-126	NP	NP	NP	NP	Cumple
Equivalente de arena (%) mín.	E - 133	50	50	50	82	Cumple
Azul de metileno, máx.	E-235	10	10	10	3,5	Cumple
Geometría de las partículas, agregado grueso						
Partículas planas y alargadas, máx. (%)	E-240	10	10	10	9/7	Cumple
Caras fracturadas, mín. (%)	E-133	75	75	85	84	Cumple para NT1 y NT2

En la Tabla 3 se resume la procedencia, nombre comercial y gravedad específica del cemento asfáltico, PET y agregados utilizados en la elaboración de las dos mezclas asfálticas. Los valores de gravedad específica del cemento asfáltico y PET se obtuvieron de ECOPETROL y del estudio de Berrío (2017), respectivamente. La gravedad específica de los agregados pétreos fue suministrada por la empresa Concrecol.

Tabla 3. Materiales empleados en la mezcla. Fuente elaboración propia.

Material	Procedencia	Referencia/nombre comercial	Gs (gravedad específica)	Consistencia
Cemento Asfáltico C.A.	ECOPETROL	60-70 Grado de penetración	1,01	Sólidos viscoso semilíquido a temperaturas mayores de 90°
PET	Trituración de polietilenos	Tereftalato de polietileno	1,37	Sólido a temperatura ambiente
Agregados pétreos	Concrecol	Triturado	2,57	sólidos

De acuerdo con Berrío (2017), el revestimiento para estructuras de pavimentos generalmente deben ser Mezclas Densas en Caliente (MDC) o Mezcla Semidensas en

Caliente (MSC). Por tanto, para infraestructura con nivel de tránsito NT1 se requiere el uso de una MDC. Debido a que el tamaño máximo de las partículas de los agregados suministrados por Concescol fue de 19 mm se construyó una mezcla MDC-19. Esta mezcla se caracteriza por tener los límites de gradación que se presentan en las curvas granulométricas de la Fig. 4.

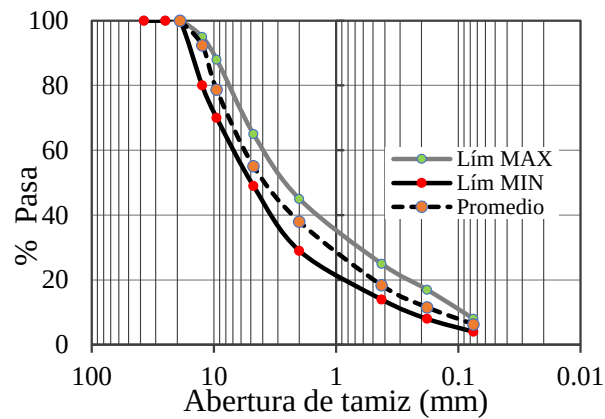


Figura 5. Límites máximos y mínimos de Abertura Tamiz para MDC 19.

A partir del estudio de Vidal *et al.* (2014) fue posible identificar los siguientes hechos:

- i. se demostró que modificar el cemento asfáltico con PET no genera una mezcla homogénea y tampoco tiene efecto en las propiedades mecánicas como viscosidad y ablandamiento;
- ii. el punto de fusión medido para el PET fue de 230 °C lo cual implica un alto consumo de energía para poder mezclar el PET y el cemento asfáltico por vía húmeda.
- iii. la viscosidad del PET en estado líquido es muy alta por lo que no se recomienda mezclar con el cemento asfáltico en este estado y adicionalmente, una vez alcanzado el estado líquido del PET, éste se solidifica rápidamente lo que hace difícil mezclar con el cemento asfáltico. Por esta razón, se eligió el método de mezcla por vía seca para preparar la mezcla asfáltica modificada con PET que fue evaluada en este estudio.

Los diferentes estudios que han incluido PET para modificar mezclas asfálticas han utilizado porcentajes que varían entre 2% y 22% (Moses, 2019; Movilla-Quesada *et al.*, 2019; Arteaga, 2018; Flores *et al.*, 2018; Vidal *et al.*, 2014). A pesar que la mayoría de

estos estudios, en general obtuvieron resultados en el que la adición de PET mejoró las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, los resultados de deformación de estas mezclas modificadas con los porcentajes de PET (5%, 8% y 11%) evaluados por Vidal *et al.* (2014) fueron excesivas y no cumplieron con las especificaciones técnicas de la norma Invias (2013). De acuerdo con Vidal *et al.* (2014) estos resultados sugieren no emplear PET para modificar mezclas asfálticas, al menos en esos porcentajes. De esta manera, en este trabajo se seleccionaron porcentajes menores al 5% con el fin de no reproducir los mismos resultados del estudio de Vidal *et al.* (2014) y estableciendo los porcentajes de 1%, 2%, 3% y 4% de PET dosificados en la mezcla óptima de trabajo de acuerdo con el diseño Marshall. En la Tabla 4 se muestra el programa experimental de este estudio.

Tabla 4. Resumen cantidad de muestras de prueba, Fuente elaboración propia.

% óptimo de asfalto	
% PET	N° de muestras (Briquetas)
1	3
2	3
3	3
4	3
Total	12

4.2 Fabricación de las muestras de ensayo

La fabricación y dosificación de las muestras de ensayo se realizó de acuerdo con lo dispuesto en la norma de ensayo INV E-748 (2013) en la cual se indica que el mezclado de las muestras con cemento asfáltico se realiza en caliente como se muestra en la Fig. 6. En la Fig. 7 se muestra la obtención de PET para su dosificación en la mezcla.



Figura 6. Adición de asfalto a la mezcla y mezcla manual en caliente. Fuente: INV 748 (2013).



Figura 7. Obtención PET triturado. Fuente elaboración propia.

La fabricación de la mezcla con PET requiere de medidas de cuidado debido a que las temperaturas de mezclado son mayores a las comunes, es decir de 110°C a 200 °C aproximadamente, por lo cual fue necesarios utilizar elementos de protección tal como se observa en la Fig. 8.



Figura 8. Proceso de fabricación de las muestras. Fuente elaboración propia.

El proceso de compactación es el dispuesto en la norma INV E- 748 usando el martillo de compactación manual ejerciendo una energía de compactación de 75 golpes por capa para cada muestra (ver Fig. 9).



Figura 9. Proceso de compactación con martillo Marshall. Fuente elaboración propia.

En la Fig. 10 se muestran las briquetas obtenidas una vez se compactaron con el martillo Marshall y dejadas en reposo durante 24 horas.



Figura 10. Muestras de ensayo obtenidas. Fuente elaboración propia.

4.3 Procedimientos de caracterización física y mecánica de las muestras de ensayo

La caracterización física de las muestras de ensayo consiste en obtener los valores de peso unitario y porcentaje de vacíos con los que queda cada uno de los porcentajes de material aglomerante empleada en cada una de las mezclas. Para la determinación de los pesos unitarios de las mezclas se emplean los procedimientos descritos en las normas INV E – 733 determinación de los pesos en el aire, peso saturado superficialmente seco (SSS) y peso inmerso como se muestra en la Fig. 11.



Figura 11. Dispositivo para la determinación de los tres pesos para la determinación del peso específico de la mezcla. Fuente elaboración propia.

En la Fig. 12 se muestra el procedimiento de secado superficial de la briqueta para obtener el estado SSS. Este procedimiento de secado se describe en la norma de ensayo INV E – 734 (2013).



Figura 12. Obtención del estado saturado con superficie seca. Fuente: Norma INV 734.

4.3.1 Determinación del flujo y el valor de estabilidad de las mezclas asfálticas

Previo al ensayo de estabilidad y flujo mediante el equipo Marshall se debió estabilizar la temperatura de las briquetas en un baño termostático (Baño de María), con agua a una temperatura de 60°C como se ilustra en la Fig. 13.



Figura 13. Saturación y estabilización de la temperatura indicada de ensayo Marshall.

5 RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la mezcla base o de referencia en el método Marshall.

5.1 Determinación de la mezcla de trabajo

En la Fig. 14 se presenta la variación del peso unitario de la mezcla asfáltica en función del contenido de asfalto. En esta figura se muestra que al incrementar el contenido de asfalto la tendencia obtenida a partir de una regresión polinómica de grado 2, indica un aumento del peso unitario hasta un valor máximo cercano a 2.29 g/cm^3 para un contenido de asfalto ligeramente mayor a 5.5%. A partir de este valor se evidencia un descenso en la curva de tendencia.

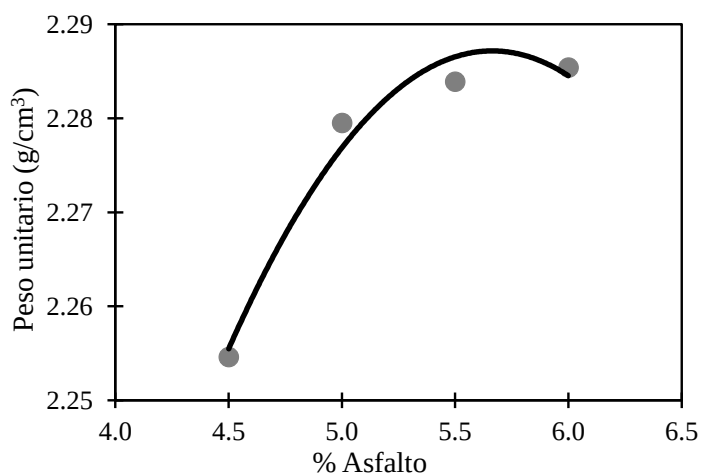


Figura 14. Variación del peso unitario con el contenido de asfalto.

En la Fig. 15 se muestra la variación del porcentaje de vacíos con el contenido de asfalto y se observa que el porcentaje de vacíos de la mezcla disminuye con el incremento del contenido de asfalto hasta un valor mínimo de 3%.

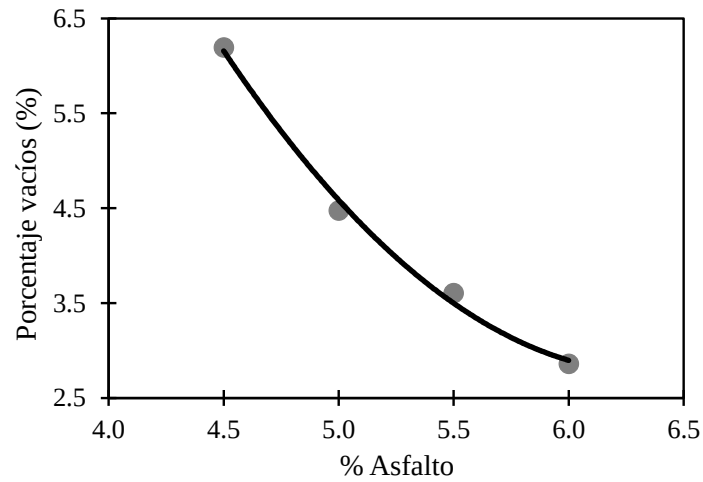


Figura 15. Variación del porcentaje de vacíos con el contenido de asfalto.

En la Fig. 16 se evidencia un incremento de la estabilidad hasta un porcentaje de asfalto de 5.5% en el que se obtuvo la máxima estabilidad de 12.2 kN.

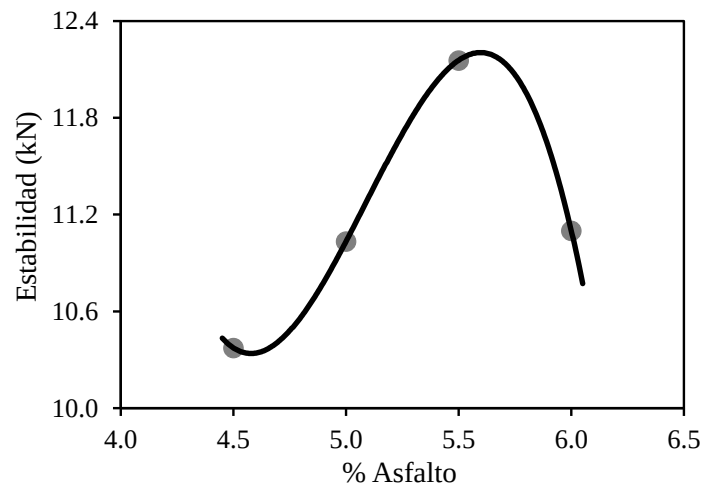


Figura 16. Variación de la estabilidad de la mezcla con el contenido de asfalto.

En la Fig. 17 se muestra el cambio del flujo de la mezcla con el contenido de asfalto en la cual se observa que el flujo incrementa a medida que aumenta el contenido de asfalto.

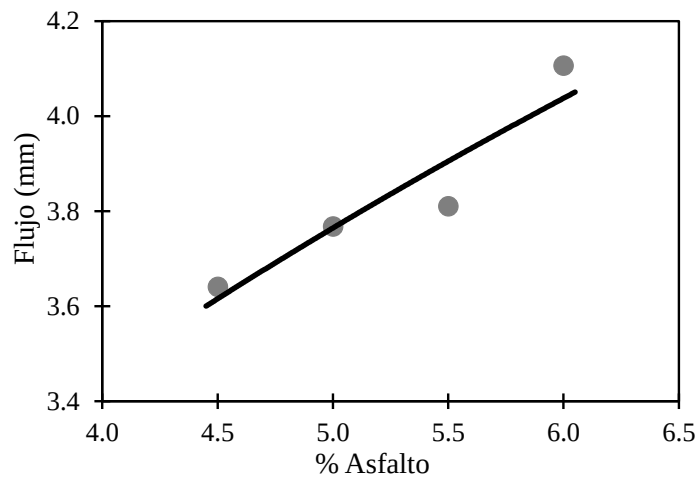


Figura 17. Variación del flujo de la mezcla con el contenido de asfalto.

En la Fig. 18 se muestra el porcentaje de vacíos en los agregados para los diferentes contenidos de asfalto evaluados en este estudio. En esta figura se observa que el porcentaje mínimo de vacíos en los agregados de la mezcla se presentó para un contenido de asfalto de 5%.

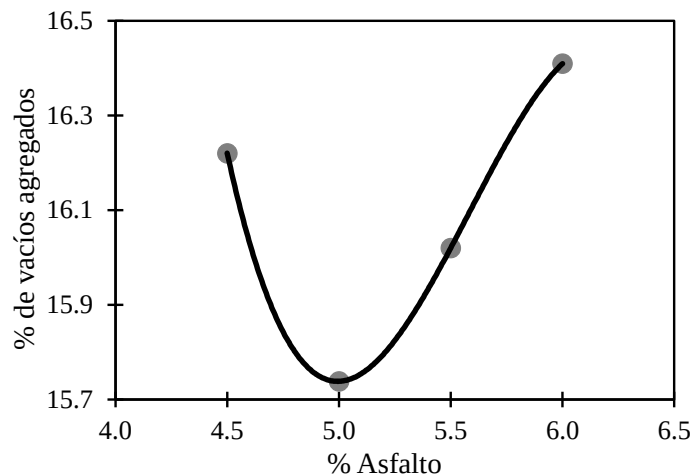


Figura 18. Variación del % de vacíos de agregados con el contenido de asfalto.

Finalmente, en la Fig. 19 se muestran los diferentes valores de relación estabilidad/flujo de la mezcla y se observa que la máxima relación estabilidad/flujo se obtuvo para un contenido de asfalto de 5.5%.

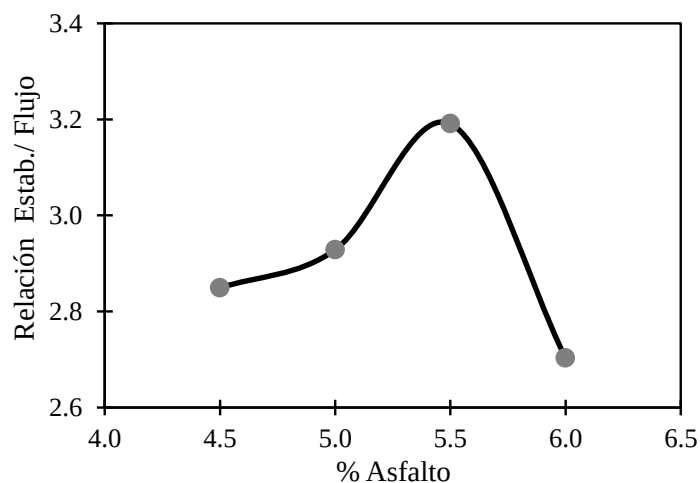


Figura 19. Variación de la relación estabilidad/flujo con el contenido de asfalto.

De acuerdo con las curvas presentadas en las Figs. 14 a 19 se puede observar que el valor óptimo de porcentaje de asfalto es del 5.5%. Un resultado similar también fue obtenido por Moses (2019) quien obtuvo un valor óptimo de contenido de asfalto de 5.3%. En la Tabla 5 se resumen los valores de los parámetros medidos de la mezcla de referencia con base en el método Marshall. En esta tabla también se muestran los valores establecidos en la Tabla 450.10 de la Norma Invias (2013) y el cumplimiento de los mismos. Con base en los resultados presentados en la Tabla 5 se definió como fórmula de trabajo y muestra patrón de este estudio, una mezcla con gradación MDC-19 y contenido óptimo de asfalto 60-70 de 5.5 %.

Tabla 5. Resultados de los parámetros medidos con el procedimiento Marshall de la mezcla de referencia.

Parámetro	Valor	Requisito NT1	Cumplimiento
Contenido de asfalto (%)	5.50	***	Cumple
Peso unitario mezcla (g/cm ³)	2.28	***	Cumple
Estabilidad Marshall (kN)	12.16	Mínimo 5	Cumple
Flujo (mm)	3.80	Entre 2,0 a 4,0	Cumple

Vacíos con aire (%)	3.61	Entre 3,0 a 5,0	Cumple
Vacíos en agregados (%)	16.02	Mínimo 15	Cumple
Relación Estabilidad/Flujo(kN/m)	3.19	Entre 2,0 a 4,0	Cumple

5.2 Mezcla asfáltica con la adición de PET

Para estudiar el comportamiento de una mezcla asfáltica dosificada con PET se usaron las cantidades que se indican en la Tabla 6.

Tabla 6. Variables para tener resultados confiables fuente elaboración propia.

% óptimo de asfalto	% PET	N° de briquetas	Temperatura de mezclado
5.5	0%	3	200°C
5,5	1%	3	200°C
5,5	2%	3	200°C
5,5	3%	3	200°C
5,5	4%	3	200°C

La primera variable que se evaluó en las condiciones anteriores fue la masa unitaria. Los resultados obtenidos de la prueba de la determinación del peso unitario para los dos tipos de mezclas se presentan en la Fig. 20.

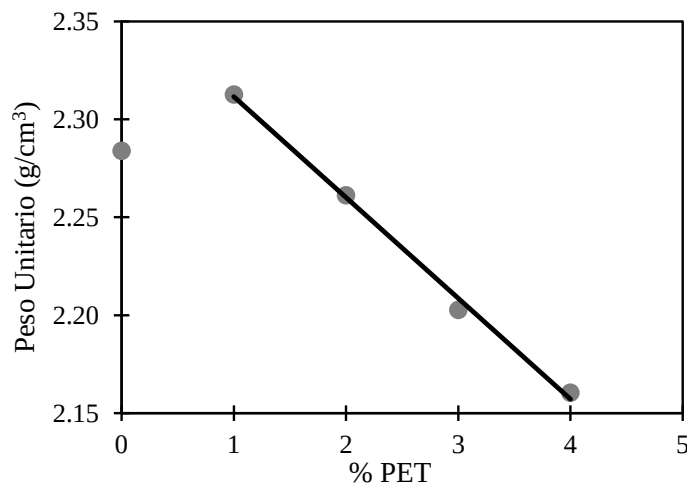


Figura 20. Variación del peso unitario con el contenido de asfalto.

En la Fig. 21 se muestran los resultados obtenidos para el ensayo de estabilidad realizado de acuerdo con la metodología Marshall. En esta figura se observa que el valor máximo de estabilidad de 15 kN se obtuvo para 2% de PET y 5.5% de asfalto en la mezcla. En esta

figura también se indica en línea discontinua el valor mínimo (5 kN) establecido por el artículo 450 de la Invias (2013) para carreteras NT1.

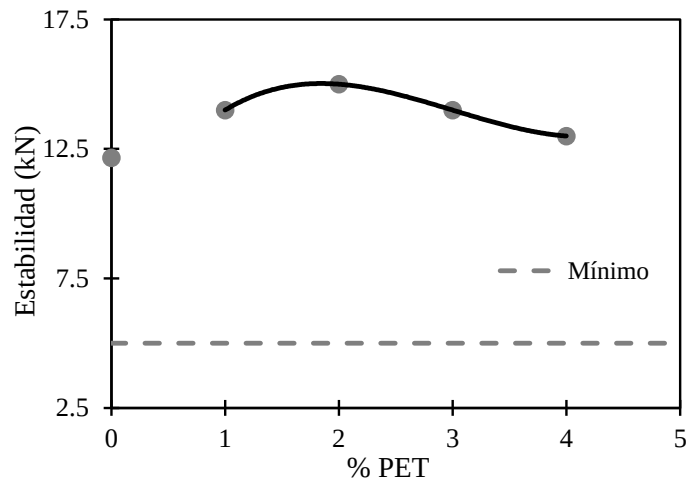


Figura 21. Variación de la estabilidad de la mezcla con el contenido de PET.

En la Fig. 22 se presenta la variación del flujo con el porcentaje de contenido PET. En esta figura se puede observar que se obtuvo un valor mínimo de flujo de 3.81 mm para 2% PET en la mezcla. En esta figura también se indica en línea discontinua el valor mínimo (2 mm) y máximo (4 mm) establecido por el artículo 450 de la Invias (2013) para carreteras NT1.

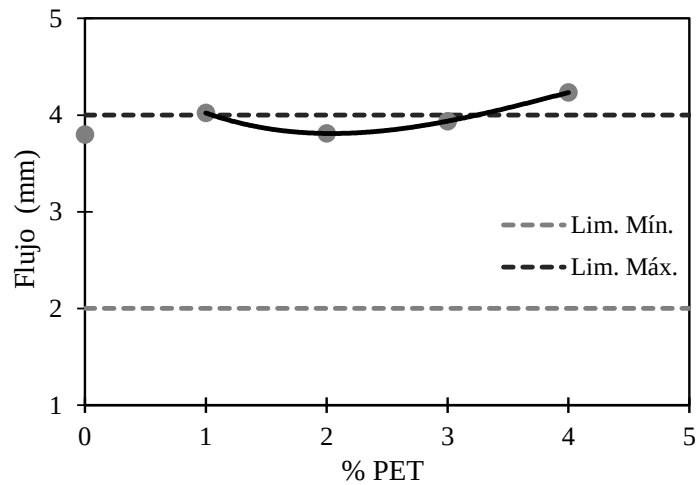


Figura 22. Variación del flujo de la mezcla con el contenido de PET.

En la Fig. 23 se presenta la variación de la relación estabilidad/flujo con el porcentaje de contenido PET. En esta figura se puede observar que se obtuvo un valor máximo de flujo cercano a 4 kN/mm para 2% PET en la mezcla. En esta figura también se indica en línea discontinua el valor mínimo (2 kN/mm) y máximo (4 kN/mm) establecido por el artículo 450 de la Norma Invias (2013) para carreteras NT1.

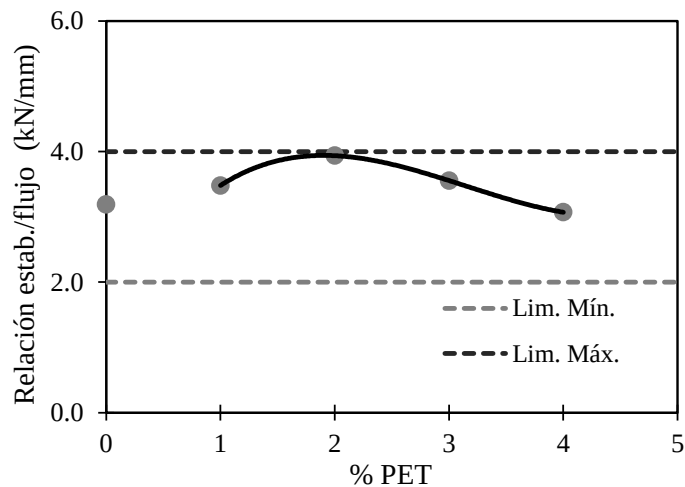


Figura 23. Relación estabilidad/flujo en función del %PET.

Los porcentajes de vacíos en la mezcla fueron analizados como vacíos presentes en toda la mezcla, los cuales se presentan en la Fig. 24, y vacíos en los agregados que se muestran en la Fig. 25.

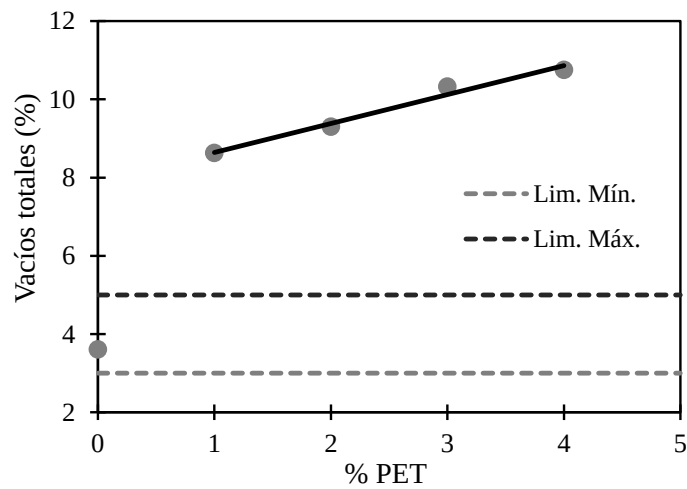


Figura 24. Variación de vacíos totales en la mezcla con el contenido de PET.

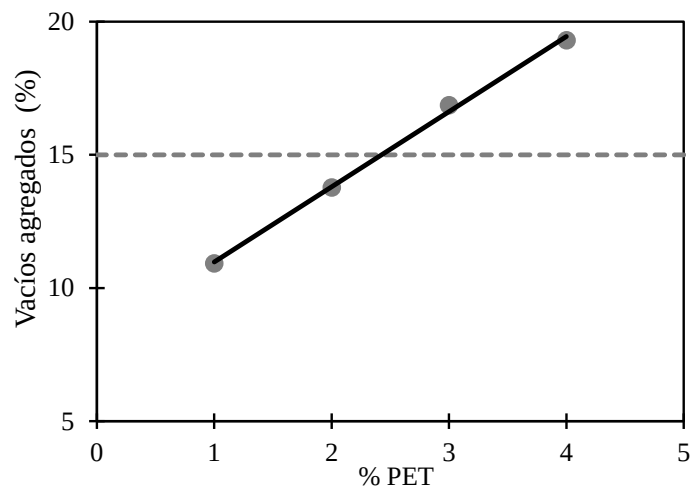


Figura 25. Variación del % de vacíos en los agregados con el contenido de PET.

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Mezcla modificada

En la Fig. 20 se mostró la variación del peso unitario de la mezcla asfáltica con el porcentaje de PET. En el inicio de la curva mostrada en esta figura se observó un incremento del peso unitario de la mezcla antes de llegar al 1% de PET que se puede atribuir a que el volumen de PET es muy pequeño, lo que no produce un desplazamiento de agregados más pesados, si no que trabajan en conjunto en la mezcla. Por el contrario, cuando se supera el 1% de PET en la mezcla el peso unitario disminuye linealmente con el aumento de % de PET debido a que este material reemplaza un mayor volumen de agregado de modo que la mezcla se vuelve más liviana.

En la Fig. 21 se presentó la variación de la estabilidad con el porcentaje de PET. En esta figura se pudo observar que el incremento de la estabilidad de la mezcla con 2% de PET fue 23% mayor con respecto a la mezcla que no contenía PET. En el estudio de Moghaddam *et al.* (2013) el incremento de la estabilidad fue en promedio 10% e independiente del contenido de asfalto. Moses (2019) por el contrario encontró que la estabilidad del concreto asfáltico disminuyó con la adición de 4% o más de PET. Los valores de estabilidad obtenidos en este estudio permanecieron casi constantes, con un valor promedio de 14 kN, al incrementar el % de PET. Adicionalmente, los valores de estabilidad para los diferentes porcentajes de PET resultaron en promedio 2.8 veces mayores al valor mínimo (5 kN) establecido por el artículo 450 de la Invias (2013) para carreteras NT1.

En la Fig. 22 se presentó la variación del flujo con el porcentaje de contenido PET y fue posible observar que el flujo no presentó una variación significativa con la adición de PET lo cual indica que este componente no incrementa la capacidad de deformación de la mezcla lo cual representa una ventaja debido a que los valores de flujo de las mezclas

estuvieron muy cercanos al límite superior de flujo de 4 mm establecido por el artículo 450 de la Invias (2013). El flujo de la mezcla con 4% de PET fue el único valor que superó el límite superior de 4 mm lo cual puede ser atribuido a que este contenido de PET desplaza parte del agregado que rigidiza la mezcla.

Los valores obtenidos de la relación entre estabilidad y flujo se mantuvieron en un rango de valores entre 3 kN/mm y 4 kN/mm como se observa en la Fig. 23, y en promedio, es 10% mayor a la relación entre estabilidad y flujo obtenida para la mezcla sin contenido de PET. En esta figura se observa que los porcentajes de PET incluidos en este estudio cumplieron satisfactoriamente los requisitos de este parámetro para carreteras NT1. Awaeed *et al.* (2015) reportaron valores que variaron entre 2.72 y 5.37 kN/mm con porcentajes de 6%, 8% y 10% que superaron el límite máximo de 4 kN/mm.

En la Fig. 24 se presentó la variación de los vacíos presentes en toda la mezcla en función del porcentaje de PET. El incremento en los vacíos que se observa en esta figura fue en promedio 3 veces aproximadamente el porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica convencional. El incremento en los vacíos en la mezcla puede ser debido a energías de compactación insuficientes provocadas por falta de cohesión entre el cemento asfáltico con los agregados.

De acuerdo con los resultados obtenidos y con las variables acá analizadas, se puede optar por usar 2% de material reciclado PET en la mezcla cuando se emplea agregado redondeado de procedencia sedimentaria, asfalto 60 – 70 con óptimo de 5.5% de material asfáltico y realizando procedimientos para mezcla densas en caliente, tomando en cuenta que la densidad disminuirá en un 23% por lo que se debe hacer un ajuste de peso volumétrico.

6.2 Verificación

Con el fin de proporcionar la mayor cantidad de datos posibles y profundizar más el análisis de los resultados de la mezcla modificada, se realizó una serie de ensayos adicionales en 6 briquetas con diferentes contenidos de asfalto con 2% de PET. En la Fig. 26 se observa que al disminuir el contenido de asfalto con respecto al óptimo de 5.5%, el peso unitario y estabilidad disminuyen, mientras que el flujo prácticamente no varía. Sin embargo, los valores de estabilidad siguen siendo mayores al mínimo establecido por el artículo 450 de la Invia (2013) para carreteras NT1 como se observa en la Fig. 26b, mientras que los valores de la relación estabilidad/flujo estuvieron dentro de los límites también indicados por el artículo 450 de la Invia (2013) para carreteras NT1 (ver Fig. 26d).

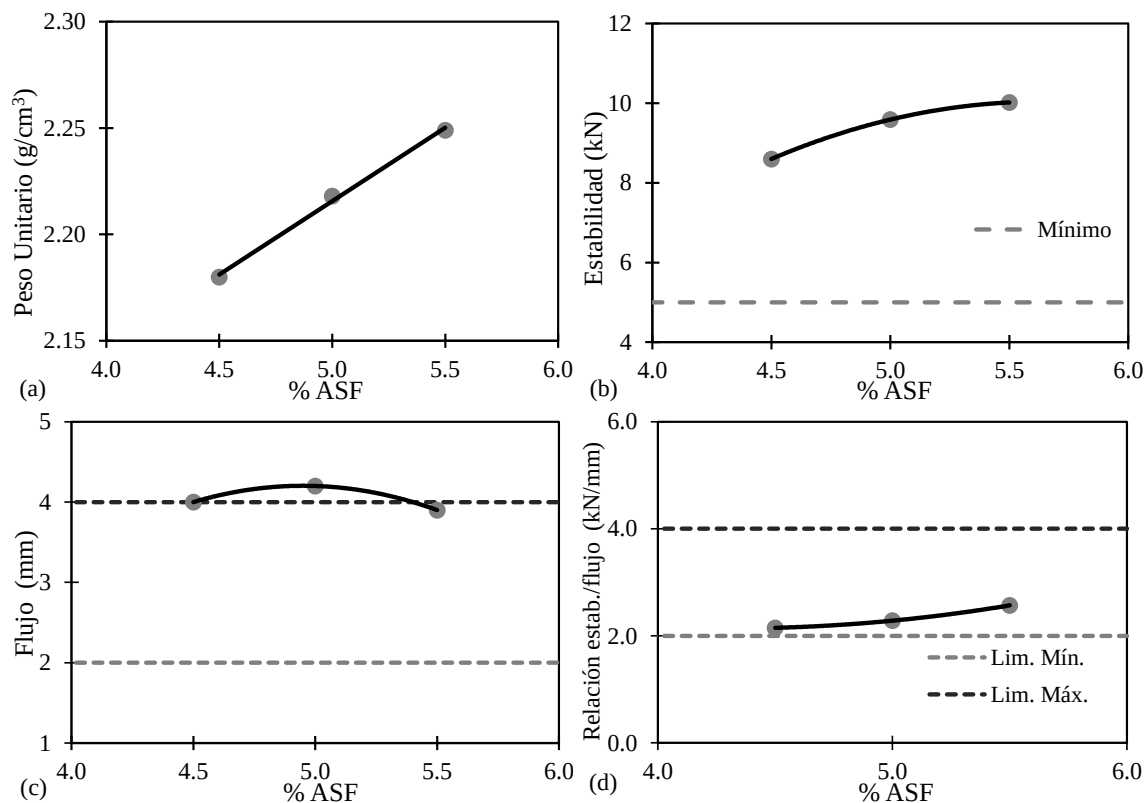


Figura 26. Variación del peso unitario, estabilidad y flujo con el porcentaje de asfalto para 2% de PET.

6.3 Trabajabilidad

En el presente estudio se llevaron a cabo tres fases experimentales, la primera en la cual se varió el contenido de PET, la segunda en la que se cambió el contenido de asfalto y en la tercera en la que se mantuvo constante el porcentaje de PET de 2% y se vario el % de asfalto. No fue posible establecer criterios de trabajabilidad debido a que fueron imperceptibles durante la fabricación de las muestras.

7 Conclusiones

En recientes años se han realizado diferentes estudios sobre el asfalto modificado con materiales tales como caucho, PEAD, PVC, PET, entre otros. En este trabajo se evaluó el comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con 0%, 1%, 2%, 3% y 4% de PET, por vía seca, a partir de los parámetros obtenidos por el método Marshall. Al llevar a cabo el trabajo fue posible obtener las conclusiones que se presentan a continuación:

- Los porcentajes de contenido de PET que permitieron cumplir los requisitos de la Norma Invias (2013) para una vía NT1 fueron el 1% y 2%. Por tanto, el máximo % de PET utilizable para modificar una mezcla asfáltica es 2%.
- Cuando se adicionó PET, las mezclas asfálticas incrementaron propiedades como la estabilidad hasta en un 5% comparado con la misma mezcla sin PET, mientras que el flujo se estabilizó tanto como una mezcla convencional sin modificación.
- La mezcla asfáltica modificada disminuyó el peso volumétrico hasta un 23 % con respecto al convencional. Esta disminución no se debe solamente al peso propio del polímero si no al aumento de vacíos.
- El PET aumentó los vacíos en la mezcla y fueron mayores al valor máximo de 8% establecido por la norma Invias (2013) por lo que es necesario utilizar un método de compactación de mayor energía.
- También de acuerdo con los análisis realizados, el uso de material polimérico en las mezclas asfálticas no afecta la trabajabilidad y homogeneidad entre el material cementante y los agregados, a menos que se disminuya el contenido de asfalto en más de 1% con respecto al porcentaje óptimo de diseño (5.5%).
- Es posible disminuir en 0.5% el contenido de asfalto en la mezcla cuando se usa 2% de PET ya que cumple los requisitos para vías NT1 y su trabajabilidad no se vea afectada. Esto podría disminuir costos en la fabricación de la mezcla

asfáltica modificada y disminución de huella de carbono provocado por el uso y fabricación de material asfáltico.

8 Recomendaciones:

Para futuros estudios se recomienda que los procesos de compactación sean basados en los valores de densidad, es decir que la energía de compactación sea la suficiente para obtener valores de densidad comparables con los de un pavimento convencional, esto puede lograrse con un compactador giratorio tipo Super Pave.

Es recomendable una mayor cantidad de variables en futuros estudios donde se varían porcentaje de polímero teleftalato de polietileno (%PET) contra porcentaje de cemento asfáltico (%CA). Se recomienda varias los tamaños del grano de PET.

Bibliografía

- AASHTO T245. (2015). *Standard Method of Test for Resistance to Plastic Flow of Asphalt Mixtures Using Marshall Apparatus*.
- Arteaga, J. (2018). *Análisis del comportamiento de la base–cemento para pavimentos con adición de residuos PET reciclado*. Bogotá.
- Askeland, D., Fulay, P., & Wright, W. (2017). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. México D.F.: Cengage learning.
- Awaeed, K., Fahad, B., & Rasool, D. (2015). Utilization of Waste Plastic Water Bottle as a Modifier for Asphalt Mixture Properties. *Journal of Engineering and Development*, 20(2), 89-108.
- Berrío, A. (2017). *Diseño y evaluación del desempeño de una mezcla asfáltica tipo MSC-19 con incorporación de Tereftalato de Polietileno reciclado como agregado constitutivo*. Medellín.
- Casanova, T., Rodríguez, S., & Katherine, P. (2012). *Caracterización física de ligantes asfálticos con cecabase para mezclas tibias*. Bogotá: PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA.
- Castro, W., Rondón, H., & Barrero, J. (2015). Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD. *Revista Ingeniería*, 21(1), 7-18.
- Escuela Colombiana de Ingeniería. (2008). *Identificación de plásticos Protocolo - Curso de materiales*. Bogotá: Facultad de Ingeniería Industrial.
- Estrella, G. (2016). *Aplicacion d ela metodologia para la modificacion de asfaltos convencionales mediante polimeros en el pavimento de la carretera Pilcomayo - Chupca 2016*. Huancayo, Perú: Universidad Peruana de los Andes.
- Fernández, O. (2007). *Evaluacion de comportamiento mecanico de mezclas SMA y Superpave empleado en asfalto modificado con polimeros SBS (Estireno - Butadieno-Estireno)*. Perú: Universidad Ricardo Palma.
- Flores, P., Bonifaz, H., Huertas, G., & Cazar, J. (2018). *Diseño de un pavimento flexible adicionando tereftalato de polietileno como material constitutivo junto con ligante*

- asfáltico AC-20. Retrieved 11 2018, from <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/8379/1/AC-C-ESPE-047870.pdf>
- Hermida, E. (2011). *Polimeros Guia didactica*. Retrieved from http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/09_Polimeros.pdf
- INV E-748. (2013). *Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato marshall*. Bogotá: Ministerio de Transporte. Retrieved from <ftp://ftp.ani.gov.co/Bogota%20Villavicencio%20Sector1/4%20HIDRAULICA/Auxiliar/ANX12%20Especificaciones%20Tecnicas%20Invias/normas%20Invias/Normas/Invias/Ensayos/Norma%20INV%20E-748-07.pdf>
- Invias. (2013). *Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras*. Bogotá, Colombia.
- Mintransporte. (2016). *Guia de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas*. Bogotá D.C.: Minsiterio de Transporte de Colombia.
- Moghaddam, T., Karim, M., & Soltani, M. (2013). Utilization of waste plastic bottles in asphalt mixture. *Journal of Engineering Science and Technology*, 8(3), 264 - 271.
- Moses, O. (2019). The use of polyethylene terephthalate waste for modifying asphalt concrete using the Marshall test. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 27(2), 9 – 15.
- Movilla-Quesada, D., Raposeiras, A., & Olavarria, J. (2019). Effects of recycled polyethylene terephthalate (PET) on stiffness of hot asphalt mixtures. *Advances in Civil Engineering*, 1-7.
- ONU. (2016). *cifras 2016 reclamación wwf ciudades sostenibles para el año 2050*. París.
- Palma, C., Ortiz, J., Belmonte, F., & Castañeda, A. (2015). *Modificación de asfalto con elastómeros para su uso en pavimentos*. Saltillo, Coah., México: Universidad Autónoma de Coahuila.
- Reyes, F., Guáqueta, C., Porras, L., & Rondón, H. (2013). Comportamiento de un cemento asfáltico modificado con un desecho de PVC. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 12(22), 75 - 84.

- Rodríguez, E., & Castillo, J. (2016). *Relación Costo-Beneficio del Uso del Asfalto Drenante en la República Dominicana*. Santo Domingo, Republica Dominicana: Facultad de Ciencias y Tecnologías-Escuela de Ingeniería Civil-Trabajo de Grado.
- Rodríguez, E., Rondón, H., Vélez, D., & Aguirre, L. (2006). Influencia de la inclusión de desecho de PVC sobre el cbr de un material granular tipo subbase. *Revis ta Ingenierías Universidad de Medellín*, 5(9), 21-30.
- Rondón, H., & Reyes, F. (2015). *Pavimentos: Materiales, construcción y diseño*. Bogotá: Ecoe Ediciones.
- Rondón, H., Fernández, W., & Castro, W. (2010). Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD). *Revista Ingeniería de Construcción*, 25(1), 83-94.
- Sampedro, A., Val, M., Gallego, J., Querol, N., & Pozo, J. (2012, Diembre). Huella de carbono del reciclado en planta asfáltica en caliente con altas tasas de RAP. *Asfaltos y pavimentos; Huella de carbono del reciclado en planta*, 13-22.
- Sánchez, A. (2006). *Análisis comparativo de las características físicas entre el asfalto convencional y el asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada*. Retrieved 11 19, 2018, from <http://repository.lasalle.edu.co/handle/10185/15501>
- Sareb. (2020, Abril 6). *huellasbysareb*. Retrieved from [huellasbysareb: https://www.huellasbysareb.es/ciudades/ciudades-sostenibles/](https://www.huellasbysareb.es/ciudades/ciudades-sostenibles/)
- Secretaria de Movilidad Bogotá. (2020, Abril 10). www.movilidadbogota.gov.co. Retrieved from [www.movilidadbogota.gov.co: https://www.movilidadbogota.gov.co/web/Noticia/as%C3%AD_avanzan_los_trabajos_de_extensi%C3%B3n_de_la_cicloruta_par_vial_carrera_16_19_trazado_norte](https://www.movilidadbogota.gov.co/web/Noticia/as%C3%AD_avanzan_los_trabajos_de_extensi%C3%B3n_de_la_cicloruta_par_vial_carrera_16_19_trazado_norte)
- Sulyman, M., Haponiuk, J., & Formela, K. (2016). Utilization of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) in Engineering Materials: A Review. *International Journal of Environmental Science and Development*, 7(2), 100-108.

- Téllez, A. (2012). *La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos: una aproximación al análisis narrativo de política pública en Bogotá*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- UNE-EN 12697-26. (2006). *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezcla bituminosa en caliente. Parte 26*.
- Veeduría Distrital. (2020, Abril 6). www.veeduriadistrital.gov.co. Retrieved from www.veeduriadistrital.gov.co:
<https://www.veeduriadistrital.gov.co/noticias/Bogot%C3%A1-l%C3%ADder-cumplimento-los-objetivos-desarrollo-sostenible-2030>
- Vidal, A., Ramirez, D., & Grajales, J. (2014). *Incorporacion de tereftalato de polietileno como agente modificador en el asfalto*. Pontificia Universidad Javeriana de Cali: Cali.