

INCORPORACIÓN DE TEREFTALATO DE POLIETILENO COMO
AGENTE MODIFICADOR EN EL ASFALTO

ALBERTO JOSÉ VIDAL S.

DANIELA RAMÍREZ L.

JHON ALEXANDER GRAJALES G.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI
FACULTAD DE INGENIERIA, DEPARAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E
INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI
2014

INCORPORACIÓN DE TEREFTALATO DE POLIETILENO COMO
AGENTE MODIFICADOR EN EL ASFALTO

ALBERTO JOSÉ VIDAL S.

DANIELA RAMÍREZ L.

JHON ALEXANDER GRAJALES G.

Trabajo de grado

Director

MARIA FERNANDA GARCÍA A.

Ingeniera Civil

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI
FACULTAD DE INGENIERIA, DEPARAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI
2014

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	11
ABSTRACT.....	12
INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS	16
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	16
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1. ANTECEDENTES.....	17
2.1.1. Estudio de los agregados.....	17
2.1.2. Estudio de asfaltos modificados con polímeros.	18
2.2. MARCO TEÓRICO	19
2.2.1. Clasificación de los pavimentos.	20
2.2.2. Asfalto	24
2.2.3. Asfaltos modificados	27
2.2.4. Agregados.....	28
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS	30
3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES USADOS EN LA INVESTIGACIÓN	30
3.1.1. Asfalto	30
3.1.2. Tereftalato de Polietileno (PET)	31
3.1.3. Agregado.....	32
3.2. PRUEBAS AGREGADOS.....	35
3.2.1. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.	35
3.2.2. Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm por medio de la máquina de los Ángeles	40
3.2.3. Equivalente de arena	43

3.2.4.	Gravedad específica y absorción de los agregados finos y gruesos..	45
3.2.5.	Partículas planas y alargadas	48
3.3.	PRUEBAS ASFALTOS	51
3.3.1.	Protocolo de mezcla para la modificación del asfalto.....	51
3.3.2.	Punto de ignición y de llama mediante la copa abierta Cleveland del asfalto	52
3.3.3.	Punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola.....	54
3.3.4.	Penetración de los materiales asfálticos	58
3.3.5.	Índice de Penetración de Cementos Asfálticos	61
3.3.6.	Ensayo al horno de lámina asfáltica delgada.	63
3.3.7.	Viscosidad del asfalto.....	69
3.3.8.	Análisis de pruebas de asfaltos.....	73
3.4.	PRUEBAS PET.....	75
3.4.1.	Punto de fusión PET	75
3.4.2.	Análisis granulométrico del Tereftalato de Polietileno	78
3.5.	DISEÑO MARSHALL.....	83
3.5.1.	Diseño Marshall asfalto sin modificar	83
3.5.2.	Diseño Marshall modificado.	93
4.	CONCLUSIONES	100
5.	RECOMENDACIONES.....	101
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Equipos y cantidad de agregado necesario para el ensayo de granulometría del agregado.....	37
Tabla 2. Equipos, cantidad de agregado y parámetros necesarios para el ensayo de desgaste.	42
Tabla 3. Resultados de desgaste en la máquina de Los Ángeles para el agregado.	42
Tabla 4. Resultados equivalente de arena del agregado.....	44
Tabla 5. Equipos y cantidad de agregado utilizados para el ensayo de gravedad específica.....	47
Tabla 6. Resultados de gravedad específico para el agregado fino.	48
Tabla 7. Resultados de gravedad específica para el agregado grueso.	48
Tabla 8. Cantidad de agregado y equipos utilizados para el ensayo de partículas planas y alargadas.....	50
Tabla 9. Índice de aplanamiento y alargamiento del agregado.....	50
Tabla 10. Cantidad por porcentaje de PET utilizado como modificador del asfalto.	52
Tabla 11. Equipos y cantidad de asfalto utilizados para el ensayo de punto de ignición por medio de la copa abierta de Cleveland.....	53
Tabla 12. Equipos, cantidad de asfalto y parámetros iniciales para el ensayo de punto de ablandamiento del asfalto.	56
Tabla 13. Equipos y cantidad de asfalto utilizado en el ensayo de penetración.	59
Tabla 14. Índice de penetración para cada uno de los tipos de asfaltos analizados.	62
Tabla 15. Equipos, cantidad de asfalto y temperatura necesaria para la realización del ensayo de lámina delgada.	65
Tabla 16. Pérdida de masa del asfalto sin modificar.....	65

Tabla 17. Punto de ablandamiento del asfalto envejecido en el ensayo de lámina delgada.	66
Tabla 18. Penetración del asfalto envejecido en el ensayo de lámina delgada.	66
Tabla 19. Penetración y punto de ablandamiento iniciales.	66
Tabla 20. Resumen de resultados de los ensayos realizados al asfalto.	74
Tabla 21. Equipos y cantidad de PET necesaria para el análisis granulométrico del PET.	79
Tabla 22. Parámetros de diseño dados por el INVIAS. Fuente: Artículo 450. INVIAS	86
Tabla 23. Equipos y cantidad de asfalto necesario para la realización del ensayo Marshall.	88
Tabla 24. Equipos y cantidad de asfalto utilizados para la fabricación de las briquetas con PET.	93
Tabla 25. Cantidad de PET por porcentaje para el diseño de las mezclas.	93
Tabla 26. Relación de peso y volumen de la briketa con 5% de asfalto.	94
Tabla 27. Relación de peso y volumen de la briketa con reemplazo de arena con 5% de PET.	94
Tabla 28. Relación de peso y volumen de la briketa con reemplazo de arena con 8% de PET.	95
Tabla 29. Relación de peso y volumen de la briketa con reemplazo de arena con 11% de PET.	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los pavimentos. Fuente: Autores.	21
Figura 2. Ubicación municipio Coconuco. Fuente: Google Maps.	34
Figura 3. Composición geológica municipio Puracé. Fuente: Ingeominas. Atlas Geológico de Colombia.....	34
Figura 4. Curva granulométrica ideal del agregado.	36
Figura 5. Curva granulométrica natural del agregado obtenida en el laboratorio. .	38
Figura 6. Curva granulométrica del agregado con distribución 60% grava y 40% arena.....	39
Figura 7. Puntos de ablandamiento obtenidos para los tipos de asfalto de la investigación.	57
Figura 8. Penetraciones obtenidas para los tipos de asfalto de la investigación. .	60
Figura 9. Comparación puntos de ablandamiento del asfalto sin modificar antes y después de ser envejecido en el ensayo de lámina delgada.	67
Figura 10. Comparación penetraciones del asfalto sin modificar antes y después de ser envejecido en el ensayo de lámina delgada.	68
Figura 11. Definición simplificada de la viscosidad. Fuente: Arenas, Hugo. Tecnología del cemento asfáltico.....	69
Figura 12. Viscosidades obtenidas para el asfalto sin modificar y el asfalto modificado con 3% de PET.....	72
Figura 13. PET aglutinado en el asfalto. Fuente: Autores.....	74
Figura 14. Muestra de PET cuarteada. Fuente: Autores.....	76
Figura 15. PET derretido. Fuente: Autores.	77
Figura 16. Curva granulométrica del PET.....	79
Figura 17. PET tamizado. Fuente: Autores.....	80
Figura 18. Curva granulométrica del agregado con parcial de arena de 5% de PET.	81

Figura 19. Curva granulométrica del agregado con parcial de arena de 8% de PET.	82
Figura 20. Curva granulométrica del agregado con parcial de arena de 11% de PET.	82
Figura 21. Densidad Bulk Vs. % de asfalto de las briquetas.....	89
Figura 22. Estabilidad Vs. % de asfalto de las briquetas.	89
Figura 23. Flujo Vs. % de asfalto de las briquetas.....	90
Figura 24. % de vacíos con aire Vs. % de asfalto de las briquetas.....	91
Figura 25. % de vacíos en los agregados minerales Vs. % de asfalto de las briquetas.	92
Figura 26. % de vacíos llenos de asfalto Vs. % de asfalto de las briquetas.	92
Figura 27. Estabilidad obtenida por cada porcentaje de PET.	96
Figura 28. Flujo obtenido por cada porcentaje de PET.....	96
Figura 29. Comparación de las estabildades entre las briquetas sin modificar y las briquetas modificadas con PET.	99
Figura 30. Comparación de los flujos entre las briquetas sin modificar y las briquetas modificadas con PET.	99

GLOSARIO

ANDESITA: Es una roca ígnea de composición química intermedia cuyos minerales dominantes son: Anfíbol, plagioclasas ricas en sodio y calcio.

ANDESÍTICAS: Es una roca de color gris medio, de grano fino y de origen volcánico.

ANFÍBOL: Mineral compuesto de sílice, magnesia, cal y óxido ferroso, de color por lo común verde o negro, y brillo anacarado.

BASALTO: Roca ígnea de grano fino y composición máfica.

BIOTITA: Mineral compuesto por silicato de color negro a verdoso, exfoliable perfectamente en finas láminas flexibles.

EPICLASTOS: Rocas clásticas de ambiente sedimentario.

GRANÍTICAS: Roca ígnea de composición química félsica cuyos minerales dominantes son: cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa rica en sodio.

IGNIMBRITAS: Roca ígnea y depósito volcánico que consiste en toba dura compuesta de fragmentos de roca y fenocristales en una matriz de fragmentos vítreos

LAVA: Magma que alcanza la superficie terrestre

MAGMA: Volumen de roca fundida situada en profundidad, que incluye gases disueltos y cristales.

PIROCLASTOS: Tipo de textura la cual se produce a partir de restos de una erupción explosiva.

PIROXENO: Grupo de roca formada por minerales de silicato de composición variable, entre los cuales está: calcio, magnesio y predominan gran variedad de acero.

PLAGIOCLASA: Cada uno de los feldespatos que cristalizan en el sistema triclinico. Constituyen una serie componente de ciertas rocas ígneas básicas y tienen diversa proporción de óxidos de aluminio, con sodio y calcio.

PÓRFIDO: Roca ígnea con una estructura porfídica.

SILICATO: Cualquiera de los numerosos minerales que tienen el tetraedro silicio-oxígeno como su estructura básica.

RESUMEN

El Tereftalato de Polietileno (PET por sus siglas en inglés) es un tipo de plástico del cual se elaboran la gran mayoría de botellas plásticas. En el mundo se producen aproximadamente 12 millones de toneladas de PET anualmente¹, lo que hace que sea un material fácil de encontrar y foco de investigación debido a la cantidad de residuos que genera. Es un polímero termoplástico lineal, por lo que puede ser deformable o flexible a altas temperaturas. Esto lo convierte en un material de fácil reciclaje.

El objetivo del proyecto es encontrar un porcentaje óptimo de uso, incorporándolo como un agente modificador de las mezclas asfálticas. El primer paso fue realizar ensayos de comportamiento mecánico a los agregados. Posteriormente se procedió a analizar la penetración, el punto de ablandamiento, la viscosidad y la durabilidad del asfalto. A continuación se realizó un diseño mediante el método Marshall, suponiendo un nivel de tránsito NT2, concluyendo que el porcentaje de asfalto a utilizar en la mezcla era 5%. Luego se plantearon tres porcentajes de PET, 3%, 5% y 7% de la masa total del asfalto, con los cuales se modificó el bitumen, pero el protocolo de mezcla utilizado provocó que el material se aglutinara en el fondo del recipiente, lo cual no es adecuado para lograr una mezcla homogénea. Por lo mencionado anteriormente, se optó por utilizar el PET como parcial de arena. Basándose en estudios anteriores se plantearon tres porcentajes de PET a utilizar; 5%, 8% y 11%, se analizó la estabilidad y el flujo de la mezcla modificada. Finalmente, los resultados obtenidos permiten concluir que el PET como parcial de arena, altera el comportamiento de la mezcla modificada de una manera considerable, mejorando la estabilidad en un 79% con 5 % de PET. Sin embargo, se obtuvo un aumento en la deformación de la mezcla, con 8% de PET, de 140% respecto a la mezcla sin modificar.

Palabras clave: PET, asfalto, Marshall, parcial de arena.

¹ El Ecologista. [En línea]. Disponible en: http://www.elecoligista.com.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=108&Itemid=65

ABSTRACT

The Polyethylene Terephthalate (PET) is a type of plastic from which the vast majority of plastic bottles are produced. Worldwide approximately 12 million tons of PET are produced annually, making it an easy material to find and focus of research due to the amount of generated waste. PET its a linear thermoplastic polymer, so that it may be deformable or resilient to higher temperatures. This makes it a material easy to recycle.

The objective of this project is to find an optimal percentage of use by incorporating it as a modifier of asphalt mixtures. In the first step was tested the mechanical behavior of aggregates. Then we proceeded to examine the penetration, softening point, viscosity and the durability of the asphalt. The mix design was performed with the Marshall method, assuming NT2 level of traffic, concluding that the percentage of bitumen used in the mixture was 5 %. Then, were used three percentages of PET, 3%, 5% and 7% of the total mass of the asphalt to modify the bitumen. The mixing protocol used caused agglutination of the material in the bottom of the container, which is not adequate to achieve a homogeneous mixture. It was chose to use PET as part of sand, with this idea and based in previous studies using PET, were raised three percentages, 5%, 8% and 11% so, stability and flow of the modified blend were analyzed. Finally, the results obtained indicate that PET, as part of sand, alters considerably the behavior of the mixtures, improving stability by 79% with 5% PET. However, an increase 140% in the deformation of the mixture with 8% of PET, compared to the unmodified mixture was obtained.

Key words: PET, bitumen, Marshall, partial of sand.

INTRODUCCIÓN

El Ministerio de Transporte, en un informe publicado en el 2005², habla de alrededor de 100 millones de toneladas al año de transporte de carga por carretera, lo que quiere decir que las vías son un factor primordial para la distribución de la mercancía que rige la economía Colombiana. Actualmente, INVIAS administra 11110.13 km de vía nacional, de los cuales solamente el 75% se encuentra pavimentado.

La logística en el país cada día tiene más desarrollo y para continuar esta evolución es necesario el buen desempeño de la infraestructura vial. Por esta razón, es de gran importancia conocer a fondo las características de los materiales con los que las vías son diseñadas.

Gran parte de las carreteras que componen la malla vial del país son diseñadas con concreto asfáltico. Algunas de estas vías presentan daños en los pavimentos, tales como: fisuras, deformaciones, pérdida de capas estructurales y daños superficiales. Algunos de estos daños son causados por rigidización del cemento asfáltico, envejecimiento o mal manejo del asfalto durante el proceso de colocación³.

En el país se está llevando a cabo uno de los proyectos de infraestructura vial más grandes de la última década: la Ruta del Sol. Esta permitirá la comunicación terrestre entre Bogotá y otras ciudades del interior del país y las ciudades portuarias de la Región Caribe.

Adicionalmente, para mejorar la competitividad, el país tiene como propósito la construcción de la Cuarta Generación de Concesiones Viales (4G), la cual consta

²Ministerio de Transporte: Oficina de planeación. Caracterización del transporte en Colombia: Diagnóstico y proyectos de transporte e infraestructura. Bogotá D.C.: 2005, p.2-12

³ Ministerio de Transporte. Pavimentos flexibles. En: Manual para el mantenimiento de la red vial secundaria. Ministerio de Transporte: Bogotá.

de aproximadamente 47 proyectos y en la que se invertirán cerca de \$47 billones de pesos en la próxima década⁴.

De acuerdo a lo anterior, la industria local de vías tendrá que doblar sus esfuerzos para la provisión de insumos, ya que, actualmente, el 30% de la fabricación de asfalto de las refinerías colombianas, especialmente Barrancabermeja, está copada con el sector II de la Ruta del Sol⁵.

En el año 2013, Ecopetrol puso en reparación la planta de refinería de Barrancabermeja, lo que prendió las alarmas en el Ministerio de Transporte debido a la poca producción de asfalto del país⁶.

Para el período del 2015 al 2020, se estima una demanda de asfalto de aproximadamente 1.4 millones de toneladas⁷, por lo que Ecopetrol se encuentra ampliando sus plantas para “aumentar su capacidad de producción de 55.000 toneladas-mes a 75.000 toneladas-mes para el año 2015”⁸. Sin embargo, esta capacidad no dará abasto para suplir los proyectos actuales y que vienen para el país respecto a la infraestructura vial.

Las propiedades de las mezclas asfálticas pueden ser modificadas para mejorar las características de los pavimentos convencionales. Hay casos en los cuales los pavimentos flexibles presentan problemas al no generar la resistencia adecuada frente a cargas producidas por el tráfico y la acción del clima. Para tratar de solucionar los problemas mencionados anteriormente, se ha optado por modificar las propiedades de los asfaltos, mediante la investigación e implementación de materiales que colaboren con los problemas estructurales y que sean amigables

⁴ SOLANO VARGAS, María Alejandra. Para las vías de 4G se necesitará importar acero y asfalto. [En línea]. La República, 2013. Disponible en: http://www.larepublica.co/infraestructura/para-las-v%C3%ADas-de-4g-se-necesitar%C3%ADa-importar-acero-y-asfalto_86706

⁵ Ibid.

⁶ CHACÓN GONZÁLEZ, Jairo. Asfalto o Concreto [En línea]. El Espectador. 2014. Disponible en: <http://www.elespectador.com/noticias/economia/asfalto-o-concreto-articulo-470923>

⁷ PEREIRA MARTÍNEZ, Rafael. Colombia se prepara para revolcón en infraestructura. [En línea]. ESAP, 2014. Disponible en: <http://www.esap.edu.co/nuevomunicipio/index.php/mas/transporte/item/365-colombia-se-prepara-para-revolcon-en-infraestructura.html>

⁸ PEREIRA MARTÍNEZ, Rafael. Op. Cit.

con el medio ambiente. Adicional a esto, y pensando en la gran cantidad de obras de infraestructura vial que vienen para el país, es de gran importancia la investigación de materiales que puedan ayudar a mejorar propiedades del asfalto y a disminuir la cantidad de este.

Un posible material para modificar asfaltos es el Tereftalato de Polietileno, PET por sus siglas en ingles. Este es un material comúnmente usado para envases de bebidas y textiles. En Colombia se produce aproximadamente 84.000 ton/año de PET, de las cuales se recicla solamente el 24%⁹. En el área del diseño de pavimentos, el PET es un material poco investigado y prácticamente nuevo como modificador de propiedades.

La presente investigación está orientada a la evaluación de la posibilidad de incorporar PET al asfalto, teniendo en cuenta los cambios que este le podría producir a sus propiedades, como la resistencia y la deformación.

⁹CEMPRE. Plásticos. Colombia. [en línea]. Disponible en:
<<http://www.cempre.org.co/documentos/ficha%20pl%C3%A1stico.pdf>>

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar qué características del ligante asfáltico se ven afectadas gracias a la utilización del tereftalato de polietileno para realizar mezclas asfálticas con mejores propiedades.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el agregado proveniente de la empresa CANTERAS LTDA mediante ensayos estipulados por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS).
- Determinar las características del asfalto a utilizar para conocer su comportamiento mediante ensayos estipulados por INVIAS.
- Calcular el punto de ignición del Tereftalato de Polietileno (PET) y su temperatura de fusión, mediante la aplicación de incrementos de temperatura.
- Definir si es adecuado utilizar Tereftalato de Polietileno en una mezcla asfáltica para sugerir su uso.
- Verificar la compatibilidad de la mezcla asfáltica (asfalto y PET) con el agregado mediante diseños Marshall
- Calcular el porcentaje óptimo de Tereftalato de Polietileno a utilizar en la mezcla asfáltica para obtener la mejor respuesta mecánica del nuevo material compuesto.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

El desarrollo económico mundial y el uso de modo de transporte terrestre hacen que el estudio de la infraestructura vial de un país sea indispensable. Por esta razón, la investigación de nuevos materiales se ha convertido en un punto importante para el mejoramiento de carreteras existentes y por existir. Profesionales han buscado la manera de mejorar propiedades en los pavimentos, tanto flexibles como rígidos, por medio de la implementación de diferentes materiales que contribuyan a la resistencia y durabilidad de nuevas carreteras, y mejoramiento de la red vial ya existente.

2.1.1. Estudio de los agregados.

La empresa CANTERAS LTDA se caracteriza por proveer materiales para implementar como base y sub-base en la estructura de un pavimento. Se han realizado estudios sobre las características físicas de los materiales, basándose en las normas INVIAS, con el fin de conocer si son aptos para la construcción. La empresa GEOFÍSICA¹⁰ realizó una caracterización al material producido por la empresa CANTERAS LTDA. Este material era un triturado para pavimento de concreto hidráulico y se utilizó en la construcción de vía que comunica el departamento del Huila con el Cauca. Se tomó una muestra del material triturado y se le realizaron los siguientes ensayos de granulometría (E-213) y Dureza (E-218) en la máquina de los ángeles. Se encontró que el material está mal gradado ya que para triturados donde los porcentajes de partículas retenidas esta entre el tamiz de una pulgada y tamiz No.4, los valores tienen que ser los siguientes: Tamiz 1" porcentaje que pasa entre 95% y 100%, tamiz ½" porcentaje que pasa entre 25% y 60%, tamiz No.4 porcentaje que pasa entre 0% y 10% y tamiz No.8 porcentaje que pasa entre 0% y 5%. Los resultados obtenidos dieron a conocer que el material no cumple con el porcentaje de partículas que pasan en el tamiz ½", ya que el porcentaje que pasa es solo del 14.8%. Por el contrario, en el ensayo de desgaste los resultados fueron excelentes. En la máquina de los Ángeles se obtuvo lo

¹⁰ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Pavimento de concreto hidráulico. Artículo 500-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

siguiente: 29.2% de desgaste donde el máximo admisible es de 40% con un material seco a 500 revoluciones, 5.1% de desgaste donde el máximo admisible es de 8% con un material seco a 100 revoluciones y 31.9% de desgaste donde el máximo admisible es de 60% con un material que fue sumergido en agua, durante 48 horas, a 500 revoluciones. Como se pudo observar en los resultados obtenidos el material pudo cumplir con estos dos parámetros, ya que la diferencia en la granulometría se pudo ajustar con los tamices utilizados por la trituradora.

2.1.2. Estudio de asfaltos modificados con polímeros.

“Los polímeros son sustancias macromoleculares naturales o sintéticas, obtenidas a partir de moléculas más sencillas por reacciones poliméricas”¹¹. Entre los más utilizados para el mejoramiento de pavimentos se encuentran el polietileno, el polipropileno y el poliestireno.

En el 2003, REYES y FIGUEROA¹² investigaron acerca de las propiedades del poliestireno en un asfalto blando producido por ECOPETROL en Barrancabermeja, Colombia. Para esto, realizaron muestras de asfalto incorporando poliestireno en un 1 % del peso total, a una temperatura de 170°C. El proceso de mezclado del asfalto con el poliestireno duró entre 50 y 60 segundos. Luego, las muestras fueron sometidas a pruebas y ensayos convencionales para así poder comparar los resultados con el asfalto sin poliestireno. Como resultado obtuvieron que el asfalto modificado tiene excelentes propiedades ligantes, pero se presenta una disminución en su penetración, lo que quiere decir que el poliestireno tiende a rigidizar el asfalto.

En el año 2007¹³, Avellán Cruz adicionó al asfalto un plastómero en diferentes cantidades, empezando por 0.5% de PET respecto a la cantidad de asfalto, y aumentando este porcentaje de a 0.5% hasta llegar a un máximo de 5%. A la mezcla modificada le realizaron ensayos básicos de caracterización y los resultados fueron

¹¹ ARENAS Lozano, Hugo León. Tecnología del cemento asfáltico. Popayán: FAID, (1999), p.285.

¹² REYES Lizcano, Fredy Alberto, FIGUEROA Infante, Ana Sofía y SÁNCHEZ Castillo, Arnulfo. Caracterización física de un asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada. En: Revista Épsilon. Diciembre, 2007. N°9. P.41-55.

¹³ AVELLAN, Martha. Asfaltos Modificados con Polímeros. Guatemala, 2007, Universidad de San Carlos, p,50.

comparados con los de la mezcla sin modificar. Como conclusión obtuvieron que la modificación del asfalto con polímeros plastómeros disminuye su susceptibilidad térmica, obteniendo una disminución considerable en la penetración y aumento en el punto de ablandamiento.

WULF, en el año 2008¹⁴, modificó el asfalto con látex, con el siguiente proceso: llevó el asfalto a una temperatura de 160°C y adicionó el látex mediante una bomba de diafragma, con un tiempo de agitación entre 1.5 y 2 horas. Como resultado obtuvieron un mejor comportamiento de la mezcla asfáltica modificada, en comparación con la mezcla sin modificar, respecto a la estabilidad y flujo de la misma.

El tereftalato de polietileno en el asfalto es un tema de poca investigación. WAN y ACHMAD¹⁵ crearon un “pavimento verde”, reemplazando una parte del agregado fino, para una mezcla asfáltica, con PET. La concentración del polímero varió entre el 5 y el 25 % del peso total del asfalto. Esta mezcla fue compactada con el aparato Marshall y luego se sometió a ensayos de rigidez y deformación. De acuerdo a esto se supo que el módulo resiliente del asfalto sin modificar es mejor que el del asfalto modificado, siendo más bajo cuando se tiene mayor contenido de polímero. Sin embargo, el polímero ayuda en la resistencia de la mezcla asfáltica respecto a la deformación permanente ocurrida por las cargas actuantes de una vía.

2.2. MARCO TEÓRICO

Un pavimento es una estructura multicapas, las cuales son previamente diseñadas y técnicamente deben ser constituidas con materiales adecuados y debidamente

¹⁴WULF, Fernando. Asfalto modificado con polímero. En: Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero. Chile, 2008, Universidad Austral de Chile, p.29.

¹⁵ WAN Mohd Nazmi, Wan Abdul Rahman, ACHMAD Fauzi, Abdul Wahab. Green Pavement Using Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as Partial Fine Aggregate Replacement in Modified Asphalt. En: Procedia Engineering. 2013. N°53. P.124-128.

compactados. Estas capas superpuestas están apoyadas en la subrasante o lo que comúnmente se conoce como suelo¹⁶.

Una estructura de pavimento básicamente funciona como un atenuador de carga en el cual la capa más superficial debe tener mejor resistencia y mejor comportamiento respecto a las diversas sollicitaciones que la capa subyacente. De la misma manera, la capa subyacente debe tener mejor resistencia que la capa inferior y así sucesivamente hasta llegar a la subrasante. Esto quiere decir que la capa superior respecto a la inferior debe tener un comportamiento mecánico notablemente mejor.

Por otro lado, un pavimento tiene como objeto proporcionar una superficie de rodadura lo suficientemente segura para transitar en ella en cualquier condición climática y bajo velocidades operacionales deseadas. Además, debe proporcionar comodidad a los diferentes tipos de vehículo que transiten sobre ella. Estas características están asociadas directamente a la superficie y su fricción.¹⁷

2.2.1. Clasificación de los pavimentos.

Los pavimentos se pueden clasificar en cuatro tipos: flexibles, semi-rígidos, rígidos y articulados. La Figura 1 muestra esta clasificación, de acuerdo a la estructura de cada uno de los tipos de pavimento.

¹⁶ MONTEJO FONSECA, Alfonso. Pavimentos, constitución y conceptos generales. En: Ingeniería de Pavimentos para Carreteras. Colombia: Ágora Editores Ltda., (2001), p.1.

¹⁷UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN. Introducción. En: Pavimentos, Texto Guía. Bolivia. (2004), p.2.

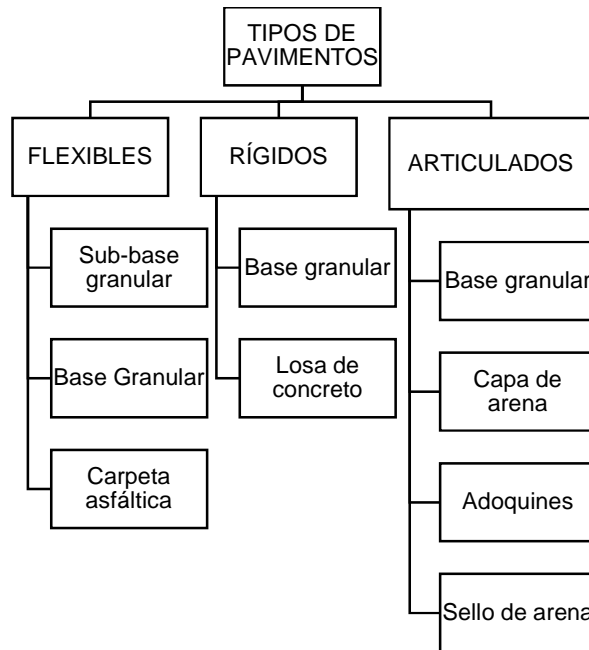


Figura 1. Clasificación de los pavimentos. Fuente: Autores.

A continuación se explica con mayor detalle cada uno de los tipos de pavimentos descritos en la Figura 1.

Pavimentos flexibles

El pavimento flexible es un sistema tricapa, cuya capa superior es de concreto asfáltico.”¹⁸ Al ser sometido a una carga, este tipo de pavimento sufre una deformación y, al cesar la carga, sufre una recuperación deseada. El uso de estos pavimentos se realiza principalmente en zonas donde hay abundante tráfico¹⁹. El pavimento flexible consta de tres capas fundamentales, las cuales cumplen las siguientes funciones:

¹⁸ DUQUE, Gustavo. Definición. En: Práctica recomendada para la ejecución y control de calidad de los pavimentos asfálticos o flexibles. (2002), p.1.

¹⁹ URBANISMO. Pavimentos flexibles. [En línea]. Disponible en: <http://www.urbanismo.com/pavimentos-flexibles/>

- *Sub-base granular*: La función de esta capa es netamente económica pues el aumento en su espesor reduce los costos asociados a las capas superiores. Si bien puede ser construida con materiales de alta calidad, no es lo aconsejable, por el factor costo.²⁰
- *Base granular*: Se construye con material de origen pétreo, ya sea de río o triturado en cantera, que no haya sufrido efectos de meteorización pues debe proporcionar un bloque resistente que sea capaz de transmitir la carga de la carpeta a la sub-base y a la sub-rasante.²¹ Mecánicamente debe reducir las tensiones verticales que las cargas por eje vehicular ejercen sobre las capas sub-base y sub-rasante, al igual que reducir las deformaciones de tracción que las mismas cargas ejercen sobre la carpeta.²²
- *Carpeta asfáltica*: Se conoce también como la superficie de rodamiento. Esta capa debe ser maleable en su colocación y lo suficientemente rígida de tal forma que proporcione una superficie estable y uniforme a los vehículos. De igual manera debe resistir los efectos abrasivos del tránsito, como impermeabilizar el pavimento de tal forma que las capas inferiores no sufran procesos de erosión, no se deterioren y finalmente socaven la estructura.²³

Pavimentos rígidos

Son aquellos que tienen como capa de rodadura una losa de concreto, que a su vez se encuentra apoyada sobre una sub-base granular. Se caracterizan por tener una larga vida útil y puede ser diseñada para todo tipo de tráfico. Este consta, principalmente, por las siguientes capas.

²⁰ MONTEJO FONSECA. Op. Cit., p.4.

²¹ *Ibíd.*, p.4.

²² UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN. Op. Cit., p.4.

²³ MONTEJO FONSECA. Op. Cit., p.4.

- *Sub-base granular*: Su función principal es impedir la acción de bombeo en las juntas y grietas del pavimento. También suministra apoyo uniforme y mejora el drenaje.²⁴
- *Losa de concreto*: Transmite y soporta el nivel adecuado de esfuerzos a los que es sometida.²⁵

Pavimentos articulados

La característica principal de este tipo de pavimentos es que la capa de rodadura está elaborada por adoquines o bloques de concreto pre-fabricados. Este tipo de pavimentos se utiliza, en su mayoría, en andenes, zonas peatonales y plazas, para tráfico peatonal, y en vías, calles y avenidas donde se presente tráfico vehicular liviano. Se conforma con la siguiente estructura:

- *Base*: Esta capa le brinda capacidad estructural al pavimento. Se encuentra ubicada entre la subrasante y la capa de rodadura.
- *Capa de arena*: Esta capa sirve de base para los adoquines y como filtro para el agua que penetre en el pavimento. Está compuesta con arena gruesa y limpia.²⁶
- *Adoquines*: son bloques de concreto pre-fabricados, los cuales deben tener una buena resistencia que les permita soportar las cargas del tránsito a las cuales va a estar sometido el pavimento.
- *Sello de arena*: Es el llenante de las juntas de los adoquines, sirviendo como sello de las mismas y está compuesto principalmente por arena fina.

²⁴ *Ibíd.*, p.5.

²⁵ *Ibíd.*, p.5.

²⁶ *Ibíd.*, p.7

2.2.2. Asfalto

El asfalto es un "material de color oscuro, que presenta propiedades ligantes y aglutinantes, conformado principalmente por hidrocarburos"²⁷. Este material se puede encontrar en forma natural, el cual es el producto de "procesos análogos que ocurren en la naturaleza"²⁸, o como residuo de procesos de refinación del petróleo.

En la pavimentación, el asfalto de mayor uso es el proveniente de la destilación del petróleo. Tiene la propiedad de ser un material termoviscoplastico²⁹, ya que presenta características semisólidas a temperatura ambiente pero también tiene la capacidad de total de fluidez a altas temperaturas. El asfalto es utilizado principalmente para obras civiles y conservación de vías.

En Colombia el asfalto es producido por Ecopetrol, el cual cuenta con tres refinerías principales ubicadas en Cartagena, Barrancabermeja y Apiay³⁰. De acuerdo a la refinería de la que provenga el asfalto, su composición será distinta y, por ende, sus propiedades serán diferentes.

Composición química

El asfalto "es una mezcla de numerosos hidrocarburos, mezclados en proporciones muy diferentes"³¹, que tienen como constituyentes el carbono, hidrogeno, azufre, nitrógeno, entre otros.

²⁷ARENAS LOZANO, Hugo León. Generalidades. En: Tecnología del Cemento Asfáltico. Colombia: FAID, (1999), p.17.

²⁸ARENAS LOZANO, Hugo León. El asfalto. En: Tecnología del Cemento Asfáltico. Colombia: FAID, (f), p.85.

²⁹BARIANI, Liedi, GORETTI, Laura, PEREIRA, Jorge y BARBOSA, Jorge. Ligantes asfálticos. En: Pavimentación asfáltica, Formación básica para ingenieros. Río de Janeiro: Gráfica Imprinta, (2008), p.25.

³⁰ECOPETROL. [en línea]. Disponible en: <http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=46&conID=37668>

³¹ARENAS LOZANO. Op. Cit., p.88.

Principalmente, el asfalto se compone de los siguientes elementos:

- *Asfáltenos*: Son partículas sólidas, que se precipitan del petróleo crudo y no tienen punto de fusión definido. Al calentarse forman una masa viscosa que se descompone, se hincha y se aglutina. Concentran los compuestos indeseables del asfalto ya que contienen los metales pesados y el azufre³².
- *Maltenos*: Están constituidos por anillos aromáticos, anillos nafténicos y una muy poca cadena parafínica. Estos regulan gran parte de las propiedades químicas de los asfaltos³³.
- *Resinas y aceites*: Actúan como agente estabilizador de los asfaltenos. Los aceites poseen un menor poder de adsorción.

Caracterización de los asfaltos

Para conocer las características y el comportamiento del asfalto, el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) recomienda hacer ensayos que ayudan definir si el tipo de asfalto cumple con los requisitos necesarios para que pueda ser utilizado como cemento asfáltico. Estos ensayos son los siguientes:

- *Penetración de los materiales asfálticos*³⁴: El objetivo principal de este ensayo es determinar la consistencia de los materiales asfálticos sólidos o semisólidos mediante la medición de la penetración de una aguja, liberada rápidamente durante un tiempo determinado, en una muestra representativa de asfalto en estado líquido.

³²Ibid., p.93.

³³ ARENAS LOZANO, Hugo. Op.Cit. p,93.

³⁴ Instituto Nacional de Vías. Penetración de los materiales asfálticos. Norma INV E-706. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

- *Método para determinar la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional*³⁵: Este ensayo busca determinar la viscosidad aparente del asfalto a una temperatura de 60°C ya que se desea conocer las temperaturas óptimas de manejo. Para esto se toma una pequeña muestra de asfalto y pone en un recipiente especial. Se sumerge un vástago cilíndrico en la muestra y se hace girar, manteniendo constante la velocidad y la temperatura. El torque que se produce determina la resistencia del asfalto a la rotación y, por ende, su viscosidad.
- *Puntos de ignición y de llama mediante la copa abierta de Cleveland*³⁶: Este ensayo busca conocer los puntos de ignición y de llama de productos derivados del petróleo, bajo condiciones de laboratorio controladas. Para esto, se llena la copa de Cleveland con una muestra de asfalto y se aumenta rápidamente la temperatura inicial de la muestra. Luego, se incrementa la temperatura de manera constante y lenta, acercándose al punto de ignición. Se pasa una llama a través de la copa en intervalos de tiempo. El punto de ignición será la temperatura más baja a la cual, pasando la llama, se incendian los vapores que se encuentran encima de la muestra. El punto de llama se dará cuando la aplicación de la llama haga que el aceite producido en la muestra se quemara al menos por cinco segundos.
- *Ensayo en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento*³⁷: El objetivo del ensayo es medir el efecto del calor y el aire sobre una lámina delgada de asfalto semisólido. Para esto se debe calentar la lámina en un horno a 163°C durante 85 minutos. Los cambios de masa producidos por el calor y el aire se determinan a partir de las diferencias de las propiedades físicas, antes y después de este ensayo (ductilidad, viscosidad y penetración), de la lámina de asfalto

³⁵ Instituto Nacional de Vías. Método para determinar la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional. Norma INV E-717. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

³⁶ Instituto Nacional de Vías. Puntos de ignición y de llama mediante la copa abierta de Cleveland. Norma INV E-709. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

³⁷ Instituto Nacional de Vías. Ensayo en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento. Norma INV E-720. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

2.2.3. Asfaltos modificados

En la mayoría de los casos, los asfaltos tradicionales son capaces de resistir la acción conjunta del tránsito y tienen un buen comportamiento respecto a los requisitos necesarios para el buen desempeño de un pavimento. Sin embargo, en la actualidad, muchos de estos asfaltos no tienen la capacidad de resistir estos factores, debido al aumento del volumen vehicular, las sobrecargas en los vehículos y la aparición de nuevos crudos, por lo que es necesario usar materiales modificadores que ayudan a mejorar las propiedades de los pavimentos.

Los asfaltos modificados son el producto de la incorporación de un polímero al asfalto convencional, con el fin de mejorar propiedades físicas y reológicas, disminuyendo susceptibilidad térmica y oxidación. Además, se trata de aumentar la resistencia de las mezclas asfálticas respecto a la deformación y ahuellamiento.³⁸

En la modificación de asfaltos se utilizan principalmente dos tipos de polímeros: elastómeros y plastómeros. Los primeros son polímeros de respuesta elástica y fácilmente deformables. Los segundos son más rígidos y no son deformables, ofreciendo resistencia al asfalto.³⁹

Se entiende que los polímeros “son sustancias macromoleculares naturales o sintéticas, obtenidas de moléculas más sencillas por reacciones poliméricas. Tienen un elevado peso molecular y su estructura se representa por la repetición de pequeñas unidades”⁴⁰.

³⁸ ARENAS LOZANO, Hugo León. Los asfaltos modificados. En: Tecnología del Cemento Asfáltico. Colombia: FAID, (s,f), p.281.

³⁹ AVELLAN CRUZ, Martha Dina. Asfaltos modificados. En. Asfaltos modificados con polímeros. Guatemala: 2007, p.32.

⁴⁰ ARENAS LOZANO, Hugo León. Op.Cit. p.281.

- *Elastómeros*: Son polímeros de respuesta elástica y fácilmente deformables. Entre los más utilizados se encuentra el caucho natural, los elastómeros termoplásticos (SBS) y los copolímeros de etilenoacetato de vinilo (EVA)⁴¹.
- *Plastómeros*: Son polímeros termoplásticos que se reblandecen con el calor y, dependiendo de la temperatura, pueden llegar a fluir. Estos rigidizan el asfalto, ofreciéndole resistencia. Son fácilmente moldeables cuando se les aplica la temperatura adecuada. Entre los más comunes se encuentran el polietileno, polipropileno, el poliestireno, entre otros.⁴²

2.2.4. Agregados

Un elemento a definir, el cual es de suma importancia, es el agregado. La palabra agregado se refiere a “cualquier combinación de arena, grava o roca triturada en su estado natural o procesado”⁴³. La grava comprende tamaños de partícula superiores a 2 mm y se obtiene mediante la explotación de montañas o de ríos. Por otro lado, la arena presenta tamaños inferiores a los 2 mm. Este material se encuentra principalmente en las orillas de los ríos y es producto de la desintegración de las rocas. Sin embargo, en el proceso de explotación de montañas también se puede obtener arena.

Al momento de realizar una mezcla asfáltica para utilizar como capa de rodadura, es de suma importancia tener agregados óptimos que cumplan con las especificaciones dadas por el INVIAS y que garanticen una estabilidad durante la vida útil del pavimento en que se use. Por esta razón se debe realizar un número de ensayos de dureza, durabilidad, geometría, limpieza y adhesividad para conocer si el agregado es apto para capa de rodadura. Para conocer estas características, el INVIAS recomienda realizar los siguientes ensayos:

⁴¹Ibid. p.286.

⁴²AVELLAN CRUZ, Op.Cit, p.32.

⁴³ Agregados. Colombia: ASOGRAVAS. [en línea]. Disponible en:
<<http://www.asogravas.org/Inicio/Agregados.aspx>>

- *Desgaste en la máquina de los Ángeles⁴⁴*: Con este ensayo se pretende conocer el porcentaje de desgaste del agregado grueso cuando es sometido a revoluciones con carga abrasiva en la máquina de los Ángeles.
- *Método para determinar partículas planas, alargadas o planas y alargadas de los agregados gruesos⁴⁵*: El objetivo del ensayo es establecer el porcentaje de partículas planas y alargadas del agregado, midiendo las partículas individualmente determinando las relaciones ancho/espesor, longitud/espesor o longitud/ancho.
- *Equivalente de arena de suelos y agregados finos⁴⁶*: El ensayo tiene por objeto determinar el porcentaje de polvo fino o material arcilloso, lo cual permite determinar en el campo la variación en la calidad de los agregados.
- *Gravedad específica y absorción para agregados gruesos⁴⁷ y finos⁴⁸*: El objetivo de este ensayo es determinar la gravedad bulk, la gravedad aparente y el porcentaje de absorción de los agregados gruesos y finos después de que estos han estado sumergidos en agua durante un período mayor a 15 horas.

⁴⁴ Instituto Nacional de Vías. Desgaste en la máquina de los Ángeles. Norma INV E-219. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

⁴⁵ Instituto Nacional de Vías. Método para determinar partículas planas, alargadas o planas y alargadas de los agregados gruesos. Norma INV E-240- Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

⁴⁶ Instituto Nacional de Vías. Equivalente de arena de suelos y agregados finos. Norma INVE E-133. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

⁴⁷ Instituto Nacional de Vías. Gravedad específica para agregados gruesos. Norma INV E-222. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

⁴⁸ Instituto Nacional de Vías. Gravedad específica para agregados finos. Norma INV E-223. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES USADOS EN LA INVESTIGACIÓN

A continuación, se describen los materiales utilizados en la investigación, con su respectiva procedencia.

3.1.1. Asfalto

El asfalto se clasifica según su grado de penetración a 25°C, según la norma ASTM D5. En Colombia, los cementos asfálticos de penetración 60/70 y 80/100 son los más comercializados.

Barrancabermeja es un municipio ubicado en el departamento de Santander y es sede de la refinería de petróleo más grande del país, conocido como el Complejo Industrial de Barrancabermeja. Actualmente, cuenta con una capacidad de refinación de 250 mil barriles de crudos livianos y medianos⁴⁹. Ecopetrol plantea la posibilidad de modernizar la refinería para subir la producción y adicionar la refinación de 175 mil barriles al día de crudos pesados⁵⁰.

Como producto final, el Complejo Industrial de Barrancabermeja ofrece los siguientes productos: Gasolina motor (corriente y extra), bencina, cocinol, diesel, queroseno, Jet-A, avigás, gas propano, combustóleo, azufre, ceras parafínicas, bases lubricantes, polietileno de baja densidad, aromáticos, asfaltos, alquilbenceno, ciclohexano y disolventes alifáticos.

⁴⁹ ECOPETROL. Refinación de pesados. [En línea]. Disponible en: <http://www.ecopetrol.com.co/documentos/carta126/refinacion.htm>

⁵⁰ Modernización de la refinería de Barrancabermeja [En línea]. Disponible en: <http://www.santandercompetitivo.org/proyectos-11-m/50-modernizacion-de-la-refineria-de-barrancabermeja-.htm>

3.1.2. Tereftalato de Polietileno (PET)

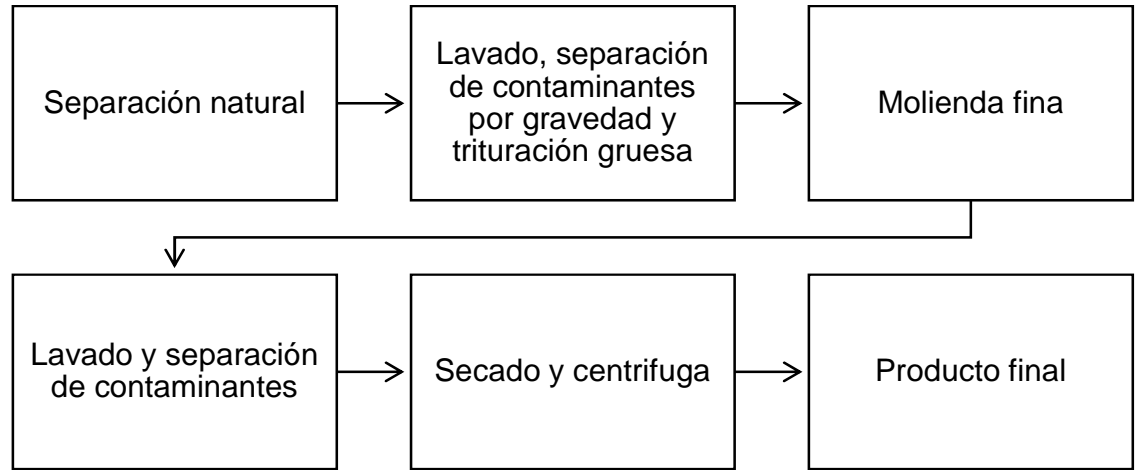
En Colombia se produce aproximadamente 84.000 ton/año de Tereftalato de Polietileno (PET), de los cuales se recicla solamente el 24%⁵¹. Este se encuentra principalmente en envases de bebidas y textiles.

Para el proceso de reciclaje del PET, se recuperan las botellas de plástico y se transportan a la empresa, donde se seleccionan por el color y se asegura el tipo de material. Después del proceso de selección, los plásticos elegidos se limpian, quitando las etiquetas y las tapas de las botellas, y se lavan para quitar cualquier sustancia contaminante. Durante el proceso de lavado, se realiza una trituración inicial del material. Luego, se lleva el material a la secadora y se almacena. Posteriormente, se somete a trituración donde el producto final es el PET en forma de hojuela o escama. El material se lava nuevamente y se somete a fuerza centrífuga, con lo cual se recupera el PET en polvo, residuo de la trituración. El producto final es enviado a empresas manufactureras, donde se producen vajillas, textiles, entre otros, las cuales usan como materia prima el PET reciclado. En el Esquema 1 se puede observar el proceso descrito anteriormente.

COCOPLAST S.A.S. fue la empresa encargada de proveer el PET para la investigación. Actualmente, esta produce los dos tipos de PET mencionados: en escamas y en polvo. Para la modificación del asfalto y el diseño de mezcla se utilizó PET en polvo, con una densidad de 1.38 g/cm³⁵².

⁵¹CEMPRE. Plásticos. Colombia. [en línea]. Disponible en: <<http://www.cempre.org.co/documentos/ficha%20pl%C3%A1stico.pdf>>

⁵² ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES UNIVERSIDAD DE VALLADOLID DEPARTAMENTO DE QUÍMICA. Propiedades y características. [en línea]. Disponible en: http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/pet/propiedades_y_caracteristicas.htm



Esquema 1. Proceso de reciclaje del PET. Fuente: Autores.

3.1.3. Agregado

Para la investigación se utilizó el agregado producido por la empresa CANTERAS LTDA, la cual se encuentra ubicada en la cabecera municipal de Puracé, Coconuco, como se observa en la Figura 2.

Coconuco se encuentra a 2850 msnm y tiene una temperatura promedio de 16°C. Está localizado en el *Nudo de Almaguer*⁵³ conocido comúnmente como macizo colombiano. En este, existe la red hídrica más importante del país, dado que nacen los principales ríos, entre ellos, el río Cauca y el río Magdalena.

La geología del municipio de Puracé obedece, en su mayoría, a unidades de rocas volcánicas terciarias-cuaternarias. Esta unidad está conformada por productos

⁵³ MOLANO BRAVO, Alfredo. El Macizo Colombiano. EL ESPECTADOR. [en línea]. Disponible en: <http://www.elespectador.com/noticias/temadeldia/el-macizo-colombiano-articulo-286548>

volcánicos de la Cadena de los Coconucos.⁵⁴ En la Figura 3 se puede probar esta información y se observa que Puracé, en su mayoría, consiste en: Q-Vi: *Andesíticas Porfíticas*, aunque en algunas zonas se trate de Q2-Vm *Basaltos y Andesitas Basálticas*, N2-Vi: *Lavas e ignimbritas de composición andesítica*. Ahora bien, en Coconuco se presentan N2-Vi: *Lavas e ignimbritas de composición andesítica* y Q-Vc: *Flujos vulcanoclásticos constituidos por piroclastos y epiclastos de composición andesítica*.

Según Lutgens y Tarbuck⁵⁵, las rocas con una composición comprendida entre las rocas graníticas y las basálticas se dice que tienen una composición intermedia o andesítica. Estas rocas contienen al menos un 25% de silicatos oscuros, principalmente anfíbol, piroxeno y biotita. El otro mineral dominante es la plagioclasa. Esta importante categoría de rocas ígneas se asocia con la actividad volcánica que normalmente se localiza en los márgenes de los continentes.

CANTERAS LDTA es una empresa que se caracteriza por proveer materiales para la construcción de pavimentos, en especial para capas de sub base y base. El material utilizado para la investigación fue un basalto. Este es una roca volcánica de grano fino y de color verde oscuro a negro⁵⁶.

⁵⁴ Esquema de Ordenamiento Territorial, Municipio de Puracé-Coconuco (Cauca) Subsistema físico-biótico. [en línea]. Disponible en: <http://www.sgc.gov.co/Geologia/Mapa-geologico-de-Colombia.aspx>

⁵⁵ LUTGENS, Edward y TARBUCK, Edward. Capítulo 4: Rocas Ígneas. En: Ciencias de la tierra, una introducción a la geología física, volumen I. Pearson, 2010, p.103

⁵⁶ *Ibid*, p.108



Figura 2. Ubicación municipio Coconuco. Fuente: Google Maps.



Figura 3. Composición geológica municipio Puracé. Fuente: Ingeominas. Atlas Geológico de Colombia.

3.2. PRUEBAS AGREGADOS

A continuación se describen cada uno de los ensayos realizados al agregado utilizado en la investigación.

3.2.1. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.

- Formulación Teórica

La granulometría no es más que una descripción gráfica del tamaño de las partículas en el espacio, por ejemplo cuando se habla de un estrato de suelo denso se hace referencia a que las partículas están bien distribuidas en el espacio. Para realizar el análisis granulométrico se utilizó la Norma I.N.V.E-213-07⁵⁷.

La representación granulométrica se utiliza en medios prácticos a través de una curva conocida como *Curva Granulométrica*. En la Figura 4 se observa la curva de la granulometría ideal, donde en las ordenadas se encuentra el porcentaje en peso que pasa el tamiz y en las abscisas el tamaño de la partícula. Cabe anotar que esta es la forma natural de representar la curva granulométrica pero existe también la forma de abscisas representadas en escala semi-logarítmica. Esta se da cuando se necesita conocer con más detalle la presentación gráfica de los finos.

⁵⁷ Instituto Nacional de Vías. Análisis granulométrico de los agregados. Norma INV E-213. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

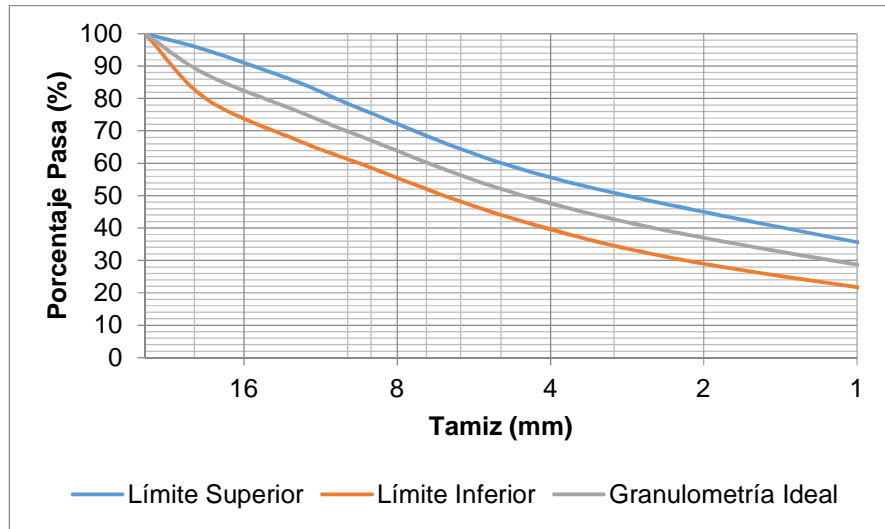


Figura 4. Curva granulométrica ideal del agregado.

- Metodología de Cálculo

Para la obtención de la curva granulométrica se debe tener primero los pesos retenidos del material en cada tamiz.

Luego se calcula el porcentaje retenido del material que es el peso retenido en cada tamiz dividido entre el peso total de la muestra, como se observa en la ecuación 1:

$$\%Retenido - Tamiz_i = \frac{PesoRetenido - Tamiz_i}{PesoTotal} \quad (1)$$

Donde el subíndice i, indica el tamiz de referencia.

Después se calcula el porcentaje retenido acumulado como la acumulación por tamiz del porcentaje retenido, del tamiz más grande al más pequeño, esto se conoce como porcentaje retenido acumulado, se ilustra de la siguiente forma:

$$\%RetenidoAcumulado - Tamiz_i = \%Retenido - Tamiz_i + \%RetenidoAcumulado - Tamiz_{i-1} \quad (2)$$

Finalmente se calcula el porcentaje de pasa como la resta del 100% que pasa y el %Retenido acumulado de cada tamiz, así:

$$\%Pasa - Tamiz_i = 100\% - \%Retenido - Tamiz_i \quad (3)$$

- Montaje del Ensayo

La muestra se obtuvo por medio de cuarteo manual y se secó a una temperatura de 110°C hasta que se obtuvo una masa constante. Se seleccionó el grupo de tamices asignados por la norma y se pusieron en tamaño decreciente. Se pasó el material por cada uno de los tamices, agitando manualmente durante un periodo suficiente de tal forma que no haya un desgaste de las partículas y no pase más del 0.5% de la masa de la muestra total por ningún tamiz.

En la Tabla 1 se observan los equipos utilizados para el ensayo, con la cantidad de agregado necesaria para la misma.

Tabla 1. Equipos y cantidad de agregado necesario para el ensayo de granulometría del agregado

Equipos utilizados	Procedencia	Precisión	Cantidad agregado (g)	Número de muestras
Balanza Vibra AJ	Tokyo, Japón	0,1 g		
Tamices Endecotts	Londres, Inglaterra		60.396	1
Horno Quincy Lab 21-350	Chicago, EU	1°C		

- Resultados

En la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos para la muestra de agregado analizada en el laboratorio.

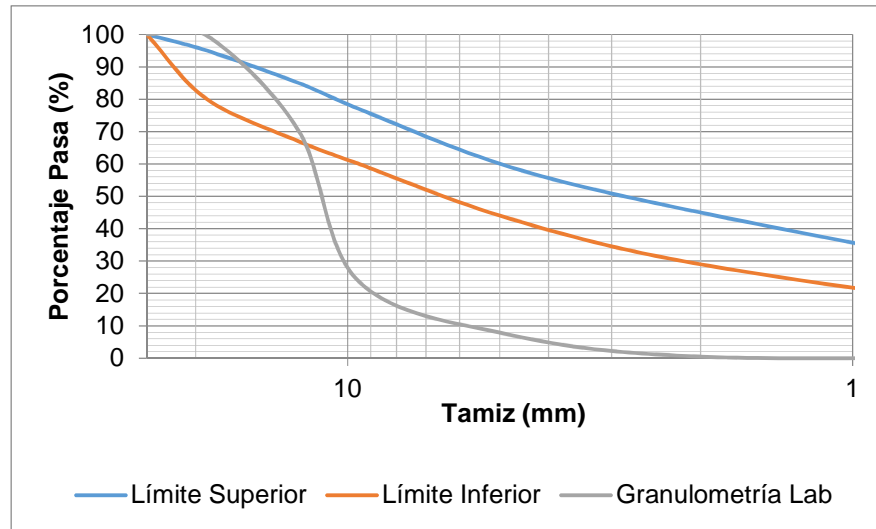


Figura 5. Curva granulométrica natural del agregado obtenida en el laboratorio.

- Discusión

Los materiales granulares se dividen entre agregados gruesos, que son los retenidos en el tamiz No.4, finos, que son la porción comprendida entre los tamices No.4 y No. 200, y pasa No. 200, que es denominado llenante mineral. El INVIAS, en el artículo 450, estipula los límites superiores e inferiores para cada tipo de mezcla. En esta investigación se usó una mezcla densa MDC-1. La granulometría que se usará para la mezcla bituminosa tendrá que cumplir con los límites establecidos en la.

Al realizar los ensayos de granulometría, se determinó que el agregado en su distribución natural (sin alterar los contenidos de finos y gruesos) no cumplía con lo estipulado por la norma, tal como se observa en la Figura 5.

En la búsqueda de poder obtener una granulometría que se acomodara a la norma, se intentó utilizar varias combinaciones entre agregados finos y gruesos. La curva que mejor se acomodó fue combinando un 40% de agregado fino (arena) y 60% agregado grueso (grava), obteniéndose la gráfica mostrada en la Figura 6.

A pesar de que se intentó obtener la mejor curva granulométrica que estuviera acorde con la norma INVIAS, esta no fue posible de encontrar, y ninguna combinación en los porcentajes de participación, de los agregados finos y gruesos, estuvo acorde para una mezcla bituminosa densa MDC-1.

Ya que los agregados no pueden ser un factor de influencia en el resultado principal de la tesis, la cual se enmarca en la posibilidad de utilizar Tereftalato de Polietileno en un pavimento asfáltico, se optó por utilizar una “granulometría óptima”. Esto consiste en encontrar el promedio entre el límite superior e inferior de la granulometría para una mezcla bituminosa densa MDC-1 y obtener el porcentaje, en peso, retenido en cada tamiz. De esta forma, el agregado no es un factor que influya en los resultados de la mezcla asfáltica en forma negativa. La granulometría óptima se observó en la Figura 4.

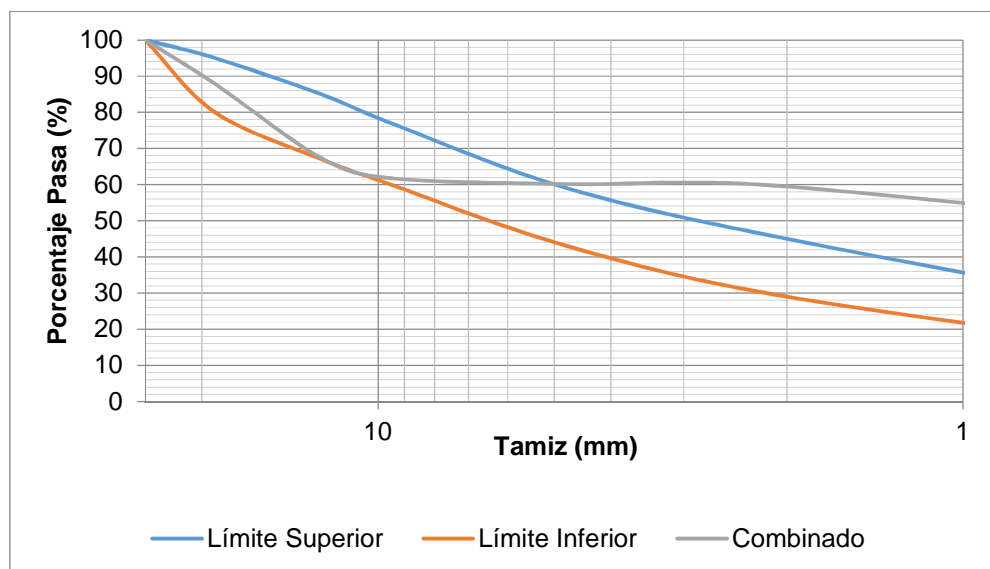


Figura 6. Curva granulométrica del agregado con distribución 60% grava y 40% arena.

3.2.2. Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm por medio de la máquina de los Ángeles

- Formulación Teórica

La abrasión es la acción de desgaste por fricción de un sólido⁵⁸. En éste caso el sólido es un agregado. En los pavimentos, la capa superior, conocida como *carpeta asfáltica*, es la que tiene mayor presencia de abrasión pues siempre está expuesta por la acción mecánica de los vehículos en la superficie del pavimento. Dada esta condición, el agregado de la carpeta asfáltica debe tener la capacidad de resistir la rotura, degradación y desintegración, lo que quiere decir que los agregados que están más expuestos a la superficie deben exhibir mayor resistencia a la abrasión que aquellos de la base y sub-base.⁵⁹ Para la realización del ensayo se utilizó la Norma I.N.V.E-218-07⁶⁰.

- Metodología de Calculo

Los métodos mecánicos como, el de la máquina de Los Ángeles mide el cambio del tamaño al final de la acción abrasiva. Este cambio podría definirse con la siguiente fórmula:

$$CA = \left(\frac{T_i - T_f}{T_i} \right) * 100 \quad (4)$$

Dónde:

CA = Coeficiente de abrasión en porcentaje

T_i = Tamaño inicial de la partícula en *mm*

T_f = Tamaño final de la partícula en *mm*

⁵⁸ Wikipedia. Abrasión [En línea]. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Abrasi%C3%B3n>

⁵⁹ BARIANI, Liedi, GORETTI, Laura, PEREIRA, Jorge y BARBOSA, Jorge. Op. Cit. p.137.

⁶⁰ Instituto Nacional de Vías. Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm por medio de la máquina de los Ángeles. Norma INV E-218. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

Teniendo en cuenta el hecho de que sería algo difícil en la práctica la medición de partícula a partícula, el coeficiente de abrasión también está dado por:

$$LA = \left(\frac{P_1 - P_2}{P_1} \right) * 100 \quad (5)$$

Dónde:

LA = Abrasión en porcentaje

P_1 = Masa de la muestra seca antes del ensayo en g

P_2 = Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre el tamiz de 1.70 mm (No. 12) en g

- Montaje del ensayo

Se introdujo la muestra y la carga abrasiva en el tambor. Se hizo girar el tambor a una velocidad entre 188 rad/min y 208 rad/min hasta completar 500 revoluciones. Luego se separó la muestra ensayada con un tamiz de abertura mayor al de 1.70 mm. La fracción fina que pasa se tamizó utilizando el procedimiento de la norma INV E -213⁶¹. El material retenido, se lavó, se secó en el horno hasta masa constante y se determinó la masa.

En la Tabla 2 se observa los equipos y parámetros necesarios para la realización del ensayo.

- Resultados

La Tabla 3 presenta los resultados obtenidos en el laboratorio.

⁶¹ Instituto Nacional de Vías. Análisis granulométrico de los agregados. Norma INV E-213. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

Tabla 2. Equipos, cantidad de agregado y parámetros necesarios para el ensayo de desgaste.

Equipos utilizados	Procedencia	Cantidad de agregado (g)	Número de muestras	Velocidad (rad/minuto)	Cantidad revoluciones
Balanza Vibra AJ (0,1 g)	Tokyo, Japón				
Horno Quincy Lab 21-350 (1°C)	Chicago, EU				
Tamices Endecotts	Londres, Inglaterra	5.025	1	188-208	500
Máquina de los Ángeles ELE	Estados Unidos				
Carga abrasiva ELE	Estados Unidos				

Tabla 3. Resultados de desgaste en la máquina de Los Ángeles para el agregado.

Resultados de resistencia al desgaste	
Masa recipiente (kg)	0,34
Masa de la muestra seca antes del ensayo P1, (g)	5,025
Masa muestra después de desgaste (g)	4,676
Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre tamiz de 1,70 mm, P2, (g)	4,336
Porcentaje Desgaste (%)	14%

- Discusión

Como se puede observar en la Tabla 3, el porcentaje de desgaste es del 14%. Esto, en relación con la Tabla 400.1 (a) del Art. 400-07 del INVIAS, cumple pues no supera el 25% máximo para capa de rodadura.

3.2.3. Equivalente de arena

- Formulación teórica

Los agregados en su gran mayoría contienen materiales que pueden resultar inadecuados e impropios para su uso en mezclas asfálticas. Las diferentes normas que reglamentan la construcción de vías en el mundo han establecido límites permisibles para que los distintos materiales no afecten la mezcla asfáltica. El ensayo “equivalente de arena”, determina la relación entre la cantidad de arena y arcilla para conocer el porcentaje de polvo fino nocivo que contiene el agregado. Este se puede referenciar en la norma I.N.V.E-133-07⁶².

- Metodología de calculo

Este ensayo es realizado con el fin de poder determinar la cantidad relativa del contenido de polvo fino nocivo, o material arcilloso, en el agregado fino. Al agregado se le adiciona solución floculante, esta se mezcla junto con el agregado y se deja sedimentar. Al estar sedimentado se determinan las alturas de la arcilla floculada y de la arena en el cilindro. Este índice es la relación entre la altura de la arena y la de la arcilla.

$$\text{Equivalente de Arena}(EA) = \frac{\text{Lectura de Arena}}{\text{Lectura de Arcilla}} * 100 \quad (6)$$

$$\text{Lectura de Arena} = \text{Lectura de disco, barra y sobrepeso} - 254\text{mm} \quad (7)$$

⁶² Instituto Nacional de Vías. Equivalente de arena de suelos y agregados finos. Norma INV E-133. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

- Montaje del ensayo

El agregado fino (pasa tamiz No. 4) previamente seleccionado es vertido en una probeta cilíndrica marca DIN CERTCO graduada de altura de 381 mm a la cual se le adiciona una solución de cloruro de calcio, estas deben permanecer en reposo por veinte minutos. Al finalizar se agitan durante treinta segundos para que la arcilla sea desprendida del agregado fino, esta agitación ocasiona que el material arcilloso se adhiera a las paredes de la probeta. Para desprender el material se le adiciona cloruro de calcio, lavando las paredes y completando el nivel establecido por la norma INV E-133. Este material se deja reposar nuevamente y luego se medirán las alturas de la arcilla floculada así como la arena.

- Resultados

Para poder obtener resultados óptimos en las mezclas de asfalto con PET es importante que el agregado escogido no presente inconvenientes en sus características según las normas del INVIAS. La norma del INVIAS, en los requisitos de los agregados pétreos para tratamientos, lechadas y mezclas bituminosas de niveles de tránsito 1, establece que el contenido máximo de finos debe de ser del 50%. Los resultados del ensayo se pueden apreciar en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados equivalente de arena del agregado.

	Lectura de Arcilla	Lectura de disco barra y sobrepeso	Lectura de Arena	Equivalente de Arena (EA) (%)
Probeta 1	113	113	84	74,3
Probeta 2	118	118	87	73,7
Probeta 3	114	114	85	74,6
	Promedio			74,2
	Desviación estándar			0,43

- Discusión

Según la norma del INVIAS, artículo 400, tabla 400.1(a)⁶³, el porcentaje de equivalente de arena debe ser mínimo 50%. Como se observa en la Tabla 4, el agregado elegido cumple la norma del INVIAS y puede ser utilizado como agregado pétreo en la mezcla asfáltica.

3.2.4. Gravedad específica y absorción de los agregados finos y gruesos

- Formulación teórica

Este ensayo es basado en las normas INV E-222-07⁶⁴ para agregados finos y INV E-223-07⁶⁵ para agregados gruesos, y busca determinar la gravedad específica bulk, bulk saturada, superficialmente seca, aparente 23/23°C, y la absorción.

- Metodología de cálculo

Agregado Fino: Se utilizaron las fórmulas (8) para calcular la gravedad específica bulk, (9) para el cálculo de la gravedad específica saturada superficialmente seca, (10) en el caso de la gravedad específica aparente y la fórmula (11) para obtener la absorción.

$$G_{sb} = \frac{A}{B+S-C}, \text{ Gravedad específica bulk, } 23^{\circ}\text{C}/23^{\circ}\text{C} \quad (8)$$

⁶³ Instituto Nacional de Vías. Artículo 400. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

⁶⁴ Instituto Nacional de Vías. Gravedad específica para agregados finos. Norma INV E-222. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

⁶⁵ Instituto Nacional de Vías. Gravedad específica para agregados gruesos. Norma INV E-223. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

$$Gsb(sss)sp\ gr = \frac{B}{B+S-C}, \text{Gravedad específica bulk sss, } 23^{\circ}\text{C} / 23^{\circ}\text{C} \quad (9)$$

$$Gsa = \frac{A}{B+A-C}, \text{Gravedad específica aparente, } 23^{\circ}\text{C} / 23^{\circ}\text{C} \quad (10)$$

$$\% \text{ Abosorción} = \frac{S-A}{A} * 100 \quad (11)$$

Dónde:

A= masa al aire de la muestra seca al horno (g).

B= masa del picnómetro aforado lleno de agua (g).

C= masa total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua (g).

S= masa de la muestra saturada y superficialmente seca (g).

Agregado Grueso: Se utilizaron las fórmulas (12), (13), (14) y (15) para determinar la gravedad específica bulk, bulk saturada superficialmente seca, aparente 23/23°C, y la absorción

$$Gsb = \frac{A}{B-C}, \text{Gravedad específica bulk, } 23^{\circ}\text{C} / 23^{\circ}\text{C} \quad (12)$$

$$Gsb(sss) = \frac{B}{B-C}, \text{Gravedad específica bulk sss, } 23^{\circ}\text{C} / 23^{\circ}\text{C} \quad (13)$$

$$Gsa = \frac{A}{A-C}, \text{Gravedad específica aparente, } 23^{\circ}\text{C} / 23^{\circ}\text{C} \quad (14)$$

$$\% \text{ Abosorción} = \frac{B-A}{A} * 100 \quad (15)$$

Dónde:

A= masa en el aire de la muestra seca (g).

B= masa en el aire de la muestra saturada con superficie seca (g).

C= masa sumergida en agua de la muestra saturada (g).

- Montaje del ensayo

Para el agregado fino, se tomó una muestra de aproximadamente 1000 g, y se sumergió en agua por 24 horas. Luego, se decantó el agua y se extendió la muestra sobre una superficie plana. Posteriormente se secó la superficie de las partículas y se tomó el peso de la muestra en este estado. Se llenó el picnómetro con agua y se introdujeron en el 500 g de muestra. Se sometió el picnómetro a agitación mecánica con el fin de eliminar todas las burbujas del aire. Luego, se determinó la masa total del conjunto (muestra, picnómetro y agua)

Para el agregado grueso, se secó la muestra en el horno y, luego, se sumergió la muestra en agua por 24 horas. Posteriormente, se decantó el agua y se secó la muestra superficialmente con un paño absorbente. Se tomó la masa de la muestra en este estado. Luego, se colocó la muestra dentro de la canastilla y se determinó su masa sumergida en el agua. Nuevamente, se secó la muestra en el horno para, posteriormente, tomar su masa seca.

En la Tabla 5 se observa la cantidad de agregado y los equipos utilizados para el ensayo.

Tabla 5. Equipos y cantidad de agregado utilizados para el ensayo de gravedad específica.

Equipos utilizados	Procedencia	Cantidad de agregado (g)	Número de muestras
Agitador mecánico Humboldt	NorrIDGE, EU		
Balanza Vibra AJ (0,1 g)	Tokyo, Japón		
Picnómetro Humboldt	NorrIDGE, EU		
Molde cónico		2.946	1
Pisón			
Canastillas metálicas			
Tamices Endecotts	Londres, Inglaterra		

- Resultados

En las Tablas 6 y 7 se pueden observar los resultados de la gravedad específica obtenida para el agregado fino y grueso, respectivamente.

Tabla 6. Resultados de gravedad específico para el agregado fino.

Muestra	Gsb	Gsbsss	Gsa	%Absorción
1	2,74	2,84	3,042	3,68
2	2,72	2,79	2,924	2,56
3	2,60	2,73	2,971	4,78
Promedio	2,69 ± 0,06	2,78±0,05	2,98±0,05	3,67 ± 0,9

Tabla 7. Resultados de gravedad específica para el agregado grueso.

Muestra	Gsb	Gsbsss	Gsa	%Absorción
1	2,83	2,87	2,93	1,22
2	2,82	2,85	2,92	1,30
3	2,85	2,89	2,96	1,30
Promedio	2,83 ± 0,01	2,87 ± 0,02	2,94 ± 0,02	1,27 ± 0,04

3.2.5. Partículas planas y alargadas

- Formulación teórica

Este ensayo tiene como objetivo determinar si la geometría del agregado grueso cumple para ser utilizada en pavimentos, en este caso las partículas se evalúan

para conocer si son largas y planas. Para este ensayo se utilizó la norma I.N.V.E. 230-07⁶⁶.

- Metodología de cálculo

Se utiliza un tamiz de barras paralelas y un calibrador de alargamiento para saber si las partículas son planas y alargadas. Las partículas que pasen el tamiz de barras paralelas se consideran planas y las partículas que tengan un largo mayor al del calibrador se separan como largas. El índice de aplanamiento o alargamiento se calcula con la fórmula 16.

$$Ia \text{ o } Il = \frac{M2}{M1} * 100, (16)$$

Dónde:

M1=es la suma de las masas de las fracciones di/Di, en g.

M2=es la suma de las masas de las partículas planas o largas, según el índice que se desee calcular, de las fracciones di/Di, en g.

- Montaje del ensayo

Para el ensayo se secó la muestra en el horno para posteriormente pesarla y registrar su masa. Se tamizó y pesó la muestra retenida en cada tamiz.

Para el índice de aplanamiento, se pasó cada fracción por el tamiz de barras, pasando cada partícula manualmente. Se registró la masa total por fracción que pasó el tamiz de barras.

Para el índice de alargamiento, se separa el material con forma alargada de cada una de las fracciones. Se pasa cada una de las partículas de todas las fracciones por el calibrador de alargamiento. Se registró la masa retenida para cada una de las fracciones.

⁶⁶ Instituto Nacional de Vías. Partículas largas y aplanadas del agregado grueso. Norma INV E-230. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

En la Tabla 8 se muestra la cantidad de agregado y los equipos utilizados para la realización del ensayo.

Tabla 8. Cantidad de agregado y equipos utilizados para el ensayo de partículas planas y alargadas.

Equipos utilizados	Procedencia	Cantidad de agregado (g)	Número de muestras
Balanza Vibra AJ (0,1 g)	Tokyo, Japón		
Tamiz de barras Controls	Italia	5.550	1
Calibrador metálico Mitutoyo	Brasil		
Tamices Endecotts	Londres, Inglaterra		

- Resultados

Se analizó una muestra representativa para el ensayo de masa mínima acorde con lo requerido por la norma del INVIAS debidamente secada con masa $M_0 = 5.418$ g. Según se especifica en la norma se descartan las muestras que sean retenidas en el tamiz de 3" así como la que pase el tamiz Nov.4.

Se utilizó el tamiz de barras paralelas y el calibrador de alargamiento según la norma INVE-230 y se calcularon las masas m_i para partículas planas y alargadas. En la Tabla 9 se pueden observar los resultados de cada uno de los índices.

Tabla 9. Índice de aplanamiento y alargamiento del agregado.

Índices	
Índice de Aplanamiento	21,20%
Índice de Alargamiento	17,80%

- Discusión

Gracias a que los agregados son provenientes de un proceso de trituración los resultados son óptimos y no presentan dificultades en la parte geométrica. El agregado utilizado para preparar la mezcla bituminosa cumple con los estándares ya que en el artículo 400-07 de INVIAS especifica que valor máximo tiene que ser 30.

3.3. PRUEBAS ASFALTOS

A continuación se describen los ensayos realizados para los asfaltos y asfaltos modificados, incluyendo los resultados obtenidos.

3.3.1. Protocolo de mezcla para la modificación del asfalto

Los porcentajes de polímero utilizados para modificar el asfalto dependen del tipo de polímero. El PET es de tipo plastómero, el cual necesita un buen manejo ya que en grandes proporciones, tiende a rigidizar el asfalto.

A pesar de contar con investigaciones anteriores como la de Avellán⁶⁷ y Wulf⁶⁸, no se tiene un protocolo de mezcla estandarizado para modificar el asfalto con PET. Es por esta razón que para la presente investigación se decidió modificar el asfalto con tres porcentajes diferentes: 3%, 5% y 7%. El proceso de mezcla se realizó utilizando un taladro para revolver, al cual se le adaptó una broca modificada con cuatro aspas hechas con varilla de 1/2". Se calentó el asfalto a una temperatura promedio entre 130°C y 150°C. Una vez se tuvo en estado líquido, se encendió el taladro, a una velocidad aproximada de 500 revoluciones/minutos, y se adicionó el

⁶⁷ AVELLAN, Martha. Op.Cit. p,50.

⁶⁸ WULF, Fernando. Op.Cit. p,29.

PET lentamente. Luego, se dejó mezclando el asfalto con el PET por un período de 90 minutos, con el fin de garantizar homogeneidad.

En la Tabla 10 se puede observar la cantidad de PET utilizada en la investigación para modificar el asfalto.

Tabla 10. Cantidad por porcentaje de PET utilizado como modificador del asfalto.

Porcentaje	(g)
3%	6,75
5%	11,25
7%	15,75
Total	33,75

3.3.2. Punto de ignición y de llama del asfalto mediante la copa abierta Cleveland

- Formulación Teórica

El ensayo de punto de ignición y de llama se realizó teniendo en cuenta la Norma I.N.V.E-709-07. Por definición, el punto de ignición “es la temperatura a la cual una sustancia inflamable emite los suficientes vapores en el aire, los cuales en presencia de una llama pueden inflamarse”⁶⁹. La otra temperatura es el *Punto de chispa* ya que según Arenas⁷⁰ “...es la temperatura a la cual el cemento asfáltico puede ser calentado sin peligro de incendio en presencia de una chispa”, es decir que se puede considerar el punto de chispa como una *temperatura de control* por razones de seguridad y aún más en las condiciones normales de un laboratorio encerrado.

⁶⁹ Universidad de Valencia. Diploma de especialización profesional Universitario en Servicios de Prevención, Extinción de Incendios y Salvamento.(s.f). p.09

⁷⁰ ARENAS LOZANO, Hugo León. El asfalto. En: Tecnología del Cemento Asfáltico Arenas Lozano. FAID: (s.f.), p.122.

- Metodología de Cálculo

Para conocer la temperatura de ignición, la placa de calentamiento debe estar encendida a una temperatura y rata controlada. Se aplica la llama de ensayo y la temperatura a la cual se encienden los vapores es la temperatura de ignición. Por otro lado, el punto de llama se determina cuando la llama de ensayo haga que el aceite se queme por lo menos 5 segundos.

- Montaje del Ensayo

Se llenó la copa de Cleveland, limpiando los excesos. Se encendió la llama de ensayo y se aplica sobre la copa, a una rata entre 14 °C/min y 17 °C/min. Cuando se tenga una temperatura aproximada de 56°C por debajo del punto de ignición esperado, se baja la rata de temperatura a 5°C/min – 6 °C/min. Se puede considerar punto de ignición cuando aparece una flama instantáneamente y se propaga sobre toda la superficie de la muestra.

En la Tabla 11 se puede observar los equipos y la cantidad de asfalto necesaria para la realización del ensayo, así como los parámetros iniciales del mismo.

Tabla 11. Equipos y cantidad de asfalto utilizados para el ensayo de punto de ignición por medio de la copa abierta de Cleveland.

Equipos utilizados	Procedencia	Cantidad de asfalto (g)	Número de muestras	Rata de temperatura inicial (°C/min)
Aparato de copa abierta Cleveland				
Placa de calentamiento				
Aplicador de llama				
Calentador		25	1	14-17
Protector				
Termómetro láser Amprobe IR608A (0,1 °C)	Estados Unidos			
Mordaza de nivel de llenado				

- Resultados

En el laboratorio no fue posible determinar la temperatura de ignición, aunque si se determinó que era seguro trabajar el asfalto a temperaturas menores de 220°C, pues aplicando llama a esa temperatura, los vapores no se quemaban.

- Discusión

El objetivo de éste laboratorio era determinar una temperatura de trabajo seguro, es decir, que al momento de elevar la temperatura del asfalto para hacerlo manejable no sobrepasara el punto de ignición y así cumplir con las condiciones de seguridad de los integrantes y las exigidas en la universidad.

3.3.3. Punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola.

- Formulación teórica

El punto de ablandamiento se define como la temperatura a la cual un material alcanza un determinado estado de fluidez. Los asfaltos son productos visco-elásticos, por lo que no se tiene una temperatura definida de cambio de estado (sólido a líquido). A medida que se le aumenta la temperatura a una muestra de asfalto, esta se torna más blanda y menos viscosa. Es por esta razón que el ensayo de punto de ablandamiento es de naturaleza arbitraria debido a que este, para un material bituminoso, no está a una temperatura definida, sino que se obtiene un cambio en la consistencia del material debido al incremento de temperatura. El ensayo de punto de ablandamiento está definido como la temperatura a la cual el asfalto deja de soportar una carga de una bola de acero, por lo que comienza a fluir⁷¹.

⁷¹ARENAS LOZANO, Hugo León. Op.Cit., p.116.

- Metodología de cálculo

Para el tipo de asfalto ensayado se esperaba un punto de ablandamiento menor a 80°. Es por esta razón que se realizó el ensayo únicamente en agua destilada, para lo cual no se realiza cálculo alguno para encontrar el punto de ablandamiento de la muestra.

Se tomaron tres puntos de ablandamiento para cada uno de los tipos de asfalto analizado, es decir para el asfalto sin modificar y para los asfaltos a los que se les adicionó distintos porcentajes de PET. Se realizó un promedio de estos tres puntos, para obtener la temperatura final para punto de ablandamiento.

- Montaje del ensayo

Para la realización del ensayo de punto de ablandamiento se utilizó el aparato de anillo y bola. Se calentó la muestra de asfalto hasta su total fluidez, agitando frecuentemente para evitar sobrecalentamientos localizados.

Se calentaron los dos anillos de bronce a la misma temperatura del asfalto. Se vertió la muestra dentro de los anillos y luego se dejó enfriar a temperatura ambiente por 30 minutos. Una vez fría la muestra, se cortó el exceso de material de la parte superior. El baño líquido elegido fue agua destilada recién hervida, ya que se esperaba un punto de ablandamiento entre 30° y 80° C.

Se realizó el montaje del aparato, poniendo el anillo con la muestra y el termómetro en posición. Se llenó el vaso precipitado con el agua destilada hasta una altura de 105 +/- 3 mm. La temperatura de las bolas debe ser igual a la del resto del montaje, por lo que estas se colocaron inicialmente al fondo del baño para que adquiriera la misma temperatura. Se colocó el conjunto en agua con hielo para alcanzar la temperatura de iniciación adecuada. Una vez estable la temperatura inicial, se colocó la bola encima del anillo con la muestra de manera centrada. Se calentó el baño de manera controlada, aumentando la temperatura suavemente y asegurándose de tener una rata constante. Se anotó la temperatura en la cual el asfalto que rodea la bola tocó el fondo del vaso precipitado.

En la Tabla 12 se observa la cantidad de asfalto, los equipos y los parámetros iniciales necesarios para la realización del ensayo.

Tabla 12. Equipos, cantidad de asfalto y parámetros iniciales para el ensayo de punto de ablandamiento del asfalto.

Equipos utilizados	Procedencia	Cantidad de asfalto total (g)	Número de muestras	Temperatura inicial (°C)	Rata de temperatura (°C/min)
Anillos Koehler	Nueva York, EU	300	12	5 ± 1	5
Esferas de acero Koehler	Nueva York, EU				
Placa base					
Guías de contacto Koehler	Nueva York, EU				
Vaso precipitado PYREX	San Nicolás, México				
Termómetro Amprobe TMD-50 (0,1 °C)	Everett, EU				
Calentador Koehler (1°C)	Nueva York, EU				
Cronómetro					

- Resultados

En la Figura 7 se puede observar los diferentes puntos de ablandamiento para los cuatro tipos de asfaltos analizados. Los datos que se observan en la tabla son el promedio de tres muestras para cada tipo de asfalto.

- Discusión

El punto de ablandamiento para el asfalto utilizado en la investigación es de 52°C, como se puede notar en la Figura 7. Este se encuentra dentro del rango ya que es

un asfalto de penetración 60/70 proveniente de Barrancabermeja, y este tipo de asfaltos manejan un rango de punto de ablandamiento entre 45°C y 55°C⁷².

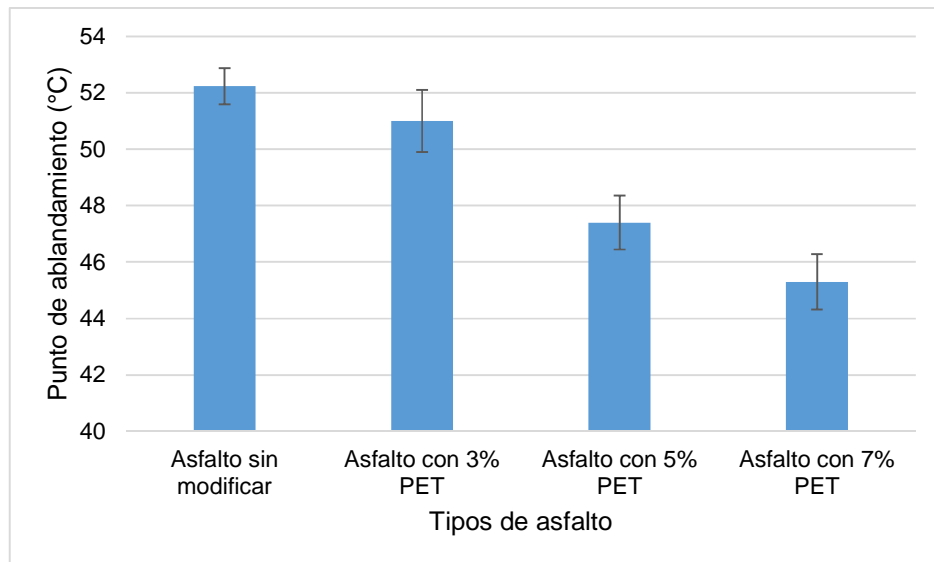


Figura 7. Puntos de ablandamiento obtenidos para los tipos de asfalto de la investigación.

El punto de ablandamiento esperado del asfalto modificado con PET era mayor al del asfalto sin modificar debido a que el PET es un plastómero, y este debe rigidizar la mezcla asfáltica. Sin embargo, los resultados obtenidos muestran una disminución en el punto de ablandamiento a medida que el porcentaje de PET aumenta.

En la Figura 7 se observan las barras de error de cada punto de ablandamiento, de acuerdo a la desviación estándar. Se puede notar que la barra del asfalto modificado con 3% PET se entrelaza con la barra del asfalto sin modificar, lo que indica que, de acuerdo a la desviación estándar, el punto de ablandamiento del asfalto modificado con 3% de PET puede tomar valores del asfalto sin modificar.

⁷² ECOPETROL. [En línea]. Disponible en: <http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=222&conID=37385>

3.3.4. Penetración de los materiales asfálticos

- Formulación teórica

La penetración es un ensayo empírico que se utiliza para medir la consistencia del asfalto, simulando temperaturas medias a las que llegará cuando se encuentre en servicio. Se define principalmente como la distancia en décimas de milímetro hasta la cual una aguja normalizada penetra verticalmente una muestra de asfalto a una temperatura indicada (25°C).

- Metodología de cálculo

Para obtener la distancia de penetración del asfalto, se toma el promedio de tres penetraciones a una misma muestra. Cada una de estas no debe diferir de la otra en aproximadamente 4 mm.

- Montaje del ensayo

Para realizar el ensayo de penetración se utilizó el Penetrómetro, el cual consta de un soporte móvil que pueda ser fijado firmemente en su parte inferior, y una aguja de penetración.

Se calentó 500 g de asfalto a 25°C, agitando constantemente para evitar sobrecalentamientos localizados durante aproximadamente 30 minutos. Se llenó el molde para la probeta, previamente calentado a la misma temperatura de la muestra, hasta una altura 10 mm superior a la penetración esperada. Se dejó enfriar la muestra por aproximadamente una hora, cubriéndola de polvo y permitiendo la eliminación de posibles burbujas de aire.

Se comprueba que el soporte de la aguja este limpio y seco. Se fija la aguja de 100 g en el soporte, a la cual previamente se le realizó una limpieza y se secó con un paño limpio. Una vez fría la muestra, se colocó en el montaje y se aproximó la aguja de penetración hasta que su punta toque la superficie de la muestra. Se puso en cero el penetrómetro y se soltó inmediatamente la aguja durante un periodo de cinco segundos. Se anotó la distancia que penetró la aguja en la muestra. La distancia obtenida se multiplica por 0,1 mm para obtenerla en décimas de milímetro.

En la Tabla 13 se observa la cantidad de asfalto y los equipos necesarios para la realización del ensayo de penetración.

Tabla 13. Equipos y cantidad de asfalto utilizado en el ensayo de penetración.

Equipos utilizados	Procedencia	Cantidad de asfalto total (g)	Número de muestras
Penetrómetro Controls (0,1 mm) Moldes	Italia	1.200	12

- Resultados

En la Figura 8 se puede observar las diferentes penetraciones para cada uno de los tipos de asfalto.

- Discusión

La penetración esperada para el asfalto modificado con los diferentes porcentajes de PET debía ser menor a la penetración del asfalto sin modificar ya que el PET, por ser un plastómero, debe rigidizar el asfalto, sobre todo cuando se adiciona en grandes porcentajes.

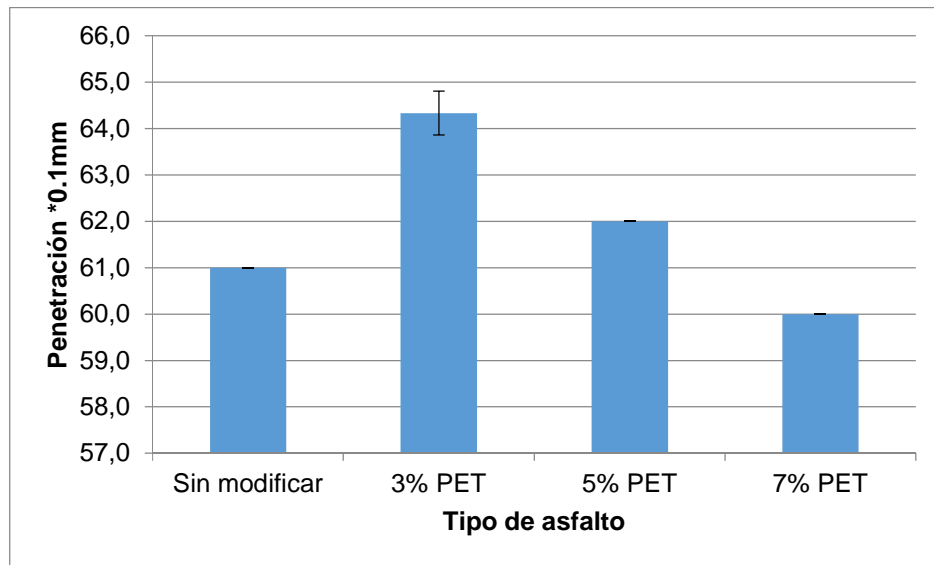


Figura 8. Penetraciones obtenidas para los tipos de asfalto de la investigación.

En la Figura 8 se puede observar que, para 3% y 5% de PET, la penetración fue mayor que la que se obtuvo en el asfalto sin modificar, lo que demuestra el efecto contrario a lo esperado. Sin embargo, para 7% de PET se obtuvo una disminución en la penetración de 2×0.1 mm.

Igualmente, en la Figura 8 se observan las barras de error de cada penetración, de acuerdo a la desviación estándar. Se puede notar que para el asfalto sin modificar y los asfaltos modificados con 5% y 7% no se muestran barras de error debido a que la desviación estándar para estos tipos de asfalto es cero. Sin embargo, para el asfalto modificado con 3% se observa un margen de error de 0,5 respecto a la penetración promedio.

3.3.5. Índice de Penetración de Cementos Asfálticos

- Formulación Teórica

El índice de penetración de los cementos asfálticos se utiliza para conocer la susceptibilidad térmica del cemento asfáltico y su comportamiento reológico. La metodología fue desarrollada por Pfeiffer y Van Doormal en 1936. El concepto principal de los investigadores es: A mayor pendiente en la gráfica de consistencia vs temperatura, el asfalto tiene más susceptibilidad térmica del ligante asfáltico.

- Metodología de calculo

Para calcular el índice de penetración, I_p , primero se debe obtener el punto de ablandamiento del asfalto y segundo, obtener la penetración a 25°C, luego puede ser calculado mediante la siguiente expresión:

$$I_p = \frac{20t_{RaB} + 500 \text{Log}(P) - 1952}{t_{RaB} - 50 \text{Log}(P) + 120} \quad (17)$$

Dónde:

t_{RaB} = Punto de ablandamiento (°C)

P = Penetración a 25°C (0.1 mm)

- Resultados

Reemplazando en la ecuación 20 se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 14.

Tabla 14. Índice de penetración para cada uno de los tipos de asfaltos analizados.

Índices de Penetración	
Tipo de asfalto	Índice de Penetración
Asfalto sin modificar	-0,32
Asfalto modificado 3% PET	-0,34
Asfalto modificado 5% PET	-1,22
Asfalto modificado 7% PET	-2,14

- Discusión

Según la Norma INVE-724-07, los cementos asfálticos se pueden clasificar en tres grandes grupos:

$I_p > 1$: Son cementos asfálticos con poca susceptibilidad a la temperatura, presentando cierta elasticidad y tixotropía. Se les denomina tipo gel o soplado, ya que la mayoría de los asfaltos oxidados pertenecen a éste grupo.

$I_p < -1$: Cementos asfálticos con mayor susceptibilidad a la temperatura; ricos en resinas y con comportamiento algo viscoso.

$-1 < I_p < 1$: Pertenecen a éste grupo la mayoría de los cementos asfálticos que se utilizan en la construcción de carreteras.

De acuerdo a la Norma INVE 724-07 y observando los resultados obtenidos en la Tabla 14, el asfalto sin modificar y el asfalto modificado con 3% de PET se pueden utilizar en la construcción de carreteras.

Igualmente, en la Tabla 14 se observa que a medida que se incrementa el porcentaje de PET el índice de penetración disminuye, llegando a ser altamente susceptible térmicamente.

Aun así la susceptibilidad térmica del asfalto suscita sospechas, debido que Peiffer y Van Doormal hicieron una consideración especial en el desarrollo de la ecuación

de Ip. Ellos consideraron que; la penetración del asfalto cuando este se encuentra en la temperatura del punto de ablandamiento, con una muestra de 100 gr y durante un período de 5 segundos, es 800 (*0.1 mm).

En esta consideración no se tiene en cuenta que no siempre el resultado es 800 (*0.1 mm). Un estudio en Chile⁷³ demostró que una muestra analizada llamada asfalto K, tuvo una penetración real de 2300 (0.1mm), alejado un 187% del resultado teórico de 800 (0.1mm). El llamado de la investigación fue tener en cuenta el uso de Ip real, pues este permite el uso de asfaltos que son considerados blandos, como el 80-100.

3.3.6. Ensayo al horno de lámina asfáltica delgada.

- Formulación Teórica

El mismo uso del asfalto desde su extracción en planta, hasta su colocación en las vías, hace valioso conocer que tanto de sus características iniciales se han perdido durante todo este proceso, para ello se aplica la Norma I.N.V.E-721-07⁷⁴

El ensayo al horno de lámina asfáltica delgada es un ensayo de durabilidad y simula “las condiciones que producen un aumento de la consistencia del asfalto durante las operaciones de mezclado en planta, lo cual significa poder medir el envejecimiento del cemento asfáltico durante esa operación”.⁷⁵ Ya que éste ensayo simula unas condiciones especiales que recibe el asfalto, al final del envejecimiento

⁷³RIOJA, Héctor. T31: Susceptibilidad térmica de Ligantes basadas en el desempeño real. (s.f.), p.12.

⁷⁴ Instituto Nacional de Vías. Ensayo al horno de lámina asfáltica delgada. Norma INV E-721. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

⁷⁵RIOJA, Héctor. Op.Cit. p,119

se deben determinar las características del asfalto como la penetración, viscosidad y punto de ablandamiento para así compararlas con las iniciales.

- Metodología de Cálculo

Ya que éste ensayo simula unas condiciones especiales que recibe el asfalto, al final del envejecimiento se deben determinar las características del asfalto como la penetración, viscosidad y punto de ablandamiento para así comparar condiciones iniciales con finales.

- Montaje del Ensayo

Para el ensayo de lámina delgada se calentó el horno previamente, con los recipientes de vidrio vacíos dentro de él, a una temperatura de $163\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ por un lapso de 24 horas. Luego, se sacó cada recipiente y se le agregó 50 g de asfalto en cada uno. Se separaron dos recipientes, se marcaron y se dejaron enfriar para, posteriormente, tomar su masa.

Se ingresó cada recipiente con muestra al horno, se cerró y se inició la rotación del estante, por un período de 5 horas.

Una vez transcurrido este tiempo, se apagó el horno y se sacó cada muestra para dejarlas enfriar. Se tomó el peso de los recipientes previamente seleccionados, para conocer la pérdida de masa, y se recolectó el asfalto de todos los recipientes. Luego, se realizaron pruebas de punto de ablandamiento y penetración.

En la Tabla 15 se puede observar los equipos, la cantidad de asfalto y la temperatura necesaria para la realización del ensayo.

Tabla 15. Equipos, cantidad de asfalto y temperatura necesaria para la realización del ensayo de lámina delgada.

Equipos utilizados	Procedencia	Cantidad de asfalto total (g)	Número de muestras	Temperatura inicial (°C)
Horno Controls 81-B016VZ (0,1 °C)	Milán, Italia			
Repisa giratoria PAVELAB RTFOT Recipientes	Milán, Italia	3360	12	163 ± 1
Balanza Vibra AJ (0,1 g)	Tokyo, Japón			

- Resultados

La Tabla 16 representa la pérdida de cantidad de asfalto antes y después del ensayo, en los recipientes, dos en total, que se aíslan luego de terminar el ensayo, en ambos recipientes se presentó una pérdida 0,1 g.

Tabla 16. Pérdida de masa del asfalto sin modificar.

	Pérdida de Peso		
	Antes	Después	Pérdida (g)
Recipiente 1 (g)	194.3	194.2	0.1
Recipiente 2 (g)	199.6	199.5	0.1
Promedio (g)	196.95	196.85	0.1

En la Tabla 17 se puede observar el resultado de punto de ablandamiento para la muestra en los dos recipientes, éste resultado se obtiene luego de someter las muestras al ensayo de lámina asfáltica delgada, en promedio el punto de ablandamiento es de 57,2°C.

Tabla 17. Punto de ablandamiento del asfalto envejecido en el ensayo de lámina delgada.

Punto de ablandamiento-Lámina delgada	
Muestra	Punto de ablandamiento °C
1	57.1
2	57.3
Promedio	57.2 ±0.1

En la Tabla 18, se presentan las penetraciones a 25°C, en promedio se registró una penetración de 39 mm.

Tabla 18. Penetración del asfalto envejecido en el ensayo de lámina delgada.

Penetración a 25°C ensayo -Lamina delgada (mm)	
Penetración 1	38.0
Penetración 2	40.0
Penetración 3	39.0
Promedio	39 ±1

- Discusión

En la Tabla 19 se presentan los resultados de los ensayos de punto de ablandamiento y penetración a 25°C que se hicieron al asfalto sin estar sometido a ninguna prueba de durabilidad.

Tabla 19. Penetración y punto de ablandamiento iniciales.

Penetración a 25°C (0.1mm)	Punto de ablandamiento (°C)
60	52

Si se realiza una comparación entre los resultados antes de someter el asfalto al ensayo de lámina delgada y luego de someterlo, se obtiene, según la Figura 9, que el asfalto aumenta su punto de ablandamiento al ser sometido al ensayo. Por el

contrario, si se analiza la penetración, se encuentra, según la Figura 10, que el asfalto disminuye la penetración al ser sometido al ensayo.

Los resultados del ensayo de lámina delgada son acordes a lo que se espera cuando el asfalto es sometido a una prueba de durabilidad, pues, según Bernutti, Motta, Ceratti y Soares⁷⁶ “cuando se evalúa el efecto en las características físicas que conducen al endurecimiento de aglutinantes, se verifica por la disminución de la penetración y aumento del punto de ablandamiento del asfalto”.

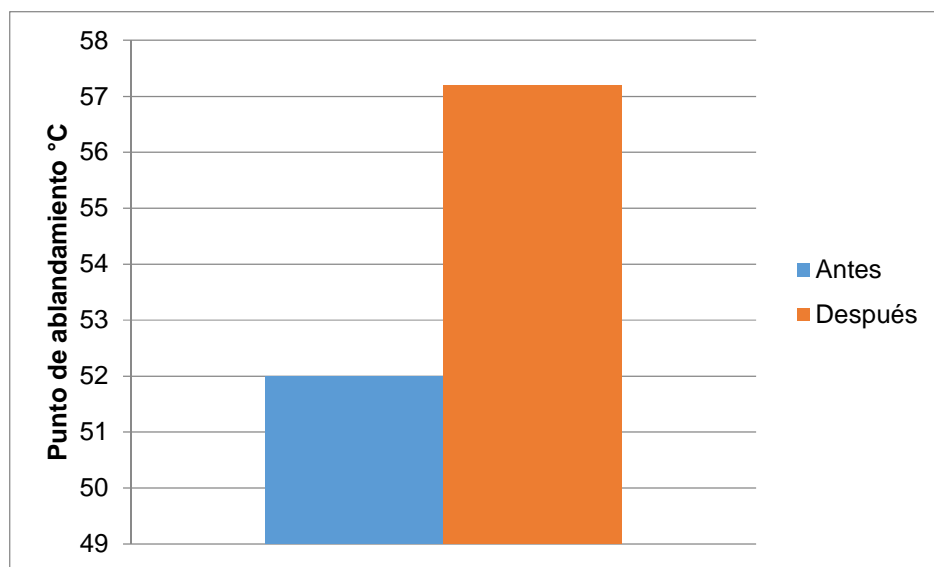


Figura 9. Comparación puntos de ablandamiento del asfalto sin modificar antes y después de ser envejecido en el ensayo de lámina delgada.

⁷⁶BARIANI, Liedi, GORETTI, Laura, PEREIRA, Jorge y BARBOSA, Jorge. Ligantes asfálticos. En: Pro asfaltos. Capítulo 2

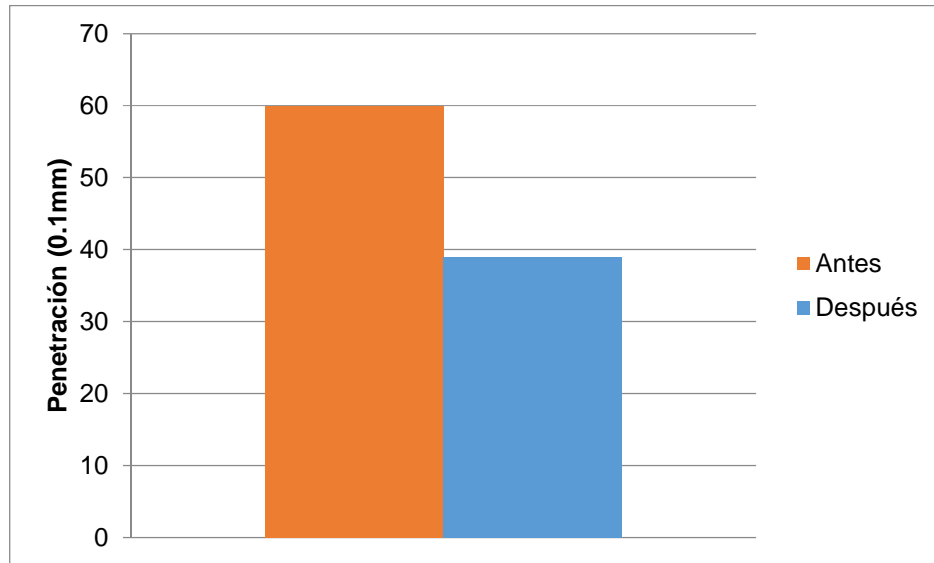


Figura 10. Comparación penetraciones del asfalto sin modificar antes y después de ser envejecido en el ensayo de lámina delgada.

Además, considere que el asfalto gana consistencia durante el ensayo, es decir, que es más sólido. De acuerdo a esto, lo lógico es que en la prueba de penetración a 25 °C la aguja no penetre la misma cantidad de asfalto y disminuya en comparación al ensayo inicial.

De igual manera, el punto de ablandamiento varía, pues los componentes se volatizan durante la prueba y posteriormente en el ensayo de punto de ablandamiento se necesita más temperatura para que el producto bituminoso que rodea la bola, toque el fondo de la base.

3.3.7. Viscosidad del asfalto

- Formulación teórica

La viscosidad es una medida del cemento asfáltico para la resistencia al flujo⁷⁷, es decir, la resistencia que este ofrece a la deformación.

Se considera que se tienen dos placas ubicadas de manera paralela, una fija y la otra móvil, distanciadas a una separación y . En medio de estas se llena el espacio con asfalto. En la placa superior, es decir la placa móvil, se aplica una fuerza lateral tangencial durante un intervalo de tiempo determinado. La resistencia que se opone al desplazamiento de esta placa será realizada por el fluido debido a que este se opone a la deformación. Esta fuerza es proporcional a la superficie de las placas y a la velocidad relativa del movimiento entre ambas e inversamente proporcional a la distancia existente entre ellas⁷⁸. En la Figura 11 se puede observar el ejemplo descrito anteriormente.

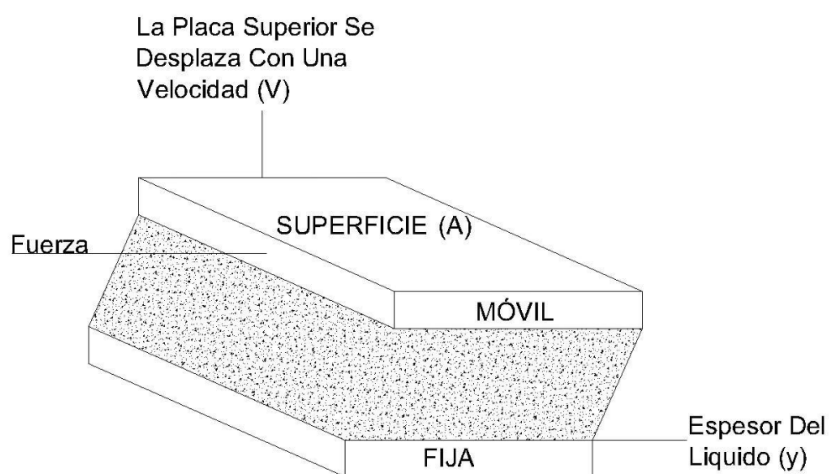


Figura 11. Definición simplificada de la viscosidad. Fuente: Arenas, Hugo. Tecnología del cemento asfáltico.

⁷⁷ BARIANI, Liedi, GORETTI, Laura, PEREIRA, Jorge y BARBOSA, Jorge. Ligantes asfálticos. En: Pro asfaltos. Capítulo 2.

⁷⁸ ARENAS LOZANO, Hugo León. El asfalto. En: Tecnología del cemento asfáltico. FAID, (s.f.) p.109.

La fuerza resistente se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$F = \eta AV/y \quad (18)$$

Donde F representa la fuerza resistente, A la superficie de las placas, V la velocidad relativa, y la distancia entre las placas y η el coeficiente de viscosidad o de frotamiento interno. η también es denominada viscosidad dinámica o absoluta, con unidad de medida el Poise.

La tensión cortante t es igual a la relación F/A . El gradiente de velocidad es el incremento de velocidad dv , situado a una distancia dy , medido perpendicularmente a la dirección de la velocidad $dv/dy=D$. Con esto, de la expresión anterior se obtiene lo siguiente:

$$\tau = \eta V/D \quad (19)$$

Basándose en el modelo de placas descrito anteriormente, el viscosímetro Brookfield mide la viscosidad mediante la captación del par de torsión que se necesita para hacer girar a una velocidad constante un husillo inmerso en la muestra de asfalto.

- Metodología de cálculo

La viscosidad del asfalto se calculó mediante el promedio de las tres mediciones de viscosidades por cada temperatura que entrega el reporte del viscosímetro Brookfield. La unidad de estas viscosidades es CentiPoise. Para analizar la viscosidad del asfalto, se tuvo en cuenta cinco temperaturas, de 100°C a 200°C, incrementándola cada 20°C.

- Montaje del ensayo

El ensayo de viscosidad se realizó con un Rheometro brookfield DV-III Ultra, fabricado en Stoughton, MA, Estados Unidos. Este equipo tiene una precisión de 0.1 cP.

Se calentó una muestra de asfalto hasta que este se encontrara fluido y permitiera su fácil vertimiento. Se encendió el viscosímetro y su controlador de temperatura. Este último se ajustó de acuerdo a la temperatura deseada para el ensayo. Se agregó una cantidad de asfalto en el contenedor de muestras. Tanto la muestra, como el contenedor se encontraban a la temperatura a la que se deseaba ensayar.

Se insertó el contenedor de la muestra en la unidad controladora de la temperatura y se insertó un husillo previamente calentado. Este se acopló al viscosímetro por la parte superior. Luego, se bajó el husillo de tal manera que penetre la muestra y esta cubra la parte cónica superior del husillo.

Una vez instalado el husillo, se llevó el conjunto a la temperatura deseada, se ajustó la velocidad de rotación del husillo y se ajustó la lectura de la velocidad por segundo en Pascales. Cuando la muestra alcanzó la temperatura establecida, se inició la rotación del husillo por 10 minutos y se registró la medida de velocidad.

- Resultados

En la Figura 12 se puede observar los promedios de viscosidades obtenidos para el asfalto sin modificar, en cada una de las temperaturas analizadas. Igualmente, se observan las viscosidades obtenidas para el asfalto modificado con 3% de PET.

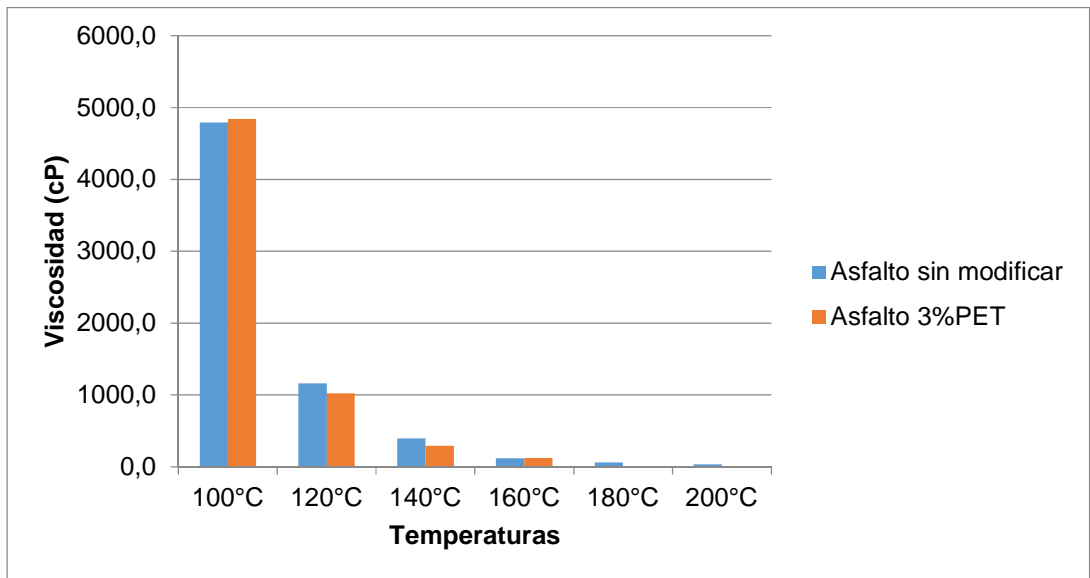


Figura 12. Viscosidades obtenidas para el asfalto sin modificar y el asfalto modificado con 3% de PET.

- Discusión

En la Figura 12 se observa que, para el asfalto sin modificar, a medida que se aumenta la temperatura, la viscosidad disminuye considerablemente, lo que es de esperarse ya que a mayor temperatura, más líquido el asfalto.

Al modificar el asfalto con PET, se esperaba que las viscosidades se incrementaran ya que, por ser un plastómero, el PET tiende a rigidizar el asfalto. Sin embargo, como se puede observar en la Figura 12, los resultados de las viscosidades para el asfalto modificado con 3% de PET dieron muy similares a las viscosidades del asfalto sin modificar.

Debido a que los resultados de las viscosidades no eran los esperados, se analizó la mezcla y se encontró problemas de aglutinamiento, por lo que se decidió no realizar pruebas de viscosidad al asfalto modificado con 5% y 7% de PET.

3.3.8. Análisis de pruebas de asfaltos

El Tereftalato de Polietileno es un material que, debido a sus propiedades físicas (alta rigidez y dureza, reciclable, alta resistencia a agentes químicos, buena resistencia química, buenas propiedades térmicas, buen comportamiento frente a esfuerzos permanentes, entre otros), es usado en distintos tipos de envases y en la producción de fibras textiles.⁷⁹

Después de haber mezclado el asfalto con el PET, siguiendo el protocolo de mezcla ya mencionado, se le realizaron ensayos a estas nuevas mezclas, las cuales tenían un contenido de 3%, 5% y 7% de PET. En primer lugar se le realizó el ensayo de penetración y punto de ablandamiento a los tres porcentajes, como se observa en las Figuras 7 y 8. Se encontró que los resultados no eran los esperados, ya que, al ser modificado con un plastómero, se esperaba un aumento en el punto de ablandamiento y una disminución en la penetración del asfalto. Esto generó dudas, pero se pensó que podría haber sido algún error en el procedimiento de los ensayos. Se prosiguió con el ensayo de viscosidad, el cual fue interrumpido a los 160°C, ya que se evidenció que los resultados eran demasiado similares cuando el asfalto no contenía PET. En la Tabla 20 se puede observar un resumen de los resultados obtenidos para los diferentes tipos de asfaltos analizados.

En la búsqueda de respuestas a lo ocurrido en los ensayos de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad, se puso en duda el proceso de mezclado, ya que se encontró que el PET no se comportó de la manera que se pretendía, pues se esperaba que este polímero se incorporara al asfalto de una forma homogénea. En lugar de ocurrir esto, el material se depositó en el fondo del recipiente. También, se encontró que este se aglutina volviéndose una sola masa, como se observa en la Figura 13.

El asfalto modificado con PET se mezcló a una temperatura aproximada de 135°C. En este punto, el PET no había llegado a su punto de fusión (ver numerales 3.3.1. y 3.4.1.). Sin embargo, a pesar de estar sometido a un proceso de mezcla de 90

⁷⁹ ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES UNIVERSIDAD DE VALLADOLID DEPARTAMENTO DE QUÍMICA. Propiedades y características.[en línea]. http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/pet/propiedades_y_caracteristicas.htm

minutos, al momento de enfriar la muestra se produjo un proceso de decantación del PET, depositándose en el fondo del recipiente de mezclado.

Tabla 20. Resumen de resultados de los ensayos realizados al asfalto.

Ensayo	Asfalto sin modificar	Asfalto Modificado, 3% PET	Asfalto Modificado, 5% PET	Asfalto Modificado, 7% PET
Penetración (0.1 mm)	61.0	64.3	62.0	60.0
Punto de Ablandamiento (°C)	52	51	47	45
Índice de Penetración	-0.32	-0.34	-1.40	-2.14
Viscosidad a 100°C (cP)	4792.1	4843.8	-	-
Viscosidad a 120°C (cP)	1162.3	1024.5	-	-
Viscosidad a 140°C (cP)	393.5	294.0	-	-
Viscosidad a 160°C (cP)	119.7	124.4	-	-
Viscosidad a 180°C (cP)	59.7	-	-	-
Viscosidad a 200°C (cP)	34.3	-	-	-



Figura 13. PET aglutinado en el asfalto. Fuente: Autores.

Se deduce que el material se deposita en el fondo ya que la densidad del PET es mayor a la del asfalto. Según el departamento de química de la Universidad de Valladolid, el PET tiene una densidad media de 1.38 g/cm³ ⁸⁰, mientras que el asfalto 60/70, proveniente de Barrancabermeja, presenta una densidad de 1.020 g/cm³. Si bien a 135°C el PET no se encuentra en estado líquido, si presenta un proceso de ablandamiento, en especial en la parte externa de las partículas. Es por esta razón que, al decantarse el material, se presenta un proceso de aglutinamiento.

De acuerdo a todo esto, se decidió incorporar el PET en las mezclas asfálticas como parcial de arena.

3.4. PRUEBAS PET

A continuación se describen los ensayos realizados para analizar el PET, con sus respectivos resultados.

3.4.1. Punto de fusión PET

- Formulación teórica

El punto de fusión de un material está definido como la temperatura a la cual un material pasa de estado sólido a líquido. Este se encuentra directamente relacionado con el incremento de calor y con el incremento de presión.

- Metodología de cálculo

Para conocer el punto de fusión del PET, se calentó una muestra de este y se incrementó la temperatura hasta que este cambiara de estado, sólido a líquido.

⁸⁰Ibid. http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/pet/propiedades_y_caracteristicas.htm

- Montaje del ensayo

Se tomó una muestra de Tereftalato de Polietileno (PET) de 140 g, por medio de cuarteo, tal como se muestra en la Figura 14. Se deseaba encontrar el punto de fusión del PET, para lo cual se calentó la muestra en estufa, incrementando la temperatura.



Figura 14. Muestra de PET cuarteada. Fuente: Autores.

- Resultados

Al inicio del procedimiento se pudo observar que el PET se derretía de manera no uniforme, es decir que había partes donde se encontraba ya derretido, pero existían otras donde este seguía sólido. Esto se puede observar en la Figura 15.

A medida que se incrementó la temperatura, gran parte del PET se derritió, teniendo una alta viscosidad. Sin embargo, en la superficie se observaron manchas blancas, lo que significaba que el PET se encontraba en esta sólido. Esto se generaba por el hecho de que la superficie está en contacto con el aire, lo que hace solidificar el PET.

La temperatura a la cual el PET se encontró en estado totalmente líquido fue de 230°C.



Figura 15. PET derretido. Fuente: Autores.

- Discusión

Como se explicó anteriormente, el punto de fusión encontrado con el ensayo fue de 230°C. Sin embargo, la viscosidad del PET en estado líquido es muy alta, por lo que no es recomendable mezclarlo en este estado con el asfalto. Además de esto, el PET tiene un proceso de solidificación bastante rápido, por lo que en el proceso de vaciado existe la posibilidad de que se solidifique el PET o parte de él, lo cual representaría un factor de error de gran importancia durante todo el proyecto.

3.4.2. Análisis granulométrico del Tereftalato de Polietileno

- Formulación Teórica

La granulometría nos permite saber cómo están distribuidas las partículas de un agregado con respecto al tamaño. En este caso se le hará un análisis a las partículas de PET utilizando la norma I.N.V.E-213-07⁸¹.

- Metodología de Cálculo

El método a usar ya fue mencionado en el análisis granulométrico de agregados gruesos y finos y por la norma I.N.V.E-213-07, pero en este caso no se lavará, ni secará el material, ya que en el proceso de producción del PET incluye lavado y el secado en horno.

- Montaje del Ensayo

La muestra se obtuvo por medio de cuarteo manual. Se seleccionó el grupo de tamices y se pasó el material por cada uno, agitando manualmente durante un periodo suficiente de tal forma que no haya un desgaste de las partículas y no pase más del 0.5% de la masa de la muestra total por ningún tamiz.

En la Tabla 21 se observan los equipos utilizados para el ensayo, con la cantidad de agregado necesaria para la misma.

⁸¹ Instituto Nacional de Vías. Análisis granulométrico de los agregados. Norma INV E-213. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

Tabla 21. Equipos y cantidad de PET necesaria para el análisis granulométrico del PET.

Equipos utilizados	Procedencia	Precisión	Cantidad de PET (g)	Número de muestras
Balanza Vibra AJ Tamices Endecotts	Tokyo, Japón Londres, Inglaterra	0,1 g	819,6	3

- Resultados

En la Figura 16 se muestran gráficamente los resultados obtenidos para el Tereftalato de Polietileno. Se observa la poca calidad de las partículas granulométricas de PET, si se exponen a una granulometría como si se tratase de un agregado. Eventualmente se observa que no cumple los límites exigidos por el INVIAS. De la misma manera, en la Figura 17 se puede ver el material ya tamizado.

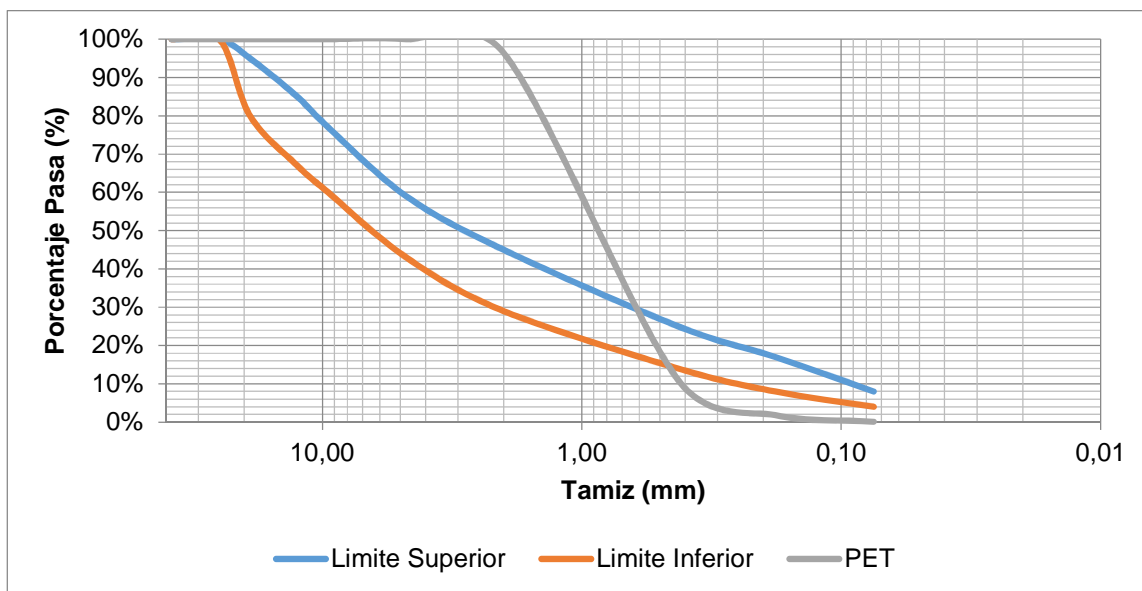


Figura 16. Curva granulométrica del PET.

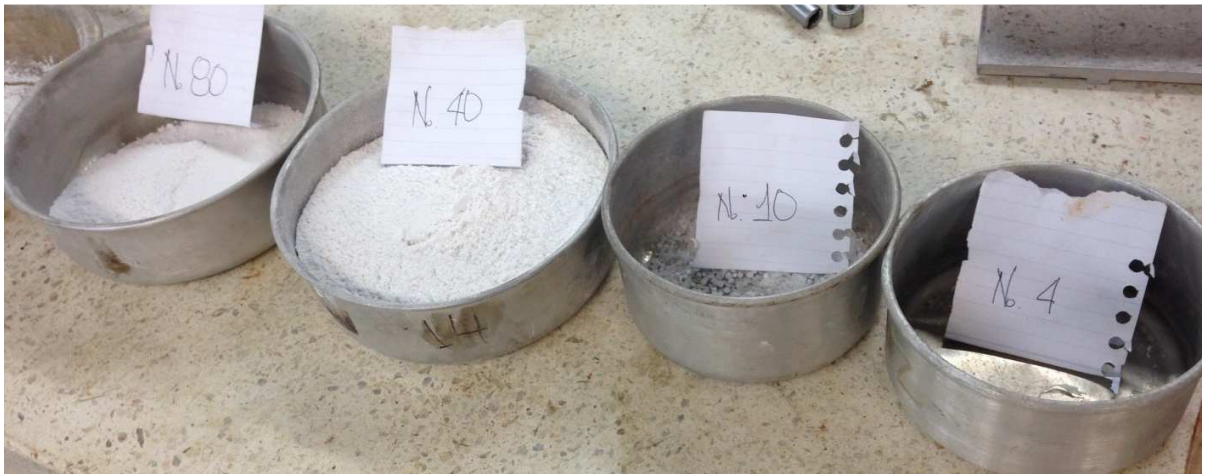


Figura 17. PET tamizado. Fuente: Autores.

- Discusión

Se mezcló la granulometría ideal con la granulometría del PET, esto con el fin de utilizar el PET como un parcial de arena. WAN y ACHMAD⁸², concluyen que es posible obtener resultados positivos en el ensayo de deformación cuando son utilizados concentraciones de polímero entre 5% y 20% del peso total del asfalto con un PET de granulometría entre 2.36 mm y 1.18 mm, y en cuanto a la rigidez no se lograron obtener resultados positivos con respecto al asfalto sin modificar.

Para este trabajo se utilizaron porcentajes de PET de 5%, 8% y 11%, teniendo en cuenta los estudios de WAN y ACHMAD, considerando que la curva granulométrica de los agregados y PET combinados no se salga del rango para mezclas asfálticas en caliente MDC-1. Los límites de la granulometría del PET, proveído por la empresa COCOPLAST S.A.S, son de 0,075 mm a 2 mm. Para poder combinar estos dos materiales se hacen los siguientes cálculos: para hallar el porcentaje de pasa de agregado que se quiere utilizar se usa la fórmula (20) y así mismo se hace para

⁸²WAN MohdNazmi, Wan Abdul Rahman, ACHMAD Fauzi, Abdul Wahab. Green Pavement Using Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as Partial Fine Aggregate Replacement in Modified Asphalt. En: ProcediaEngineering. 2013. N°53. P.124-128.

el porcentaje de pasa de PET (21), la cantidad de pasa del combinado es la suma de estos dos porcentajes de pasa.

$$\%Pasadeagregado = \%Pasaideal * \% Agregadoautilizar \quad (20)$$

$$\%PasadePET = \% PET * \% PETautilizar \quad (21)$$

En las Figuras 18, 19 y 20 se pueden observar las curvas granulométricas obtenidas.

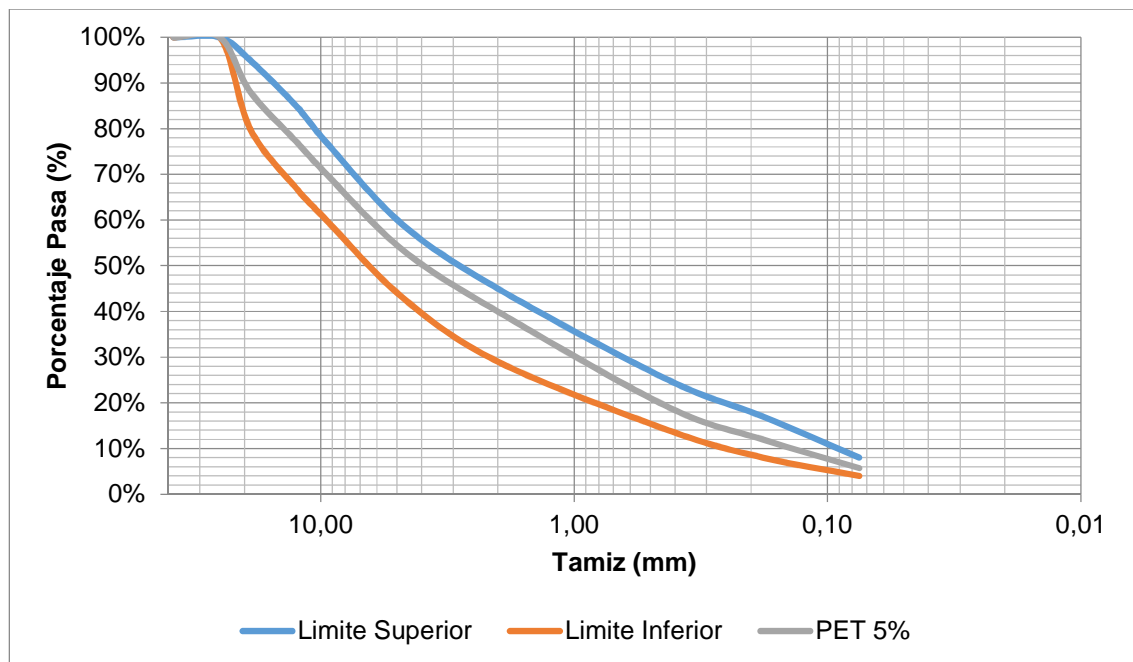


Figura 18. Curva granulométrica del agregado con parcial de arena de 5% de PET.

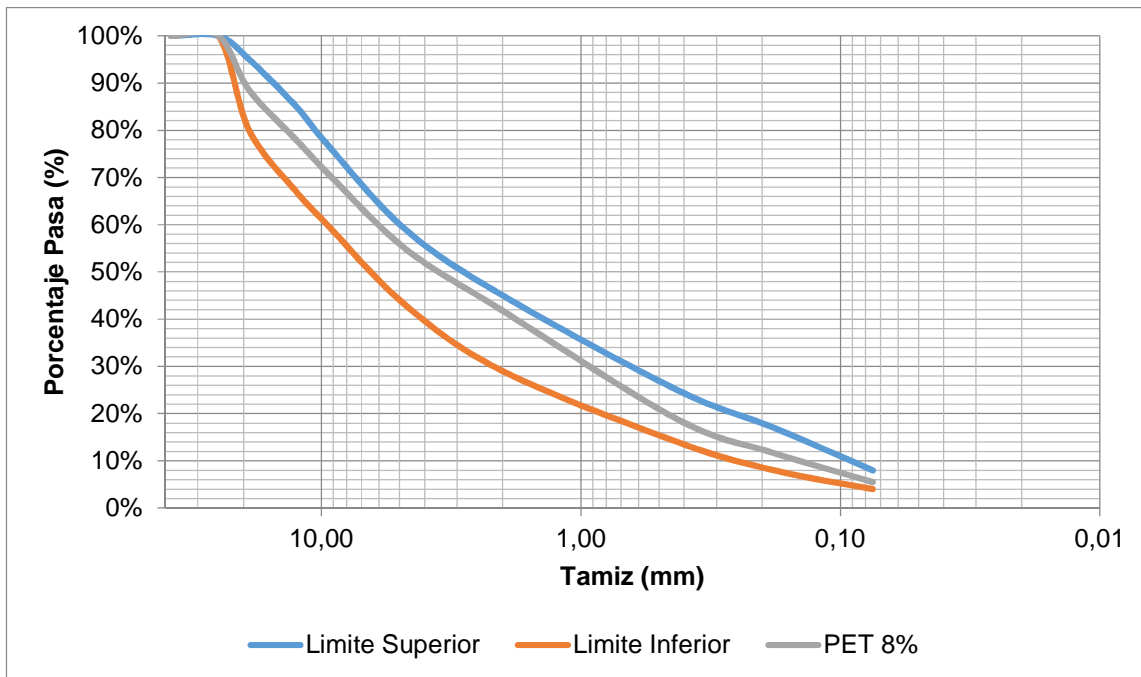


Figura 19. Curva granulométrica del agregado con parcial de arena de 8% de PET.

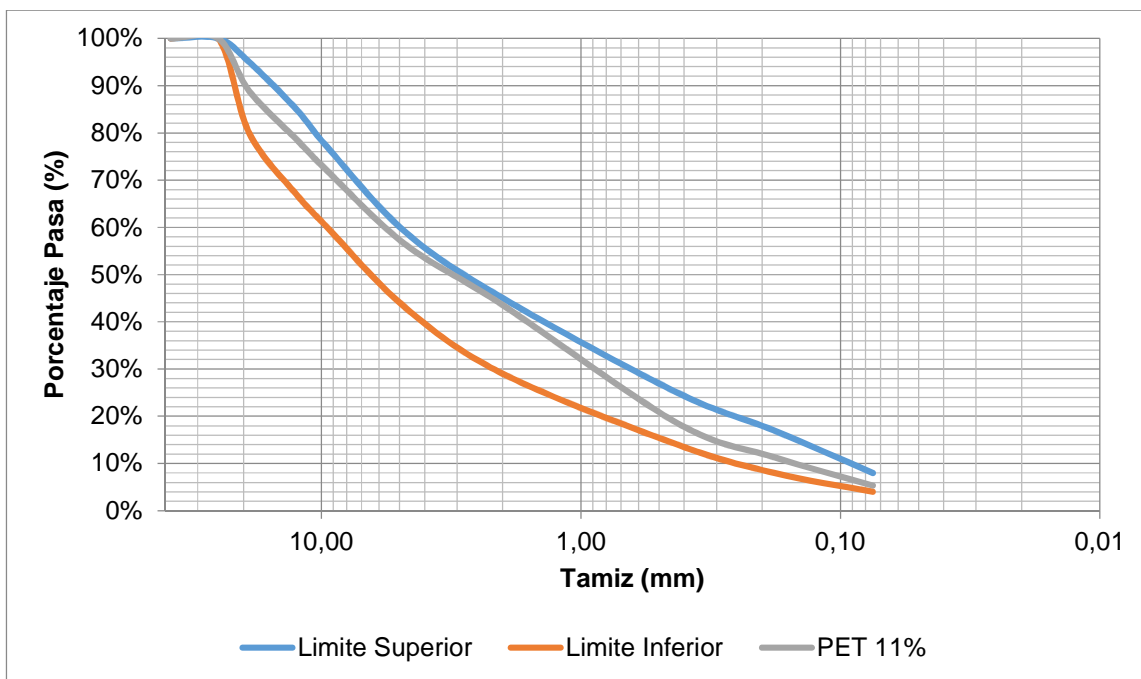


Figura 20. Curva granulométrica del agregado con parcial de arena de 11% de PET.

3.5. DISEÑO MARSHALL

Para el análisis de la mezcla asfáltica reemplazando PET como parcial de arena, primero se realizó el diseño Marshall del asfalto, obteniendo el porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla. Posteriormente, se procedió a realizar las mezclas asfálticas con el reemplazo de PET.

3.5.1. Diseño Marshall asfalto sin modificar

- Metodología de cálculo

Para la obtención del porcentaje óptimo de asfalto, se debe calcular una serie de parámetros, que posteriormente son comparados con los establecidos la Tabla 450.4 de INVIAS⁸³.

Como primera instancia, se calcula la densidad Bulk de las briquetas

$$G_b = \frac{W_{aire}}{(W_{ap} - W_{wp}) - \left(\frac{W_{ap} - W_{aire}}{G_{para}}\right)} \quad (22)$$

Dónde:

W_{aire} : Peso de la biqueta en el aire (g).

W_{ap} : Peso de la biqueta parafinada en el aire (g)

W_{wp} : Peso de la biqueta parafinada en el agua (g)

G_{para} : Gravedad específica de la parafina.

⁸³ Instituto Nacional de Vías. Artículo 450.4. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

Luego, se calcula el peso específico máximo teórico, de acuerdo a la ecuación 23. Para este se tiene en cuenta el porcentaje de agregado y el porcentaje de asfalto que contiene la briqueta y la gravedad específica de estos.

$$G_{mt} = \frac{100}{\left(\frac{\%Agreg}{G_{agreg}}\right) + \left(\frac{\%Asfalto}{G_{asfalto}}\right)} \quad (23)$$

Se procede a encontrar la gravedad específica máxima medida, de acuerdo a los datos tomados en el laboratorio (ecuación 24).

$$G_{mm} = \frac{W}{W+M-N} \quad (24)$$

Dónde:

W = Peso muestra (g)

M = Peso matraz (g)

N = Peso muestra + agua + matraz

Una vez se tienen las gravedades, se calcula el porcentaje de absorción de asfalto por peso de agregado seco, con la ecuación 25.

$$\%A_a = \frac{G_{mm} - G_{mt}}{G_{mm} * G_{mt} * \%Agreg} * 10000 \quad (25)$$

De igual manera, con la ecuación 26 se calcula el porcentaje, en volumen, que ocupa el agregado respecto al volumen total de la briqueta.

$$\%V_{agreg} = \frac{\%Agreg * G_b}{G_{Agreg}} \quad (26)$$

Luego, se calcula el porcentaje, en volumen, de vacíos con aire respecto al volumen total de la probeta, de acuerdo a la ecuación 27.

$$\%V_v = \left(\frac{1-G_b}{G_{mm}} \right) * 100 \quad (27)$$

De acuerdo al porcentaje de vacíos, se procede a calcular el porcentaje, en volumen, de asfalto efectivo respecto al volumen total de la briqueta.

$$\%V_{ae} = 100 - (V_{agreg} + V_v) \quad (28)$$

Se calcula el porcentaje de vacíos en los agregados minerales en la mezcla compactada, de acuerdo a la ecuación 29.

$$\%V_{AM} = 100 - \%V_{agreg} \quad (29)$$

Luego, se calcula el contenido de asfalto efectivo con respecto al peso de la mezcla, con la ecuación 30, donde $\%CA_{añadido}$ es la cantidad de asfalto, en porcentaje, añadida.

$$\%A_e = \%CA_{añadido} - \frac{\%A_{agreg} - G_b}{G_{agreg}} \quad (30)$$

Finalmente, se debe calcular el porcentaje de vacíos llenos de asfalto de la briqueta, de acuerdo a la ecuación 31.

$$\%VFA = \left(\frac{\%V_{AM} - \%V_v}{\%V_{AM}} \right) * 100 \quad (31)$$

Una vez obtenidos todos los parámetros, se grafican los resultados respecto al porcentaje de asfalto y se comparan con los criterios establecidos en la **¡Error! No**

se encuentra el origen de la referencia., verificando el cumplimiento de límites. De acuerdo a esto, se elige el porcentaje óptimo de asfalto.

Tabla 22. Parámetros de diseño dados por el INVIAS. Fuente: Artículo 450. INVIAS

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	MEZCLAS DENSAS, SEMIDENSAS Y GRUESAS			MEZCLA DE ALTO MÓDULO	
		CATEGORÍA DE TRANSITO				
		NT1	NT2	NT3		
Compactación (golpes/cara)	E-748	50	75	75	75	
Estabilidad mínima (kg)	E-748	500	750	900	1500	
Flujo (mm)	E-748	2-4	2-4	2-6	2-3	
Vacíos con aire (Va) %	Rodadura	E-736 o E-799	3-5	3-5	3-7	-
	Intermedia		4-8	4-8	4-10	4-6
	Base		-	5-9	5-8	-
Vacíos en los agregados minerales (VAM) %	Mezclas 0	E-799	>=13	>=13	>=13	-
	Mezclas 1		>=14	>=14	>=14	>=14
	Mezclas 2		>=15	>=15	>=15	-
	Mezclas 3		>=16	>=16	>=16	-
% de vacíos llenos de asfalto (VFA)	E-799	65-80	65-78	65-75	63-75	
Relación Llenante/Asfalto efectivo, en peso	E-799	0,8-1,2			1,2-1,4	
Concentración de llenante, valor máximo	E-745	Valor crítico				

- Montaje del ensayo

Como primera instancia, se determinan los pesos de agregado y asfalto para preparar 1200 g de mezcla requeridos en cada briqueta. Estos pesos dependen del porcentaje de asfalto. Para la realización de este ensayo se eligieron cinco porcentajes de asfalto, de 4.5% a 6.5%. Por cada porcentaje se realizaron tres briquetas.

En bandejas separadas y previamente taradas, se pesó cada porción de agregados, de acuerdo al porcentaje de asfalto. El agregado se calentó previamente en el horno por un período de 24 horas a una temperatura de 145°C. Posteriormente, se transfirió a los recipientes de mezclado, creando un cráter en el centro. En este se vertió la cantidad de asfalto necesaria para la probeta, previamente calentado a una temperatura de mezcla de 148°C. A continuación, se mezclaron los materiales de manera rápida hasta obtener una mezcla homogénea.

Posteriormente, se colocó toda la mezcla en el conjunto en el dispositivo para moldear probetas, previamente calentado en el horno. Se puso el collar y se aplicaron 75 golpes con el martillo compactador. Luego, se volteó la probeta y nuevamente se le aplicaron 75 golpes. Se repitió el procedimiento para cada una de las briquetas.

La totalidad de briquetas se dejaron enfriar por 24 horas. Luego, se sacó cada probeta y se tomaron medidas de espesor y diámetro. De la misma manera, se tomó el peso seco, peso para finado y peso sumergido de cada una de las briquetas.

Para el ensayo de estabilidad y flujo, se colocaron las probetas en un baño de agua por un período de 2 horas, a una temperatura de 60°C. Posteriormente, se pone la biqueta en la mordaza inferior. Se monta la mordaza superior con el medidor de deformación y se sitúa el conjunto en la prensa. A continuación, se aplica la carga sobre la probeta a una tasa de deformación constante de 50,8 mm/min, hasta que ocurra la falla. Se anotan los valores de carga y flujo máximos, arrojados por la prensa.

- Resultados

Para la obtención del porcentaje óptimo de asfalto, se deben tener en cuenta los criterios de diseño establecidos en la Tabla 22. Por motivos de investigación, se estableció un nivel de tránsito NT2 debido a que es un tránsito intermedio.

Tabla 23. Equipos y cantidad de asfalto necesario para la realización del ensayo Marshall.

Equipos utilizados	Procedencia	Cantidad de asfalto (g)	Número de muestras
Moldeador de probetas			
Extractor de probetas			
Martillo compactador Humboldt	Norridge, EU		
Prensa Geotest	Estados Unidos	1.170	15
Medidor de estabilidad Controls	Italia		
Medidor de deformación Controls	Italia		
Balanza Vibra AJ (0,1 g)	Tokyo, Japón		

En la Figura 21 se encuentra una relación lineal entre el porcentaje de asfalto y la densidad Bulk de las briquetas. Se puede observar que a medida que se incrementa el porcentaje de asfalto en 0,5%, la densidad aumenta a una tasa de 4.4% de acuerdo a la ecuación 32. Esta densidad es importante en las briquetas, ya que tiene en cuenta, no solo el peso de la masa del asfalto y agregados, sino que también el porcentaje de vacíos contenidos en la misma.

$$\frac{\text{DensidadBulk } 6.5\% - \text{DensidadBulk } 4.5\%}{6.5\% - 4.5\%} \quad (32)$$

La estabilidad mínima establecida, según criterios de diseño de mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall, es de 750 Kg para una categoría de tránsito NT2. En la Figura 22 se observa que el valor de estabilidad mayor de 7.5 KN es superado con las mezclas de 5% y 5.5% de asfalto. En este punto se pueden descartar las muestras de 4.5%, 6% y 6.5%. Ahora bien, la estabilidad se describe por medio de una ecuación polinómica de grado 2, cóncava hacia abajo. El coeficiente de correlación indica la dependencia de una variable respecto a la otra, en este caso, la dependencia de la estabilidad con respecto al porcentaje de asfalto.

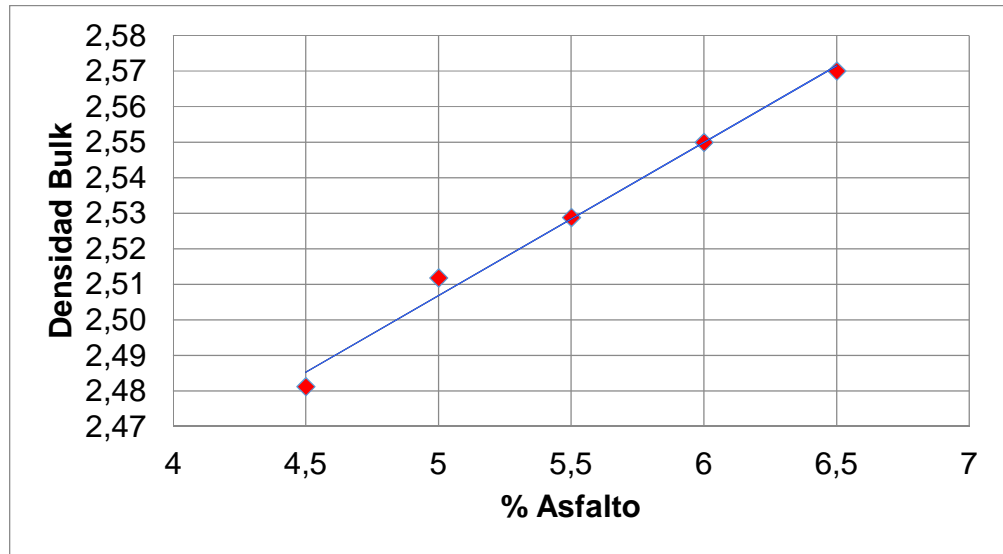


Figura 21. Densidad Bulk Vs. % de asfalto de las briquetas.

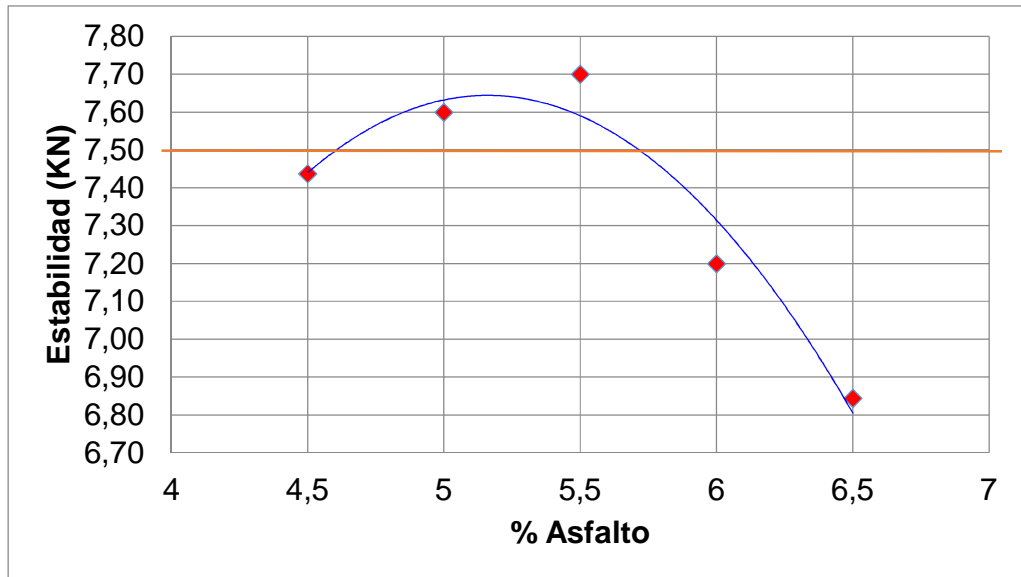


Figura 22. Estabilidad Vs. % de asfalto de las briquetas.

Según la Tabla 28, el flujo de las briquetas se debe encontrar entre 2 y 4 mm. En la Figura 23 se puede observar que las briquetas fabricadas con un porcentaje de 4.5% de asfalto, están por debajo del requerimiento mínimo de 2 mm de flujo. Por otro lado, las briquetas con el 6% y 6.5% de asfalto se encuentran por encima del flujo máximo establecido de 4 mm, lo que descartaría estas briquetas de manera inexorable.

Al analizar las briquetas de 5% y 5.5%, se observa que la primera está muy próxima al flujo máximo establecido, mientras que la segunda se encuentra en un estado "ideal" de 3 mm, es decir, el promedio del criterio de flujo para NT2.

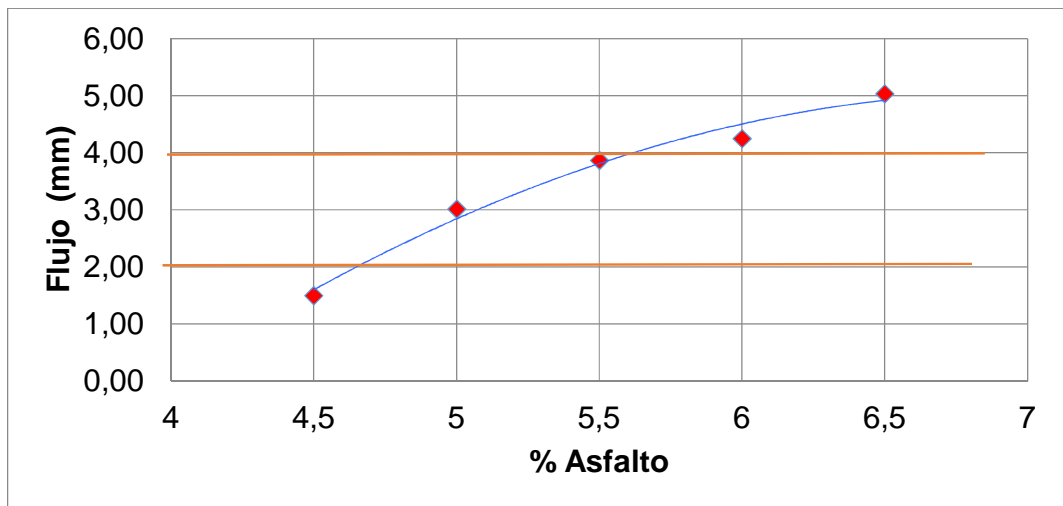


Figura 23. Flujo Vs. % de asfalto de las briquetas.

El porcentaje de vacíos con aire, V_a , para la capa de rodadura y una categoría de tránsito NT2, se encuentra entre el 3% y 5%. En la Figura 24 se puede observar que las briquetas construidas con 5.5%, 6% y 6.5% de asfalto se encuentran por debajo del mínimo rango establecido del 3%, lo que las descartaría en segunda estancia. Ahora bien, la briketa del 4.5% se encuentra por encima del rango máximo establecido del 5%, la única briketa que cumple con estos porcentajes es la de 5%.

Está establecido que el porcentaje de vacíos en los agregados minerales debe ser mayor del 13%. En la Figura 25 se puede observar que todas las briquetas, menos

la de 6.5%, cumplen con la normatividad. El %VAM es importante en la medida que indica que tanto de estos vacíos puede ser llenado con aire o con asfalto. Claro está que si se llena con asfalto, el producto será una carpeta asfáltica más costosa. Sin embargo no es tan negativo, pues esto fija una adherencia entre el mineral y el asfalto, haciéndolo más compacto.

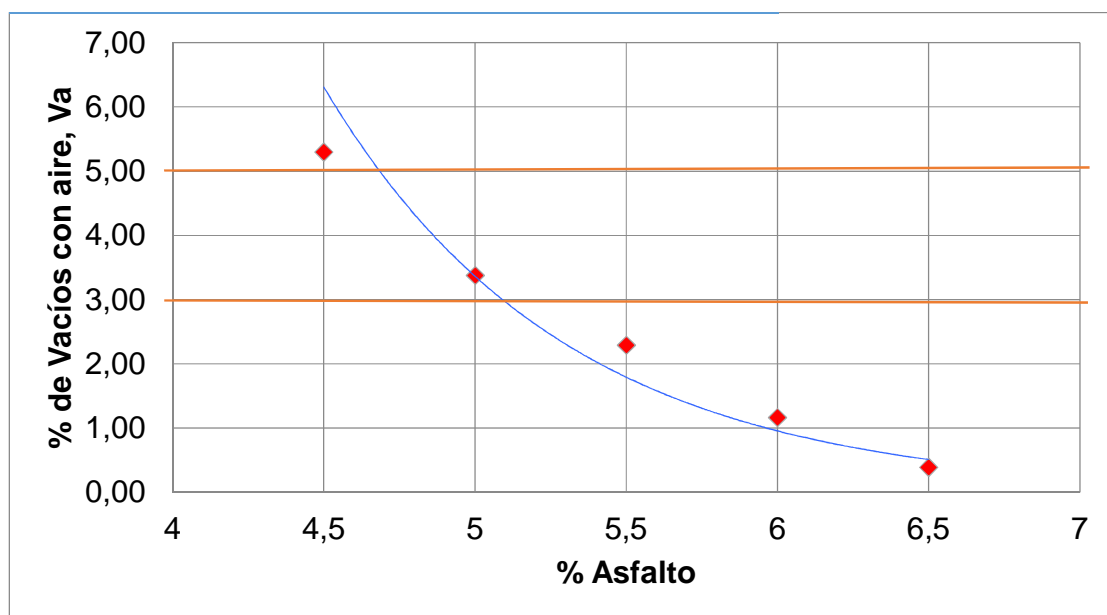


Figura 24. % de vacíos con aire Vs. % de asfalto de las briquetas.

El porcentaje de vacíos llenos de asfalto, se aplica para capas de rodadura. Este criterio establece que se debe encontrar el VFA entre el 65% y 78%. En la Figura 26 se puede observar que las briquetas de 5.5%, 6%, 6.5% se encuentran por encima del porcentaje máximo establecido de 78%, y la briketa de 4% de asfalto se encuentra por debajo del porcentaje establecido, lo que indica que la única briketa que cumple con el criterio de VFA es la de 5% de asfalto. El VFA debe ser mayor a medida que las exigencias del tráfico se hacen mayores, según se corrobora en los niveles de tránsito NT1 a NT3, siendo el primero de mayor exigencia. Este porcentaje de vacíos llenos de asfalto en un rango del 65% a 78% corresponde a un nivel de tránsito NT2.

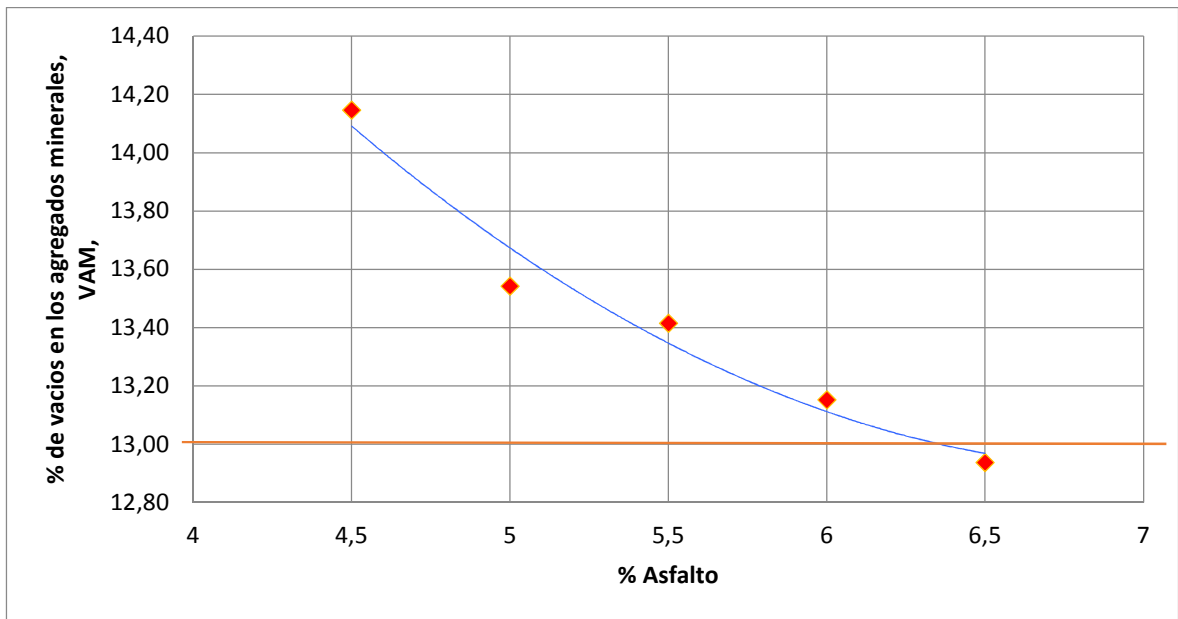


Figura 25. % de vacíos en los agregados minerales Vs. % de asfalto de las briquetas.

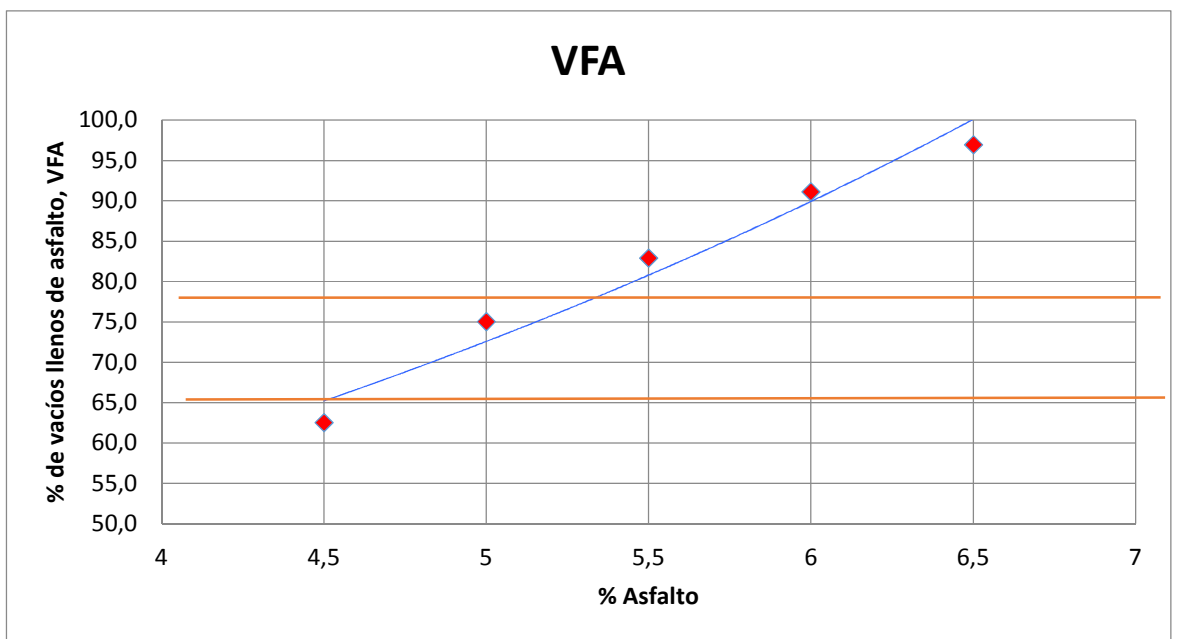


Figura 26. % de vacíos llenos de asfalto Vs. % de asfalto de las briquetas.

- Discusión

En las Figuras 21 a 26, se puede observar que el porcentaje óptimo de asfalto es de 5%, ya que este se ajusta en todos los límites establecidos por la Tabla 22.

3.5.2. Diseño Marshall modificado.

Como se explicó anteriormente, se decidió tomar tres porcentajes de PET para ser utilizados como parcial de arena. Estos porcentajes son; 5%, 8% y 11%, a los cuales se les hizo la granulometría respectiva, mostrada en el capítulo 3.5.1. de la presente investigación.

Las Tablas 24 y 25 muestran los equipos y cantidad de materiales necesarios para la realización de las briquetas con PET.

Tabla 24. Equipos y cantidad de asfalto utilizados para la fabricación de las briquetas con PET.

Equipos utilizados	Cantidad de asfalto (g)	Número de muestras
Moldeador de probetas		
Extractor de probetas		
Martillo compactador	540	9
Prensa		
Medidor de estabilidad		
Medidor de deformación		

Tabla 25. Cantidad de PET por porcentaje para el diseño de las mezclas.

Cantidad PET Parcial de Arena	
Porcentaje	(g)
5%	512,4
8%	819,9
11%	1127,4
Total	2459,7

Como se dijo anteriormente, el porcentaje óptimo de asfalto encontrado fue 5%. De acuerdo a esto y a cada porcentaje de PET, se realizó una relación de pesos y de volumen para cada briqueta. En las Tablas 26 a la 29 se puede observar esta relación, incluyendo la de la mezcla sin PET como reemplazo de arena. Se observa que a medida que el porcentaje de PET aumenta, el volumen de mezcla asfáltica es mayor para una briqueta de 1.200 g. Sin embargo, para la preparación de las probetas se tuvo en cuenta el peso en gramos de cada uno de los componentes de la mezcla.

Tabla 26. Relación de peso y volumen de la briqueta con 5% de asfalto.

Material	Densidad (g/cm ³)	% Volumen	Volumen ocupado (cm ³)	Peso (g)
Asfalto	1,02	5,00	23,25	23,72
PET	-	-	-	-
Agregado	2,76	91,62	426,03	1.175,85
Vacíos	-	3,38	15,72	-
Total		100,00	465,00	1.200

Tabla 27. Relación de peso y volumen de la briqueta con reemplazo de arena con 5% de PET.

Material	Densidad (g/cm ³)	% Volumen	Reemplazo parcial del agregado (5% de PET) (%)	Volumen ocupado (cm ³)	Peso (g)
Asfalto	1,02	5,00	5,00	23,85	24,33
PET	1,38	-	4,58	21,85	30,15
Agregado	2,76	91,62	87,04	415,18	1.145,89
Vacíos	-	3,38	3,38	16,12	-
Total		100,00	100,00	477,00	1.200

Tabla 28. Relación de peso y volumen de la briqueta con reemplazo de arena con 8% de PET.

Material	Densidad (g/cm ³)	% Volumen	Reemplazo parcial del agregado (8% de PET) (%)	Volumen ocupado (cm ³)	Peso (g)
Asfalto	1,02	5,00	5,00	24,20	24,68
PET	1,38	-	7,33	35,48	48,96
Agregado	2,76	91,62	84,29	407,97	1.125,98
Vacíos	-	3,38	3,38	16,36	-
Total		100,00	100,00	484,00	1.200

Tabla 29. Relación de peso y volumen de la briqueta con reemplazo de arena con 11% de PET

Material	Densidad (g/cm ³)	% Volumen	Reemplazo parcial del agregado (11% de PET) (%)	Volumen ocupado (cm ³)	Peso (g)
Asfalto	1,02	5,00	5,00	24,58	25,07
PET	1,38	-	10,08	49,53	68,36
Agregado	2,76	91,62	81,54	400,78	1.106,15
Vacíos	-	3,38	3,38	16,61	-
Total		100,00	100,00	491,50	1.200

- Resultados

Las Figuras 27 y 28 muestran la estabilidad y el flujo, obtenidos inicialmente en el laboratorio, para cada uno de los porcentajes de PET utilizados como parcial de arena.

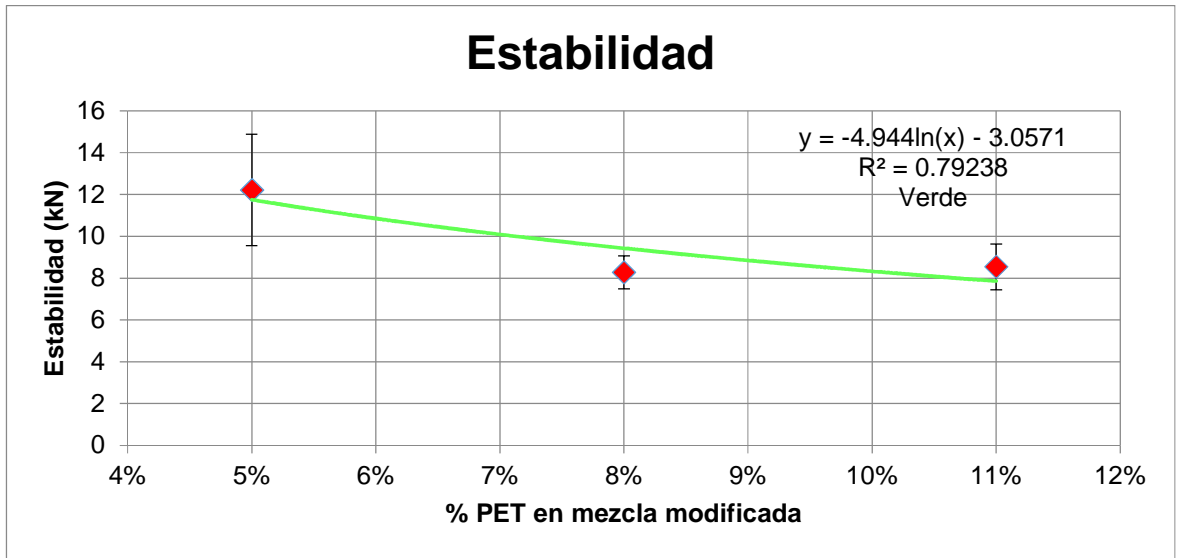


Figura 27. Estabilidad obtenida por cada porcentaje de PET.

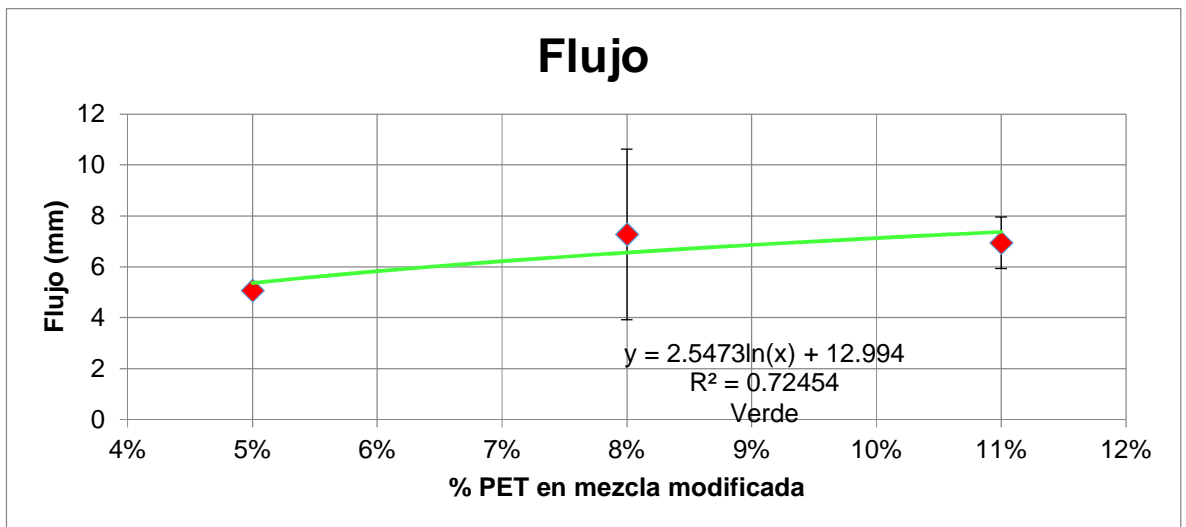


Figura 28. Flujo obtenido por cada porcentaje de PET.

- Discusión

Para comenzar, se analiza la estabilidad de las briquetas modificadas con PET. Se observa en la Figura 27 que la estabilidad disminuye a medida que la cantidad de porcentaje de PET aumenta. Este resultado puede ser por varios motivos:

-No existe compatibilidad entre la mezcla asfáltica tradicional y la mezcla asfáltica modificada con PET

-Al tratarse de módulos de elasticidad distintos, es decir, rigideces distintas, el comportamiento no es homogéneo del todo el material y se altere el valor de estabilidad.

Además, se tiene que, según el artículo 450 de INVIAS, la estabilidad mínima es de 750 kg para un nivel de tránsito NT2. En la Figura 27 se observa que en todas las mezclas modificadas la estabilidad está por encima de la mínima establecida por la norma, lo que indica que cumple con un criterio de diseño de la mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall.

La Figura 27 muestra las barras de error de las estabilidades para cada porcentaje de PET, de acuerdo a la desviación estándar. Se puede notar que la estabilidad para 5% de PET tiene una desviación estándar mucho mayor que la estabilidad para los otros porcentajes de PET. De la misma manera se observa que la mezcla modificada con 11% de PET puede tomar los mismos valores que la mezcla modificada con 8% de PET, ya que presenta una desviación estándar mayor.

Por otro lado, se tiene el flujo. El plástico es conocido por la capacidad de deformación que tiene antes de romperse el material. El módulo de elasticidad de un plástico debe ser menor al de un acero, por ejemplo, se necesita menos esfuerzo para lograr grandes deformaciones. Aparte de eso, los resultados expuestos en la Figura 28 muestran resultados lógicos a la incorporación de un material más dúctil a la mezcla tradicional. Sin embargo, deformaciones excesivas, sin recuperación elástica son un riesgo en un material que está sujeto a cargas de tránsito. Beer, Ferdinand⁸⁴ dice que "una carga dada puede repetirse muchas veces, siempre y cuando los esfuerzos permanezcan dentro del rango elástico. Tal conclusión es correcta para cargas que se repiten unas cuantas docenas o aun centenares de veces. Sin embargo, como se verá, no es correcto cuando las cargas se repiten millares o millones de veces. En tales casos, la fractura ocurrirá aun cuando el esfuerzo sea mucho más bajo que la resistencia estática a la fractura". Teniendo en cuenta que las cargas se tratan de tránsito, el flujo debe ser limitado. De hecho, y

⁸⁴ Cargas repetidas, fatiga. En: Mecánica de materiales. p.59

según el Art. 450-07⁸⁵, ninguna de las mezclas con PET, cumple con un flujo máximo de 4 mm para un nivel de tránsito NT2.

En la Figura 29 se puede observar que existe una mejora sustancial de la estabilidad de la mezcla con PET con respecto a la mezcla sin modificar. Midiendo las distancias relativas con respecto a la mezcla sin modificar, se encuentra una mejora del 44% con PET al 5%, del 8% con PET al 9% y del 12% con PET al 11%. Esta mejora sustancial, se ve reflejada en una mayor rigidez por parte de la mezcla modificada.

En la Figura 30 se observa un aumento considerable en el flujo de la mezcla a medida que hay un incremento en el porcentaje de PET. Según el artículo 450 del INVIAS, solo la mezcla sin modificar cumple con el criterio de flujo, lo que pone en duda cualquier posibilidad de diseño de mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall, pues si estos resultados persisten, el flujo por tensión de la carpeta asfáltica con PET es excesivo frente a una mezcla sin modificar.

De hecho, la variación del flujo de una mezcla modificada con respecto a una mezcla sin modificar, llega a valores extremos como del 130% con un PET al 11%. Lo que lleva a dudar de la posibilidad de usar PET en una mezcla asfáltica.

⁸⁵ Instituto Nacional de Vías. Artículo 450-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

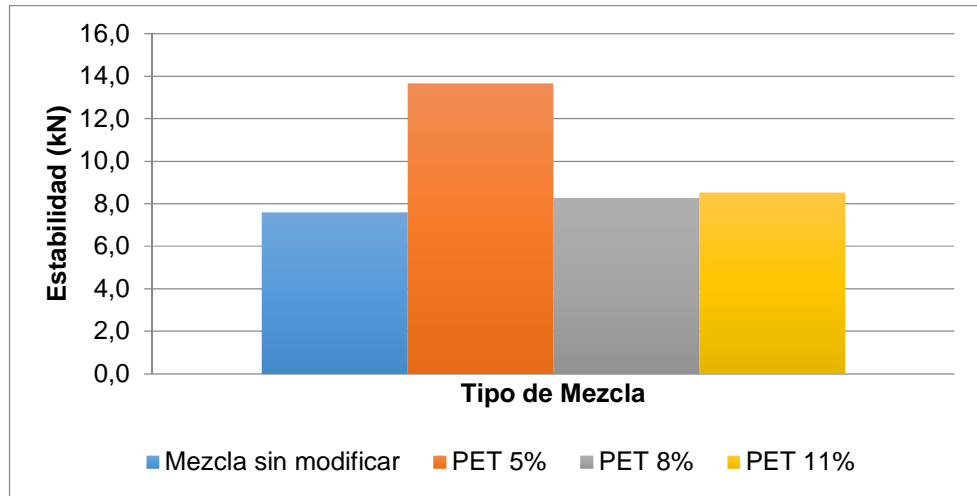


Figura 29. Comparación de las estabildades entre las briquetas sin modificar y las briquetas modificadas con PET.

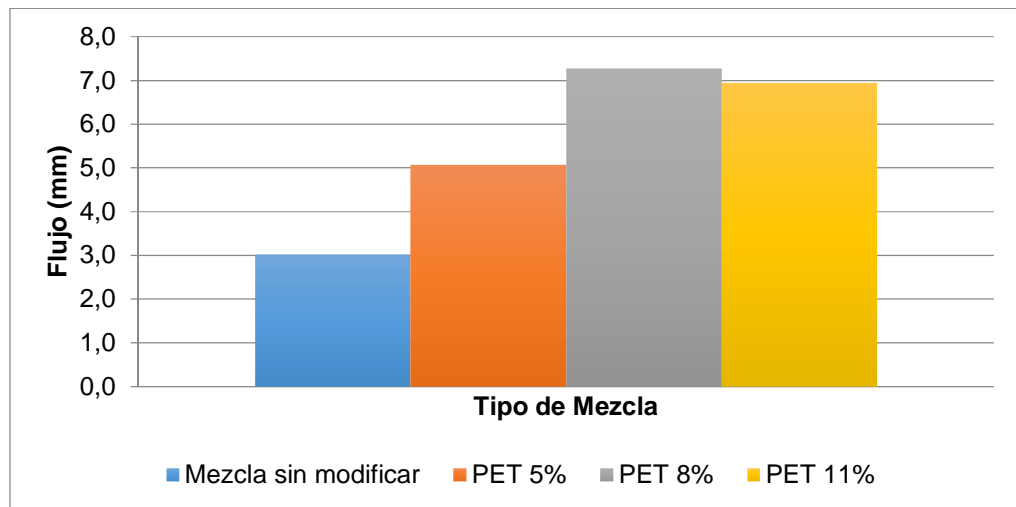


Figura 30. Comparación de los flujos entre las briquetas sin modificar y las briquetas modificadas con PET.

4. CONCLUSIONES

Las mezclas modificadas con PET, son una solución alternativa a las mezclas asfálticas tradicionales, donde se utiliza asfalto y agregado.

De hecho, esta mezcla alternativa, reduce la cantidad de agregado a utilizar en la mezcla y lo reemplaza por un material muy próximo al día a día del ser humano, el PET. Éste tipo de ideas van de la mano con el medio ambiente, mejora la calidad humana y recicla lo que se considera basura por algunos.

En el proyecto de grado se encontró una mejora sustancial de las propiedades mecánicas, como la estabilidad, en la mezcla modificada. Aun así, el flujo mostró un comportamiento inverso, generando dudas sobre la posibilidad de seguir realizando mezclas con PET.

Al igual que la investigación realizada por WAN y ACHMAD en el año 2013, el trabajo de grado mostró que el PET ayuda en la resistencia de la estabilidad en la mezcla asfáltica. Sin embargo, no se encontró un comportamiento en el flujo adecuado, debido a que, a medida que se incrementó el porcentaje de PET, la deformación era mayor, lo que contradice los resultados obtenidos por los investigadores en mención.

Análogamente, el artículo 450 de INVIAS es muy claro al especificar un límite de deformaciones en la mezcla asfáltica, lo que conlleva a la no utilización de esta mezcla modificada en el futuro, a menos que se modifique, de alguna manera, los altos niveles de deformación mostrados en el proyecto.

Por otro lado, se puede analizar el flujo excesivo de dos maneras: debido al agregado utilizado y la combinación agregado-PET. Sin embargo el agregado consiste en una roca ígnea basáltica y la granulometría, según lo cuestionado durante el proyecto, fue perfecta, ya que se trató de una ideal. Por ende, se descarta la variable agregado, en la mezcla asfáltica. Pero la combinación agregado-PET es cuestionable en la medida que las partículas de agregado entre ellas funcionan con fricción, pero con el PET no pueden hacer lo mismo y el resultado es la deformación excesiva.

De igual manera, el asfalto tiene un comportamiento que cumple con el artículo 400 INVE. Además, es un asfalto que actualmente es utilizado en los proyectos de nuestro país, proveniente de la refinería de Barrancabermeja, Colombia.

Para resumir, la mezcla asfáltica modificada con PET, es una alternativa, la cual dio resultados positivos en el proyecto con relación a la carga, es decir, estabilidad. No obstante con relación, a la deformación, los resultados no son los mejores y no se propone como una solución final para la mezcla asfáltica.

5. RECOMENDACIONES

El séptimo objetivo del milenio, según la ONU, es *GARANTIZAR LA SOSTENIBILIDAD DEL MEDIO AMBIENTE*. Es grato para el grupo presentar una alternativa a lo que ya se conoce, de todos modos, el resultado no fue el mejor.

Sin embargo, se propone a los nuevos investigadores en pavimentos, la posibilidad de utilizar un método de mezcla alternativo al utilizado en el proyecto, de tal forma que se puede homogenizar la mezcla asfáltica y cumplir con tan anhelado objetivo de mezcla.

Si definitivamente, el resultado no es el mejor, se debe reforzar el análisis del flujo y buscar la forma de limitar las altas deformaciones que se producen al utilizar el PET como un parcial de arena. Este análisis en la deformación, impulsa nuevos logros en métodos de mezcla, porcentajes óptimos de uso y caracterización del PET, el cual puede llegar a ser un amigo en las alternativas de mezcla.

Todas estas recomendaciones se han hecho con el fin de no descartar el PET como un modificador del asfalto y aportar un grano de arena con ese objetivo de garantizar la sostenibilidad del medio ambiente.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARENAS LOZANO, Hugo León. Tecnología del cemento asfáltico. Colombia: FAID, (s.f).

Agregados. Colombia: ASOGRAVAS. [En línea]. [Citado el 16 de Mayo de 2014]. Disponible en: <<http://www.asogras.org/Inicio/Agregados.aspx>>

AVELLAN CRUZ, Martha Dina. Asfaltos modificados con polímeros. Trabajo de grado de Ingeniería Civil. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2007.

BAGHERZADEH, Roohollah, SADEGHli, Abdol-Hossein y LATIFI, Masoud. Utilizing polypropylene fibers to improve physical and mechanical properties of concrete. En: Textile Research Journal. Jan, 2012. vol. 82, no. 1, p. 88-96

BARIANI, Liedi, GORETTI, Laura, PEREIRA, Jorge y BARBOSA, Jorge. Ligantes asfálticos. En: Pavimentación asfáltica, Formación básica para ingenieros. Río de Janeiro: Gráfica Imprinta, (2008), p.25-110.

CEMPRE. Plásticos. Colombia. [En línea]. [Citado el 16 de Mayo de 2014]. Disponible en: <<http://www.cempre.org.co/documentos/ficha%20pl%C3%A1stico.pdf>>

ECOPETROL. [en línea]. [Citado el 13 de Mayo de 2014]. Disponible en: <<http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=46&conID=37668>>

Esquema de Ordenamiento Territorial, Municipio de Puracé-Coconuco (Cauca) Subsistema fisicobiótico. [en línea]. [Citado el 13 de Mayo de 2014]. Disponible en: <http://www.sgc.gov.co/Geologia/Mapa-geologico-de-Colombia.aspx>

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES UNIVERSIDAD DE VALLADOLID DEPARTAMENTO DE QUÍMICA. Propiedades y características.[en línea]. [Citado el 13 de Mayo de 2014]. Disponible en: http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/pet/propiedades_y_caracteristicas.htm

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Mezclas asfálticas en caliente (concreto asfáltico y mezcla de alto módulo).Artículo 450-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos. Artículo 400-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos. Norma INV E-213-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles. Norma INV E-218-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Resistencia al desgaste de los agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm (3 /4") por medio de la máquina de los ángeles. Norma INV E-219-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Sanidad de los agregados frente a la acción de las soluciones de sulfato de sodio o de magnesio. Norma INV E-220-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Porcentaje de caras fracturadas en los agregados. Norma INV E-227-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciados por forma de las partículas, textura de la superficie y gradación). Norma INV E-239-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Determinación del coeficiente de pulimento acelerado de los agregados gruesos (cpa) con ayuda del péndulo de fricción. Norma INV E-232-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Método para determinar partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos. Norma INV E-240-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Equivalente de arena de suelos y agregados finos. Norma INV E-133-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Determinación de la limpieza superficial de las partículas de agregado grueso. Norma INV E-237-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Ductilidad de los materiales asfálticos. Norma INV E-702-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola). Norma INV E-712-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Toma de muestras de mezclas asfálticas para pavimentos. Norma INV E-731-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Extracción cuantitativa de asfalto en mezclas para pavimentos. Norma INV E-732-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Peso específico aparente y peso unitario de mezclas asfálticas compactadas empleando especímenes saturados con superficie seca. Norma INV E-733-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas empleando especímenes parafinados. Norma INV E-734-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas para pavimentos. Norma INV E-735-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas. Norma INV E-736-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall. Norma INV E-748-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Penetración de los materiales asfálticos. Norma INV E-706-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Índice de penetración de cementos asfálticos. Norma INV E-724-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Viscosidad del asfalto mediante viscosímetros capilares de vacío. Norma INV E-716-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Método para determinar la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional. Norma INV E-717-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Solubilidad de materiales asfálticos en tricloroetileno o tricloroetano. Norma INV E-713-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Puntos de ignición y de llama mediante la copa abierta Cleveland. Norma INV E-709-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Ensayo en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento. Norma INV E-720-07. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2007.

LUTGENS, Edward y TARBUCK, Edward. Ciencias de la tierra, una introducción a la geología física, volumen I. Pearson, 2010, p.103

MINISTERIO DE TRANSPORTE: OFICINA DE PLANEACIÓN. Caracterización del transporte en Colombia: Diagnóstico y proyectos de transporte e infraestructura. Bogotá D.C.: 2005, p.2-12

MOLANO BRAVO, Alfredo. El Macizo Colombiano. EL ESPECTADOR. [en línea]. [Citado el 13 de Mayo de 2014]. Disponible en: <http://www.elespectador.com/noticias/temadeldia/el-macizo-colombiano-articulo-286548>

MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de Pavimentos para Carreteras. Colombia: Ágora Editores Ltda., (2001), p.1.

PERDOMO VELA, María Yolanda y QUINCHÍA RESTREPO, Juan Fernando. Incorporación de fibras de polipropileno como refuerzo para el aumento de tenacidad en losas de concreto. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Colombia: Pontificia Universidad Javeriana Cali, 2005

QUINTERO, Humberto. Cemento Asfáltico de Refinería. [en línea]. [Citado el 13 de Mayo de 2014]. Disponible en: <http://www.humbertoquintero.com.co/productos/asfalto-de-refineria>

REYES LIZCANO, Fredy Alberto y FIGUEROA INFANTE, Ana Sofía. Antecedentes. En: Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas. Colombia: Pontificia Universidad Javeriana, 2008. p.13-17.

REYES LIZCANO, Fredy Alberto, FIGUERO INFANTE, Ana Sofía y SÁNCHEZ CASTILLO, Arnulfo. Caracterización física de un asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada. En: Revista Épsilon. Diciembre, 2007. N°9. p.41-55.

RIOJA, Héctor. T31: Susceptibilidad térmica de Ligantes basadas en el desempeño real. (s.f.), p.12.

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN. Pavimentos, Texto Guía. Bolivia. (2004), p.2.

WAN MOHD NAZMI, Wan Abdul Rahman, ACHMAD FAUZI, Abdul Wahab. Green Pavement Using Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as Partial Fine Aggregate Replacement in Modified Asphalt. En: ProcediaEngineering. 2013. N°53. P.124-128.

8. ANEXOS

Anexo 1. Carta de apoyo de la empresa COCOPLAST S.A.S.



Cocoplast S.A.S.

NIT 900.193.046-0

Santiago de Cali, Junio de 2014

Señores
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI
Santiago de Cali

Cordial saludo,

Por medio de la presente hacemos constar que nuestra empresa COCOPLAST S.A.S., con NIT 900,193,046-0, apoyó totalmente al grupo de estudiantes de la facultad de Ingeniería Civil durante todo el proceso de elaboración de su proyecto de grado. Nuestra empresa asumió los gastos necesarios para su culminación.

Cordialmente,


EUGENIO ENRIQUE RAMÍREZ JAMES
GERENTE

 **Cocoplast S.A.S.**
NIT. 900.193.046-0

Anexo 2. Carta de apoyo de la empresa CANTERAS LTDA.



NIT 81.700.19.69-1

Santiago de Cali, Agosto del 2014

Señores
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
Santiago de Cali

Cordial Saludo,

Por medio de la presente hacemos constar que nuestra empresa CANTERAS LTDA., con NIT 81.700.19.69-1, apoyó al grupo de estudiantes conformado por: Daniela Ramírez López, John Alexander Grajales y Alberto José Vidal, de la facultad de Ingeniería Civil durante el proceso de elaboración de su proyecto de grado. Nuestra empresa brindó los recursos necesarios en la investigación que realizaron.

Cordialmente,

JESUS ALBERTO VIDAL ROJAS
GERENTE

Anexo 3. Granulometría obtenida inicialmente del agregado proveniente de la empresa CANTERAS LTDA.

Tamiz (mm)	Masa retenida (kg)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje pasa (%)
37,5	0	0	0	100
25	0,022	0,4	0,4	99,6
19	1,718	29,4	29,8	70,2
12,5	2,723	46,6	76,3	23,7
9,5	0,964	16,5	92,8	7,2
4,75	0,391	6,7	99,5	0,5
2	0,004	0,1	99,6	0,4
0,425	0,0016	0,0	99,6	0,4
0,18	0,007	0,1	99,7	0,3
0,075	0,017	0,3	100,0	0,0
Masa total (kg)	5,8476			

Anexo 4. Límites granulométricos del agregado para una mezcla MDC-1.

MDC-1		
Tamiz (mm)	Porcentaje Pasa del Límite Superior (%)	Porcentaje Pasa del Límite Inferior (%)
25	100	100
19	95	80
12,5	85	67
9,5	77	60
4,75	59	43
2	45	29
0,425	25	14
0,18	17	8
0,075	8	4

Anexo 5. Cálculo de la masa retenida ideal en la granulometría del agregado.

Franja Granulométrica para mezcla asfáltica en caliente MDC-1				Masa Total, sin secar, sin lavar (Kg)	150
MDC-1					
Tamiz (mm)	Porcentaje Pasa del Límite Superior (%)	Porcentaje Pasa del Límite Inferior	Promedio (%)	Porcentaje Retenido (%)	Masa Retenida (Kg)
25	100	100	100	0	100
19	95	80	87,5	12,5	95
12,5	85	67	76	11,5	85
9,5	77	60	68,5	7,5	77
4,75	59	43	51	17,5	59
2	45	29	37	14	45
0,425	25	14	19,5	17,5	25
0,18	17	8	12,5	7	17
0,075	8	4	6	6,5	8
			Σ	94	141

Anexo 6. Datos obtenidos a partir del ensayo resistencia de los agregados en la máquina de los Ángeles (INVE-218 y INVE-219).

Resistencia al Desgaste de los Agregados de
Tamaños Menores de 37,5 mm por Medio de la
Maquina de Los Ángeles

Tamiz (mm)	Masa requerida (Kg)	Masa real (Kg)
19	2,5	2,514
12,5	1,25	1,254
9,5	1,25	1,257
Total	5	5,025

Anexo 7. Datos obtenidos a partir del laboratorio Gravedad específica y absorción de los agregados finos (INV E-222-07).

Muestra	Peso recipiente (g)	Peso sss (g) S	Número de matraz	Peso matraz+muestra (g) C	Peso matraz lleno de agua (g)	Temperatura °C	Peso seco + recipiente (g)	Peso seco (g) A
1	95,0	500,0	5,0	973,9	650,2	26,0	577,3	482,3
2	92,2	500,0	1,0	979,2	658,4	25,0	579,7	487,5
3	98,3	500,0	7,0	976,9	660,3	26,0	575,5	477,2
Promedio	95,2	500,0	4,3	976,7	656,3	25,7	577,5	482,3

Anexo 8. Datos obtenidos a partir del laboratorio Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos (INV E-223-07).

Muestra N°	Peso SSS + recipiente (g)	Peso en el agua (g) C	Peso seco + recipiente (g)	Peso recipiente (g)	Peso sss (g) B	Peso seco (g) A
1	1056,3	618,0	1044,9	107,1	949,2	937,8
2	904,0	515,0	893,8	111,2	792,8	782,6
3	868,7	494,1	859,0	113,1	755,6	745,9
Promedio	943,0	542,4	932,6	110,5	832,5	822,1

Anexo 9. Datos obtenidos a partir del laboratorio índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras (I,N,V,E-230-07).

Tamiz	Peso retenido (kg)		Peso retenido (g)
3/4	1,649	R _{i3/4}	1649
1/2	2,789	R _{i1/2}	2789
3/8	0,76	R _{i3/8}	760
1/4	0,22	R _{i1/4}	220
N°4	0,002		2
M ₁ =	5,420		5420

Peso recipiente		371,7	g
APLANAMIENTO			
Tamiz	Peso pasa (g)	I _{AI}	
3/4	283,2	17%	
1/2	595,4	21%	
3/8	206,4	27%	
1/4	59,6	27%	
M _{2-Aplanamiento} =	1144,6		
I _A =	21%		

ALARGAMIENTO			
Tamiz	Peso retenido (g)	I _{AI}	
3/4	22,4	1%	
1/2	484,8	17%	
3/8	307,9	41%	
1/4	144,9	66%	
M _{2-Alargamiento} =	960		
I _A =	17,7%		

Anexo 10. Puntos de ablandamiento para los tipos de asfalto.

Tipo de asfalto	Punto de ablandamiento °C
Asfalto sin modificar	52 ± 0,6
Asfalto con 3% PET	51 ± 1,1
Asfalto con 5% PET	47 ± 1,0
Asfalto con 7% PET	45 ± 1,0

Anexo 11. Penetraciones para cada tipo de asfalto.

Penetración (*0,1 mm)			
Asfalto sin modificar	Asfalto con 3% PET	Asfalto con 5% PET	Asfalto con 7% PET
61,0	64,0	62,0	60,0
61,0	64,0	62,0	60,0
61,0	65,0	62,0	60,0
61,0 ±0,0	64,3 ±0,5	6,0 ±0,0	60,0 ±0,0

Anexo 12. Datos obtenidos del Rheometro DV-III Ultra para hallar la Viscosidad del asfalto sin modificar.

Temperatura (°C)	Viscosidad (Centipoise)	%Par
99,5	4716,7	28,3
99,5	4800,0	28,8
99,5	4833,3	29,0
99,7	4887,5	39,1
99,8	4537,5	36,3
99,8	4600,0	36,8
99,5	4675,0	18,7
99,5	4775,0	19,1
99,6	4825,0	19,3
119,5	1125,0	18,0
119,5	1156,3	18,5
119,5	1168,8	18,7
119,8	1150,0	23,0
119,8	1165,0	23,3
119,8	1185,0	23,7
119,7	1150,0	32,2
119,7	1167,9	32,7
119,8	1178,6	33,0
119,4	1147,2	41,3
119,5	1158,3	41,7
119,5	1158,3	41,7
139,3	384,1	16,9
139,3	390,9	17,2
139,3	395,5	17,4
139,4	391,7	18,8
139,4	393,8	18,9
139,4	397,9	19,1
139,6	392,9	22,0
139,6	396,4	22,2
139,7	398,2	22,3
159,3	119,5	23,9
159,3	120,0	24,0
159,3	119,5	23,9
159,8	120,0	28,8
159,2	120,0	28,8

159,8	119,6	28,7
159,7	120,0	31,2
159,3	119,6	31,1
159,8	118,8	30,9
159,4	124,3	34,8
159,8	119,3	33,4
159,4	119,3	33,4
179,6	58,8	18,8
179,7	58,8	18,8
179,6	59,1	18,9
179,5	59,7	20,3
179,5	58,5	19,9
179,1	59,1	20,1
179,5	60,8	21,9
179,2	58,9	21,2
179,1	58,9	21,2
179,6	62,8	25,1
179,1	59,5	23,8
179,1	58,8	23,5
199,1	33,3	13,3
199,3	33,3	13,3
199,4	33,3	13,3
199,7	32,4	14,6
199,5	32,9	14,8
199,3	32,9	14,8
199,5	39,6	19,0
199,6	36,0	17,3
199,1	35,0	16,8

Asfalto sin modificar	
Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)
100°C	4792,1 ± 44,4
120°C	1162,3 ± 6,6
140°C	393,5 ± 3,0
160°C	119,7 ± 0,2
180°C	59,7 ± 0,6
200°C	34,3 ± 2,3

Anexo 13. Datos obtenidos del Rheometro DV-III Ultra para hallar la Viscosidad del asfalto modificado con 3% de PET.

Temperatura (°C)	Viscosidad (Centipoise)	%Par
100	4,838	039
100	4,788	038
100	4,813	039
100	4,938	039
100	4,850	039
100	4,838	039
120	1,313	011
120	1,313	011
120	1,313	011
120	963	039
120	880	035
120	868	035
120	860	052
120	857	051
120	857	051
140	295	012
140	295	012
140	295	012
140	295	018
140	295	018
140	297	018
140	292	29
140	291	29
140	291	29
160	126	013
160	124	012
160	125	013
159	124	015
159	124	015
159	123	015

Asfalto 3%PET	
Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)
100	4843,8 ± 51,1
120	1024,5 ±218,4
140	294,0 ±2,1
160	124,4 ±0,9

Anexo 14. Datos Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas asfálticas.

Peso picnómetro con agua (g)	7436				
Asfalto	4,5	5	5,5	6	6,5
Peso seco (g)	1975,2	1977,0	1973,7	1970,6	1953,8
Peso con agua (g)	8657,3	8652,5	8647,1	8642,8	8632,5
GMM	2,62	2,60	2,59	2,58	2,58

Anexo 15. Tamices utilizados para la granulometría del PET.

Tamiz	
mm	pulg,
38,1	1 1/2"
25	1"
19	3/4"
12,5	1/2"
9,5	3/8"
4,75	No,4
2	No,10
0,425	No,40
0,18	No,80
0,075	No,200
Pasa 200	Pasa 200

Anexo 16. Resultados de la granulometría del PET.

Granulometría del PET				
Tamiz	Peso retenido (g)	%Retenido	%Retenido acumulado	%Pasa
38,1	0	0,0%	0%	100%
25	0	0,0%	0%	100%
19	0	0,0%	0%	100%
12,5	0	0,0%	0%	100%
9,5	0	0,0%	0%	100%
4,75	0	0,0%	0%	100%
2	17,5	3,6%	4%	96%
0,425	416,8	85,4%	89%	11%
0,18	44,6	9,1%	98%	2%
0,075	8,4	1,7%	100%	0%
Pasa 200	0,50	0,1%	100%	0%
Peso Total	487,8000			

Anexo 17. Porcentaje pasa de la granulometría con 5% de PET.

Tamiz (mm)	%Pasa Agregado al 95%	%Pasa PET al 5%	Combinado
38,1	95,00%	5,00%	100,00%
25	95,00%	5,00%	100,00%
19	83,13%	5,00%	88,13%
12,5	72,20%	5,00%	77,20%
9,5	65,08%	5,00%	70,08%
4,75	48,45%	5,00%	53,45%
2	35,15%	4,82%	39,97%
0,425	18,53%	0,55%	19,07%
0,18	11,88%	0,09%	11,97%
0,075	5,70%	0,01%	5,71%

Anexo 18. Porcentaje pasa de la granulometría con 8% de PET.

Tamiz (mm)	%Pasa Agregado al 92%	%Pasa PET al 8%	Combinado
38,1	92,00%	8,00%	100,00%
25	92,00%	8,00%	100,00%
19	80,50%	8,00%	88,50%
12,5	69,92%	8,00%	77,92%
9,5	63,02%	8,00%	71,02%
4,75	46,92%	8,00%	54,92%
2	34,04%	7,71%	41,75%
0,425	17,94%	0,88%	18,82%
0,18	11,50%	0,15%	11,65%
0,075	5,52%	0,01%	5,53%

Anexo 19. Porcentaje pasa de la granulometría con 11% de PET.

Tamiz (mm)	%Pasa Agregado al 89%	%Pasa PET al 11%	Combinado
38,1	89,00%	11,00%	100,00%
25	89,00%	11,00%	100,00%
19	77,88%	11,00%	88,88%
12,5	67,64%	11,00%	78,64%
9,5	60,97%	11,00%	71,97%
4,75	45,39%	11,00%	56,39%
2	32,93%	10,61%	43,54%
0,425	17,36%	1,21%	18,56%
0,18	11,13%	0,20%	11,33%
0,075	5,34%	0,01%	5,35%

Anexo 20. Datos tomados en el laboratorio para las briquetas de asfalto sin modificar.

% Asfalto	Briqueta	Espesor probeta (mm)	Diámetro (mm)	Peso seco (g)	Peso con parafina (g)	Peso en el agua (g)
4,5	1	60,50	101,5	1167,3	1184,6	697,2
	2	60,17	102,3	1175,3	1191,3	700,4
	3	60,00	101,8	1165,1	1184,7	691,8
	Promedio	60,22	101,87	1169,23	1186,87	696,47
5	1	58,67	102,33	1173,1	1188,5	707,9
	2	62,67	103,00	1151,9	1181,7	690,4
	3	58,00	102,33	1142,8	1154,8	684
	Promedio	59,78	102,56	1155,94	1175,00	694,10
5,5	1	59,33	102,33	1168,5	1187,5	703,1
	2	59,33	105,00	1185,4	1197,2	717,1
	3	60,50	103,00	1128,2	1180	677,8
	Promedio	59,72	103,44	1160,72	1188,23	699,33
6	1	58,33	102,67	1140,0	1166,9	690,6
	2	57,33	102,67	1150,0	1174,2	698,7
	3	59,00	102,00	1120,0	1153,2	677,9
	Promedio	58,22	102,44	1136,68	1164,77	689,07
6,5	1	59	102,33	1090,0	1129,6	665,7
	2	58	103,67	1132,7	1159,9	693
	3	58	102,33	1144,2	1166,8	695,3
	Promedio	58,33	102,78	1122,31	1152,10	684,67

%Asfalto	Gravedad Específica Bulk (Gb)	Gravedad Máxima Teórica (Gmt)	Gravedad Máxima Medida (Gmm)	%Absorción
4,5	2,48	2,56	2,62	0,89
5	2,51	2,54	2,60	0,90
5,5	2,53	2,52	2,59	1,05
6	2,55	2,50	2,58	1,26
6,5	2,57	2,48	2,58	1,60

%Asfalto	Volumen de agregado %Vagreg	%Vacíos	Volumen asfalto efectivo %Vae	Vacíos agregado mineral %VAM	Vacíos llenos de asfalto %VFA
4,5	85,85	5,30	8,85	14,15	40,2
5	86,46	3,38	10,17	13,54	66,8
5,5	86,59	2,29	11,12	13,41	79,4
6	86,85	1,16	11,99	13,15	90,3
6,5	87,06	0,39	12,55	12,94	96,9

%Asfalto	Estabilidad (kN)	Flujo (mm)
4,5	7,44	1,50
5	7,60	3,02
5,5	7,70	3,87
6	7,20	4,25
6,5	6,84	5,04

Anexo 21. Resultados de estabilidad y flujo para la mezcla modificada con PET.

%PET	Briqueta N°	Estabilidad (kN)	Flujo (mm)
5%	1	12,829	5,14
	2	14,526	5,005
	3	9,302	5,077
Promedio		12,219 ± 2,7	5,074 ± 0,1
%PET	Briqueta N°	Estabilidad (kN)	Flujo (mm)
8%	1	8,32	11,051
	2	9,04	6,125
	3	7,474	4,649
Promedio		8,278 ± 0,78	7,275
%PET	Briqueta N°	Estabilidad (kN)	Flujo (mm)
11%	1	9,776	8,101
	2	7,663	6,534
	3	8,188	6,2
Promedio		8,542 ± 1,1	6,945 ± 1,0

Anexo 22. Ficha técnica del asfalto.



GERENCIA REFINERIA BARRANCABERMEJA
COORDINACION INSPECCION DE CALIDAD

Reporte de Resultados de Ensayo de Laboratorio

Fecha de Generación del Certificado: 07/Sep/2013 14:02
Producto: ASFALTO 60/70
Número de Muestra: 203589480
Fecha de VoBo: 07/Sep/2013 08:34
Almacenamiento: K0200

VoBo: SI

ANALISIS	UNIDAD	RESULTADO	ESPECIFICACION	METODO
CURVA REOLOGICA				
VISCOSIDAD A 60 C	cP	213000	REPORTAR	ASTM D 4402
VISCOSIDAD A 80 C	cP	19075	REPORTAR	ASTM D 4402
VISCOSIDAD A 100 C	cP	3203	REPORTAR	ASTM D 4402
VISCOSIDAD A 135 C	cP	340.0	REPORTAR	ASTM D 4402
VISCOSIDAD A 150 C	cP	170.0	REPORTAR	ASTM D 4402
DUCTILIDAD	cm	140	100 MINIMO	ASTM D 113 D
GRAVEDAD API/GRAVEDAD ESPECIF. EN CRUDOS				
GRAVEDAD API	Grados API	7.2	REPORTAR	ASTM D 4052
DENSIDAD A 15 °C	kg/m3	1019.6	REPORTAR	ASTM D 4052
INDICE DE PENETRACION CALCULADO				
PENETRACION A 25 C (77 F)	mm/10	63	60 MINIMO - 70 MAXIM	ASTM D 5
INDICE DE PENETRACION	N/A	-1.1	REPORTAR	ASTM D 5
PERDIDA DE MASA (RTFOT)	g/100g	0.20	1 MAXIMO	ASTM D 2872
PUNTO ABLANDAMIENTO	°C	48.1	45 MINIMO - 55 MAXIM	ASTM D 36
PUNTO DE INFLAMACION	°C	300	232 MINIMO	ASTM D 92
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO	%	99.9	99 MINIMO	ASTM D 2042
VISTO BUENO TANQUES				
VoBo	N/A	SI	REPORTAR	VISTO BUENO
COMENTARIO	N/A	NINGUNO	REPORTAR	VISTO BUENO

NOTA: NINGUNA
N/A: No Aplica - Comentario:NINGUNO

VoBo Nombre: John Fernando González Espinosa

NOTA: Si tiene alguna duda en cuanto al producto favor comunicarse con la Gerencia de Comercialización:

* COORDINACIÓN DE COMERCIALIZACION BARRANCABERMEJA: (097620) 9903/9907 FAX (097620) 9071 Refinería ECOPETROL

* COORDINACIÓN DE PETROQUIMICOS E INDUSTRIALES BOGOTÁ: (091234) 5001/5091/5668/4676/5671/5666 FAX. (091231) 5565/5538 Calle 37 No. 7-43 Piso 8.

* COORDINACIÓN DE COMBUSTIBLES BOGOTÁ: (091234) 5001/5091/5667/5491. FAX (091231) 5565/5538. Calle 37 N.º. 7-43 Piso 8.

Para tramitar un reclamo se requiere comunicación escrita informando producto, No. de Factura y Objeto del Reclamo, además muestra del producto (Líquidos un galón, Sólidos 3 Kilos). Para el Polietileno aclarar el número de lote.