

MODIFICACIÓN DE ASFALTOS CON TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)

**ANGIE KATHERINE HERNÁNDEZ MARTÍNEZ
ELVIRA LISETH PEÑA CARVAJAL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2019**

MODIFICACIÓN DE ASFALTOS CON TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)

ANGIE KATHERINE HERNÁNDEZ MARTÍNEZ

ELVIRA LISETH PEÑA CARVAJAL

Trabajo de Grado para optar el título de ingeniero civil

DIRECTOR

EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN

INGENIERO CIVIL

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2019

DEDICATORIA

A Dios por llenar mi vida de bendiciones y permitirme haber llegado alcanzar este gran logro, a mis padres Alberto Peña e Isabel Carvajal, quienes son las personas más importantes en mi vida, los primeros en enseñarme a través de su ejemplo el sentido de la responsabilidad y a no desfallecer a pesar de los obstáculos; por siempre estar ahí brindándome su apoyo y amor incondicional; a ellos que con su gran esfuerzo y dedicación hicieron posible que alcanzaré este gran logro académico.

A mis hermanos, personitas especiales quienes siempre me han acompañada o a lo largo de mi vida, compañeros de juegos y quienes fueron mis principales consejeros a la hora de elegir mi carrera, por ser grandes motivadores en esta lucha por alcanzar mi sueño.

A todas mis familiares, compañeros y amigos que de alguna u otra manera contribuyeron en este proceso de formación.

ELVIRA LISETH PEÑA CARVAJAL

A Dios y a la Santísima Virgen
porque gracias a ellos he llegado a culminar
esta etapa tan importante en mi vida.

A mi mami Anayibe y mi papi Orlando
por ser los pilares fundamentales en este logro,
por ser un ejemplo a seguir, pero sobre todo por el esfuerzo,
apoyo incondicional y confianza depositados en mí.

A mis hermanos Fabian y Jonathan
por sus voces de aliento, sabios consejos y
por motivarme día a día a ser mejor.

A toda mi familia y amigos
porque cada uno de ellos aportaba en mi aprendizaje
personal y profesional.

Gracias a todos porque son una inspiración.

Mis logros son para ustedes y de ustedes.

Angie Katherine Hernández Martínez

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a Dios por darnos la sabiduría y por bendecirnos con esta gran oportunidad, a nuestros padres por trabajar arduamente para poder brindarnos su apoyo económico y moral, a los docentes por transmitirnos sus conocimientos y hacer de nosotros unas personas más críticas y prepararnos para afrontar nuestros retos profesionales, y especialmente a nuestro director de proyecto Eduardo Alberto Castañeda quien nos acompañó y nos brindó las pautas necesarias en el desarrollo del proyecto de grado y a la UIS por permitirnos hacer parte de esta gran institución.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS	18
1.1 OBJETIVO GENERAL	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2. ESTADO DEL ARTE	19
2.1 GENERALIDADES DE LOS ASFALTOS	19
2.2 ASFALTOS MODIFICADOS CON POLÍMEROS	20
3. METODOLOGÍA	21
3.1 EL PET COMO MODIFICADOR DE ASFALTO	21
3.1.1 Mezclado de asfalto y PET.	21
3.1.2 Caracterización de asfaltos modificados	23
3.2 EL PET COMO PARTE INTEGRAL DEL FAM (FINE AGREGATE MATRIX) ...	24
3.3 CARACTERIZACIÓN DE CONCRETO ASFÁLTICO CON LA ADICIÓN DE PET	26
3.3.1 Componentes del concreto asfáltico	27
3.3.2 Preparación de probetas	29
3.3.3 Caracterización de concretos asfálticos	33
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	34
4.1 CARACTERIZACIÓN DE ASFALTOS MODIFICADOS	34
4.1.1 Manejabilidad en el mezclado	34
4.1.2 Consistencia del asfalto.	34
4.2 CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS ASFALTO – ARENA Y ASFALTO – PET	37
4.2.1 Poder rigidizante.	38

4.2.2 Medida de la rigidez compleja de muestras asfalto – PET y asfalto – arena.	38
4.3 CARACTERIZACIÓN DE CONCRETOS ASFÁLTICOS CON ADICIÓN DE PET	42
4.3.1 Estabilidad y flujo.	42
5. CONCLUSIONES	44
6. RECOMENDACIONES	46
BIBLIOGRAFÍA	47
ANEXOS	49

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros para la mezcla.	22
Tabla 2. Cantidades de asfalto y agregados empleados.	25
Tabla 3. Resultados de laboratorio asfalto 60/70.	27
Tabla 4. Granulometría y caracterización de grava triturada 3/4"	28
Tabla 5. Granulometría y caracterización de la arena.	28
Tabla 6. Granulometría y caracterización de grava triturada 3/4" y arena del Rio Guaca.	30
Tabla 7. Características de los agregados pétreos.	30
Tabla 8. Parámetros de diseño MDC-19.	31
Tabla 9. Cantidad de asfalto y agregados para una briqueta.	31
Tabla 10. Variación del poder rigidizante del asfalto con PET.	38
Tabla 11. Variación del poder rigidizante del asfalto con arena.	38
Tabla 12. Variación porcentual módulo dinámico.	40
Tabla 13. Estabilidad y flujo de las diferentes muestras.	43

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Composición de los asfaltos.	19
Figura 2. Dispositivo utilizado para el mezclado.	22
Figura 3. Esquema ensayo de penetración.	23
Figura 4. Esquema ensayo punto de ablandamiento.	24
Figura 5. Esquema ensayo de visco elasticidad.	26
Figura 6. Fabricación de probetas Marshall.	32
Figura 7. Probetas modificadas con PET.	32
Figura 8. Grumos de PET en el asfalto.	34
Figura 9. Variación de la penetración del asfalto.	35
Figura 10. Variación de la penetración del asfalto.	35
Figura 11. Variación de la penetración del asfalto.	35
Figura 12. Variación del punto de ablandamiento.	36
Figura 13. Variación del punto de ablandamiento.	36
Figura 14. Variación del punto de ablandamiento.	37
Figura 15. Comparación de curvas maestras de Módulo dinámico para asfalto convencional y modificado con 3% de volumen de agregado.	39
Figura 16. Comparación de curvas maestras de Módulo dinámico para asfalto convencional y modificado con 5% de volumen de agregado.	39
Figura 17. Comparación de curvas maestras de Módulo dinámico para asfalto convencional y modificado con 7% de volumen de agregado.	40
Figura 18. Comparación de curvas maestras del ángulo de fase para asfalto convencional y modificado con 3% de agregado.	41
Figura 19. Comparación de curvas maestras del ángulo de fase para asfalto convencional y modificado con 5% de agregado.	41

Figura 20. Comparación de curvas maestras del ángulo de fase para asfalto convencional y modificado con 7% de agregado.	42
--	----

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Resultados de la estabilidad y el flujo para diferentes muestras.

“Los anexos están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS”

RESUMEN

TÍTULO: MODIFICACIÓN DE ASFALTOS CON TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)*

AUTORES: ANGIE KATHERINE HERNÁNDEZ MARTÍNEZ
ELVIRA LISETH PEÑA CARVAJAL**

PALABRAS CLAVES: Asfalto, PET, Rigidez, Módulo de Young, Ángulo de Fase.

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo fue realizado con el fin de evaluar las propiedades mecánicas de los asfaltos modificados con Tereftalato de polietileno (PET). En un ligante bituminoso es importante conocer la susceptibilidad térmica, ya que es necesario establecer a qué temperatura el asfalto comienza a fluir; para hallar la temperatura de punto de ablandamiento se realizaron ensayos a diferentes muestras de asfalto con adición de tereftalato de polietileno.

Para la determinación de las propiedades visco elásticas del asfalto se utilizó un equipo DMA (Análisis Mecánico Dinámico) sometiendo las probetas a deformación constante y bajo cargas de forma sinusoidal (tracción y compresión). Para obtener los parámetros como son el módulo dinámico E y ángulo de desfase en diferentes niveles de temperatura y de frecuencia de carga.

Por otro lado, se realizaron muestras de concreto asfáltico a las cuales se les reemplazó una cantidad de arena por PET de igual tamaño (partículas pasa tamiz número 30 y retenidas tamiz número 40) en diferentes dosificaciones y se evaluaron sus características físico-mecánicas mediante ensayos de estabilidad y flujo según la Norma del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Los resultados se compararon con muestras de mezclas convencionales para así determinar las variaciones en las características físicas del material.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánica. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzón.

ABSTRACT

TITLE: MODIFICATION OF ASPHALTS WITH POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET)*

AUTHORS: ANGIE KATHERINE HERNÁNDEZ MARTÍNEZ
ELVIRA LISETH PEÑA CARVAJAL**

KEYWORDS: Asphalts, PET, Rigidity, Young module, phase angle.

DESCRIPTION:

This work was carried out in order to evaluate the mechanical properties of the asphalts modified with Polyethylene terephthalate (PET). In a bituminous binder it is important to know the thermal susceptibility, due to the need to establish at what temperature the asphalt begins to flow; To find the softening temperature, tests were done with different samples of asphalt with addition of polyethylene terephthalate.

For the determination of the viscoelastic properties of the asphalt, a DMA equipment was used by submitting the test specimens to constant deformation and under sinusoidal loads (traction and compression). For the determination of the parameters; Dynamic module E and offset angle, at different temperature and load frequency levels.

On the other hand, were made samples of asphalt concrete to which they were replaced by a quantity of sand by PET of equal size (particles pass sieve number 30 and retained sieve number 40) in different dosages and from this the physical-mechanical characteristics were evaluated through stability and flow test according to the Standard of the National Institute of Roads (INVIAS). The results obtained in the test described here, where they were compared with samples of conventional mixtures. Based on the above, it was established that the variations in the physical characteristics of the material were achieved to find.

* Degree work.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánica. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzón

INTRODUCCIÓN

El aumento del tránsito de vehículos y de las cargas que transportan los camiones, requieren de redes viales con estructuras de rodamiento de mayor capacidad. Es necesario crear nuevos materiales que permitan soportar mayores cargas y prolongar la vida útil de los pavimentos.

Simultáneamente los desechos que produce la sociedad contaminan el ambiente. El uso de materiales no biodegradables pueden tardar cientos de años en descomponerse.¹

Entre los materiales contaminantes se encuentra el tereftalato de polietileno (PET), utilizado en empaques y almacenamientos². Una disposición para este material podría ser como componente en la fabricación de mezclas asfálticas.

Las propiedades mecánicas de los asfaltos podrían modificarse al adicionar PET. Este trabajo evalúa las variaciones que podrían darse en materiales bituminosos al utilizar PET como modificador de bitúmenes o como remplazante de alguna fracción de los agregados pétreos de los concretos asfálticos.

¹ BELLVER, Elena. Contaminación. Materiales no biodegradables. 2016.

² GÓNGORA PEREZ, Juan Pablo. La industria de plástico en México y el mundo. Comercio exterior. 2014. p.8

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar y comparar el comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con tereftalato de polietileno (PET) con respecto a una mezcla asfáltica convencional.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Establecer un procedimiento de preparación del asfalto modificado con tereftalato de polietileno (PET).

Determinar las modificaciones en la rigidez del ligante asfáltico al adicionar tereftalato de polietileno (PET).

Determinar los cambios en estabilidad, flujo y composición volumétrica de concretos asfálticos con la incorporación de tereftalato de polietileno (PET).

Definir las variaciones en comportamiento que podrían tener los concretos asfálticos con tereftalato de polietileno.

2. ESTADO DEL ARTE

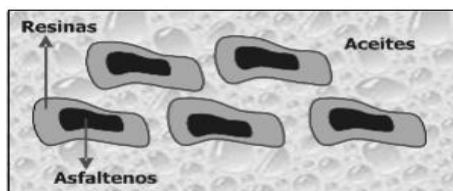
2.1 GENERALIDADES DE LOS ASFALTOS

El asfalto producido en la refinación del crudo de petróleo es un material con características de ligante, de color marrón oscuro a negro, de consistencia visco-elástica.

De manera general se ha coincidido en que el asfalto es una compleja mezcla heterogénea de hidrocarburos³ de consistencia semisólida a temperatura ambiente que pueden ser más fluidos en la medida en que se les incrementa la temperatura⁴.

Los asfaltos están compuestos fundamentalmente por asfáltenos que proporcionan las características estructurales y dureza del asfalto, por resinas que asumen las propiedades cementantes o aglutinantes, y por aceites que aportan la consistencia para mejorar trabajabilidad. Figura 1.⁵

Figura 1. Composición de los asfaltos.



³ MUNERA OSSA, Juan Camilo. Modificación polimérica de asfaltos. Medellín: Universidad EAFIT, 2012. P.18.

⁴ BOHÓRQUEZ, Natalia. FIGUEROA. *et al.* Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente. Revista ingeniería e investigación. Diciembre 2007. p.2

⁵ BOHÓRQUEZ, Natalia. FIGUEROA. *et al.* Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente. Revista ingeniería e investigación. Diciembre 2007. p.2

Fuente: MUNERA OSSA, Juan Camilo. Modificación polimérica de asfaltos. Medellín: Universidad EAFIT, 2012. P.18.

2.2 ASFALTOS MODIFICADOS CON POLÍMEROS

La modificación de asfalto con polímeros se puede realizar mediante la mezcla simple de asfalto y polímeros a temperaturas que pueden oscilar entre 140 a 190 °C. La adición de polímeros al asfalto ha mejorado sus propiedades obteniendo óptimos rendimientos en sus aplicaciones ya que estos presentan mayor resistencia al agrietamiento térmico, aumentan las resistencias a la fatiga y a la deformación permanentemente. Los polímeros pueden modificar la reología del asfalto debido a sus altos pesos moleculares y a la interacción física o química de las cadenas poliméricas con los componentes del asfalto.

La modificación del asfalto se produce sólo cuando efectivamente hay cambios en las propiedades debido a la interacción entre el polímero y el asfalto. Los polímeros de características elastoméricas han demostrado que aumenta la flexibilidad de los materiales asfálticos, al tiempo que aumenta su rigidez. La capacidad de mejorar el rendimiento del asfalto depende de la cantidad y del tipo de polímero, y la compatibilidad del asfalto con el polímero en la mezcla.⁶

⁶ MUNERA OSSA, Juan Camilo. Modificación polimérica de asfaltos. Medellín: Universidad EAFIT, 2012. P.26.

3. METODOLOGÍA

Para evaluar el efecto del PET sobre las mezclas asfálticas se realizaron estudios en los que el producto se utiliza de dos formas diferentes. La primera donde el PET es un agente modificador de las características de comportamiento mecánico del ligante y la segunda en la que el PET reemplaza una fracción del agregado pétreo que constituye el esqueleto granular del concreto asfáltico.

3.1 EL PET COMO MODIFICADOR DE ASFALTO

Para determinar las características de los asfaltos modificados con PET se mezcló este material con el asfalto y se realizaron ensayos de penetración y punto de ablandamiento.

3.1.1 Mezclado de asfalto y PET. Para la modificación de asfalto, se adicionaron diferentes cantidades de PET, variando las condiciones de tiempo de mezclado y temperaturas de mezclado del asfalto y del PET.

Tabla 1. Parámetros para la mezcla.

%PET	Peso asfalto [g]	Peso PET [g]	T° asfalto [°C]	Tiempo de mezcla [min]
0	250	0	-	5
3	250	7,5	100	5
5	250	12,5	100	5
7	250	17,5	100	5
3	250	7,5	130	5
5	250	12,5	130	5
7	250	17,5	130	5
3	250	7,5	100	5
5	250	12,5	100	5
7	250	17,5	100	5
0	250	0	-	10
3	231,4	6,942	100	10
5	298,5	14,925	100	10
7	250	17,5	100	10
3	250	7,5	130	10
5	250	12,5	130	10
7	250	17,5	130	10
3	250	7,5	100	10
5	250	12,5	100	10
7	250	17,5	100	10
0	250	0	-	15
3	250	7,5	100	15
5	250	12,5	100	15
7	250	17,5	100	15

Para la modificación de asfalto se utilizó un recipiente en el que se procedió a pesar y calentar el asfalto hasta temperaturas mayores a 100 °C. En otro recipiente simultáneamente se calentó el PET y cuando ambos materiales alcanzaban las temperaturas consideradas, el PET se adicionó al bitumen. Para homogenizar la se utilizó un rotor a 1500[rpm] el cual en su extremo contaba con una serie de espas para agitar la mezcla. Las condiciones de mezclado se indican en la Tabla 1.

Figura 2. Dispositivo utilizado para el mezclado.



La mezcla fue vertida en dos moldes, el primero, un recipiente cilíndrico para realizar el ensayo de penetración, el segundo se vertió en dos anillos de medidas estándar según la Norma INV E-712-13, para el ensayo de punto de ablandamiento.

3.1.2 Caracterización de asfaltos modificados. Se realizaron los siguientes ensayos teniendo en cuenta las indicaciones de la norma INVIAS:

- Ensayo Penetración Norma INV E-706-13. ⁷

Figura 3. Esquema ensayo de penetración.



- Ensayo Punto de ablandamiento Norma INV 712-13. ⁸

⁷ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Ensayo de penetración. Norma INV E-706-13. 2013

⁸ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola). Norma INV E-712-13. 2013

Figura 4. Esquema ensayo punto de ablandamiento.



3.2 EL PET COMO PARTE INTEGRAL DEL FAM (FINE AGREGATE MATRIX)

En una segunda fase del estudio, el PET fue considerado como una fracción del agregado fino, reemplazando diferentes cantidades de partículas como se muestra en la Tabla 2. Se realizaron mezclas de asfalto - PET y asfalto - arena sustituyendo la misma cantidad volumétrica de arena por PET en tamaños de partículas que pasan el tamiz N° 30 y son retenidas en N° 40.

- Cálculo tipo obtención de volumen arena y asfalto

$$\rho_{\text{asfalto a } 15^{\circ}\text{C}} = 1046,7 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{asfalto a } 15^{\circ}\text{C}} = 1,046 \text{ g/cm}^3$$

$$m_{\text{asfalto}} = 250 \text{ g}$$

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$v_{asfalto} = \frac{m}{\rho} = \frac{250 \text{ g}}{1,046 \text{ g/cm}^3}$$

$$v_{asfalto} = 238,846 \text{ cm}^3$$

$$v_{PET} = 238,846 * 3\% = 7,165 \text{ cm}^3$$

$$v_{PET} = v_{arena} = 7,165 \text{ cm}^3$$

Tabla 2. Cantidades de asfalto y agregados empleados.

Cantidades				
Porcentaje en volumen [%]	Asfalto [g]	Asfalto [cm ³]	PET [cm ³]	Arena [cm ³]
3	250	238,846	7,165	7,165
5	250	238,846	11,942	11,942
7	250	238,846	16,719	16,719

Con dicha mezcla se fabricaron probetas cilíndricas de 30 mm de alto y 15 mm de diámetro aproximadamente.

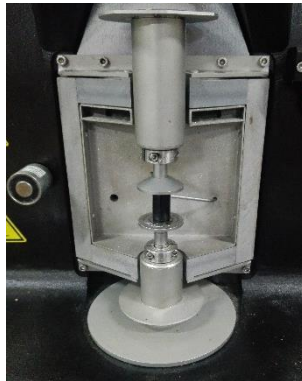
Se hizo un análisis comparativo de la rigidez de las mezclas Asfalto-arena y de las mezclas asfalto-PET con base en los siguientes ensayos:

- **Ensayo de poder rigidizante.** El poder rigidizante es el cambio en la temperatura del punto de ablandamiento de asfalto convencional comparado con el asfalto mezclado con arena y PET.

Se determinó el punto de ablandamiento de las mezclas asfalto - PET y asfalto arena según la Norma INV E-712-13 para así hallar el poder rigidizante de los agregados.

- **Ensayo de visco elasticidad dinámica.** Para realizar el ensayo de visco elasticidad dinámica se empleó la máquina METRAVIB, en la cual, se ensayaron las probetas cilíndricas bajo carga de tracción-compresión alternada; dicha máquina se operó por un computador mediante el Software DYNATEST, en el cual se introducen determinados datos de entrada, especificados a continuación.

Figura 5. Esquema ensayo de visco elasticidad.



- Forma de la carga: Carga sinusoidal (tracción y compresión), con deformación controlada empleando un desplazamiento de 1×10^{-5} m
- Frecuencia: Se consideraron frecuencias de 1, 3, 5, 10, 15, 25 y 30 Hz.
- Temperatura: El ensayo se realizó a temperatura ambiente.

En el ensayo se determina el módulo de elasticidad y el ángulo de desfase para las probetas asfalto- arena y asfalto PET.

3.3 CARACTERIZACIÓN DE CONCRETO ASFÁLTICO CON LA ADICIÓN DE PET

Para el análisis del concreto asfáltico con la adición de PET, se realizaron briquetas mediante diseño Marshall evaluando densidad específica bulk, estabilidad y flujo de dichas probetas.

3.3.1 Componentes del concreto asfáltico

- **Material bituminoso.** El material bituminoso utilizado en el presente proyecto, es cemento asfáltico con grado de penetración 60/70 procedente de la refinería Barrancabermeja, con el siguiente reporte de resultados de laboratorio.⁹

Tabla 3. Resultados de laboratorio asfalto 60/70.

ANÁLISIS	UNIDAD	RESULTADO	ESPECIFICACIÓN
DUCTILIDAD	cm	140	100 MÍNIMO
GRAVEDAD API	Grados API	3,6	
DENSIDAD A 15 °C	kg/m ³	1046,7	
PENETRACIÓN A 25 °C (77°F)	mm/10	64	60 MÍNIMO- 70 MÁXIMO
ÍNDICE DE PENETRACIÓN	N/A	-1,3	
PUNTO DE ABLANDAMIENTO	°C	47,2	45 MÍNIMO-55 MÁXIMO
PUNTO DE INFLAMACIÓN	°C	290	232 MÍNIMO

Fuente. ECOPETROL. Ficha técnica asfaltos para pavimento. p.3.

- **Grava triturada de 3/4".** La grava empleada es proveniente del Rio Guaca ubicado en el departamento de Santander, su caracterización granulometría se presenta en la siguiente tabla.¹⁰

⁹ ECOPETROL. Ficha técnica asfaltos para pavimento. p.3.

¹⁰ CONSORCIO SUPERVISIÓN DE PLANOS. Diseño mezcla asfáltica tipo MDC-19. 2019.p.2.

Tabla 4. Granulometría y caracterización de grava triturada 3/4"

TAMIZ	%PASA
1"	100
3/4"	98
1/2"	64,7
3/8"	43,7
N°4	10,1
N°10	2,1
N°40	1,6
N°80	1,5
N°200	1,2

Fuente. CONSORCIO SUPERVISIÓN DE PLANOS. Diseño mezcla asfáltica tipo MDC-19. 2019. p.2.

Superficie específica = 0,9 [m²/kg]

Índice de plasticidad = 0,0%

Materia orgánica = 0,0%

- **Arena triturada.** La arena triturada empleada es proveniente del Rio Guaca, su caracterización se presenta en la siguiente tabla.¹¹

Tabla 5. Granulometría y caracterización de la arena.

TAMIZ	%PASA
3/4"	100
1/2"	100
3/8"	100
N°4	99,7
N°10	70,3
N°40	33,7
N°80	20,3
N°200	10,5

¹¹ CONSORCIO SUPERVISIÓN DE PLANOS. Diseño mezcla asfáltica tipo MDC-19. 2019.p.3.

Fuente. CONSORCIO SUPERVISIÓN DE PLANOS. Diseño mezcla asfáltica tipo MDC-19. 2019.p.3.

Superficie específica = 11,7 [m²/kg]

Índice de plasticidad = 0,0%

Materia orgánica = 0,0%

- **Tereftalato de polietileno.** El PET utilizado es proveniente de botellas de plástico, estas se almacenan y posteriormente se le retiran las etiquetas y las tapas para introducirlo en una máquina la cual realiza el proceso de trituración. Finalmente se recoge el material en tamaños de partículas de tamiz N° 8 hasta tamiz N° 200. En este proyecto se trabajó con PET paso N° 30 retenido en tamiz pasa N° 40 el cual fue suministrado por la empresa Replasander.¹²

3.3.2 Preparación de probetas. Para el análisis de la mezcla asfáltica reemplazando PET como parcial de arena, se modificó un diseño de mezcla densa en caliente MDC-19 suministrado por el Consorcio Supervisión Planes, el cual presenta las siguientes características:

Dosificación teórica de los agregados pétreos de la siguiente manera:

- 45% Grava triturada de ¾" proveniente del Rio Guaca.
- 55% Arena de trituración proveniente del Rio Guaca.

La granulometría establecida para dicho diseño de acuerdo a las diferentes proporciones de agregado se muestra en la siguiente tabla.

¹² REPLASANDER Ltda. Disponible en <https://replasander.com.co/portfolio/pet-1/>

Tabla 6. Granulometría y caracterización de grava triturada 3/4" y arena del Rio Guaca.

TAMIZ	%PASA	Norma	Tolerancia
1"	99,8	100-100	95,8-100
3/4"	99,1	100-100	95,1-100
1/2"	84,1	80-95	80,1-89,1
3/8"	74,7	70-88	70,7-79,7
N°4	59,4	49-65	55,4-63,4
N°10	39,6	29-45	36,6-42,6
N°40	19,2	14-25	16,2-22,2
N°80	11,8	8-17	8,8-14,8
N°200	6,3	4-8	4,3-8,3

Fuente. CONSORCIO SUPERVISIÓN DE PLANOS. Diseño mezcla asfáltica tipo MDC-19. 2019.p.4.

Las diferentes características de los agregados pétreos utilizados para dicho diseño se muestran a continuación.

Tabla 7. Características de los agregados pétreos.

Ensayo	Norma	Resultado	Valor especificado INV Art. 450-13
Superficie específica gradación combinada		7.0 m ² /kg	NA
Índice de Plasticidad	INV E-125-126	NL-NP	NL-NP
Equivalente de arena	INV E-133	68.0%	50% mín.
Peso específico del agregado grueso	INV E-223	2.654g/cm ³	NA
Absorción del agregado grueso	INV E-223	0.7 %	NA
Peso específico de los finos	INV E-222	2.676g/cm ³	NA
Absorción de los finos	INV E-222	0.78 %	NA
Índice de Alargamiento	INV E-230	18.3%	30% máx.
Índice de Aplanamiento	INV E-230	16.3%	30% máx.
Relacion 5:1	INV E-240	6.2	10 max
Caras Fracturadas	INV E-227	100.0%	75% mín.
Solidez en sulfato de Magnesio Grava	INV E-220	2.03%	18% máx.
Solidez en sulfato de Magnesio Arena .	INV E-220	2.15%	18% máx.
Desgaste Gradación A	INV E-218-219	25%	25% máx.
Micro Deval	INV E-239-07	15.6 %	25% máx.
Contenido de Impurezas	INV E-237	0.4%	0.5% máx.
Azul de Metileno Gradación Combinada	INV E-235	1.5%	10 máx.
Traccion Indirecta	INV E-225-07	85.2 %	80% mín.
Ensayo de película de Asfalto	INV E-741	9.12µm	7.5 µm min
Angularidad de la fracción fina	INV E-741	49.3%	40% min
Riedel - Weber	INV E - 774	11	4 min
10% finos relación húmedo/seco	INV E-224	86.4	75 min
Coefficiente de pulimento acelerado	INV E- 232	0.2	0.45 min
Efecto del agua en mezclas asfálticas sueltas	-	No presenta desprendimiento	Reportar

Fuente. CONSORCIO SUPERVISIÓN DE PLANOS. Diseño mezcla asfáltica tipo MDC-19. 2019.p.5.

En el diseño de la mezcla se estableció el porcentaje óptimo de asfalto teniendo en cuenta la máxima densidad, estabilidad entre otros. A continuación, se presentan los parámetros establecidos para dicha mezcla asfáltica.

Tabla 8. Parámetros de diseño MDC-19.

PARÁMETROS DE DISEÑO	VALOR ADOPTADO
Contenido óptimo de asfalto	0,056
Estabilidad Marshall	1585 [kgf]
Flujo Marshall	3.3 [mm]
Relación estabilidad flujo	480 [kg/mm]
Porcentaje de vacíos con aire en la mezcla total	0,046
Porcentaje de vacíos llenos de asfalto	0,728
Densidad Bulk Marshall	2.340 [g/cm ³]
Relación llenante/ligante	1,18

Fuente. CONSORCIO SUPERVISIÓN DE PLANOS. Diseño mezcla asfáltica tipo MDC-19. 2019.p.6.

En la elaboración se le determinaron los pesos del agregado y asfalto para preparar 1200 g de mezcla para cada briqueta teniendo en cuenta el diseño anteriormente establecido

Tabla 9. Cantidad de asfalto y agregados para una briqueta.

Material	Densidad [g/cm ³]	% Volumen	Peso [g]
Asfalto	1,0467	5,6	67,2
Grava triturada de 3/4" Río Guaca	-	42,48	509,76
Arena de trituración Río Guaca	-	51,92	623,04
Total		100	100

En una balanza fueron pesadas las diferentes cantidades de los agregados requeridos para realizar tres briquetas, posteriormente se procedió a tamizar la arena, para así determinar el volumen pasa N° 30 retenida N° 40, dicha cantidad se reemplazó por partículas de PET de igual tamaño en diferentes proporciones (30%, 60% y 100%) respecto al volumen de arena inicial.

Los agregados se mezclaron en un recipiente de aluminio para luego proceder a calentarlos en una estufa hasta obtener una temperatura de 150 °C, simultáneamente se calentó el asfalto y PET necesarios a una temperatura de 150 °C y 100 °C respectivamente; posteriormente se realizó el mezclado de dichos materiales hasta obtener una mezcla completa y homogénea.

Para la elaboración de cada una de las briquetas, se pesaron 1200 g de la mezcla obtenida y se compactó de acuerdo a la Norma INV-E 748-13.

Figura 6. Fabricación de probetas Marshall.



Figura 7. Probetas modificadas con PET.



3.3.3 Caracterización de concretos asfálticos. Para el análisis de las características de rigidez en los concretos asfálticos se realizaron los siguientes ensayos:

- **Gravedad específica bulk.** Se pesaron las probetas en diferentes condiciones como son: peso seco, peso totalmente saturado y peso superficialmente seco teniendo en cuenta las indicaciones de la Norma INV E-733-13.¹³
- **Ensayo de estabilidad y flujo.** Se aplicó la carga a la probeta mediante el aparato Marshall determinando la carga máxima y la deformación presentada. Este procedimiento se realizó de acuerdo a las especificaciones descritas en la Norma INV E-748-13.¹⁴

¹³ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficie seca. Norma INV E-733-13. 2013

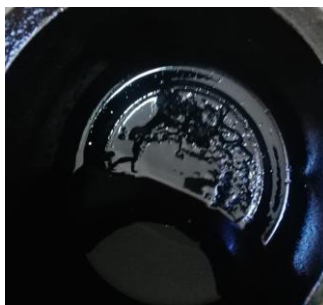
¹⁴ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall. Norma INV E-748-13. 2013

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 CARACTERIZACIÓN DE ASFALTOS MODIFICADOS

4.1.1 Manejabilidad en el mezclado. Al realizar diferentes ensayos para asfalto modificado con PET, se pudo concluir que el PET a temperaturas menores a 100 °C, cercanas a 230 (punto de fusión) y tiempo de mezcla mayor a 15 minutos, presentaba una aglomeración en el fondo del recipiente de mezclado, tal y como se muestra en la Figura 8; este aglutinamiento se pudo presentar por las diferencias de puntos de fusión entre el asfalto y el PET, pues, el asfalto por sus propiedades no debería superar la temperatura de 160 °C y el PET a esta temperatura no alcanzaba a fluir, considerando así, que ambos materiales, debían estar a una temperatura cercana entre sí para asegurar que el PET se dispersara en el bitumen.

Figura 8. Grumos de PET en el asfalto.



4.1.2 Consistencia del asfalto. Los resultados obtenidos en los ensayos de penetración y punto de ablandamiento para las mezclas indicadas en la Tabla 1 se muestran en las siguientes figuras.

Figura 9. Variación de la penetración del asfalto.

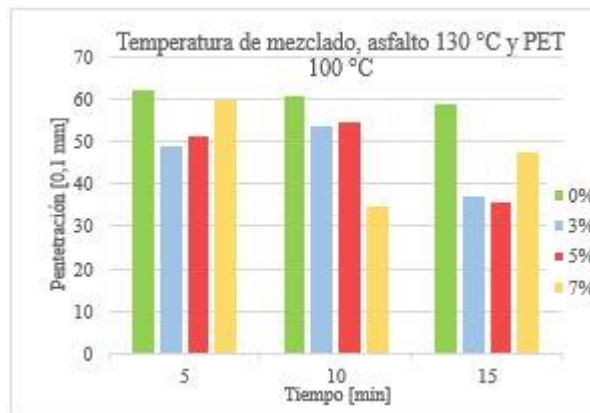


Figura 10. Variación de la penetración del asfalto.

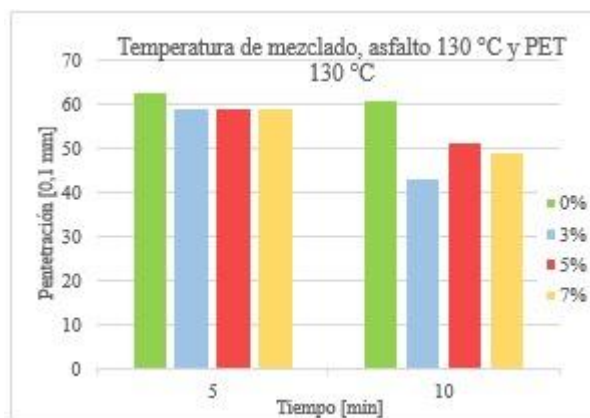
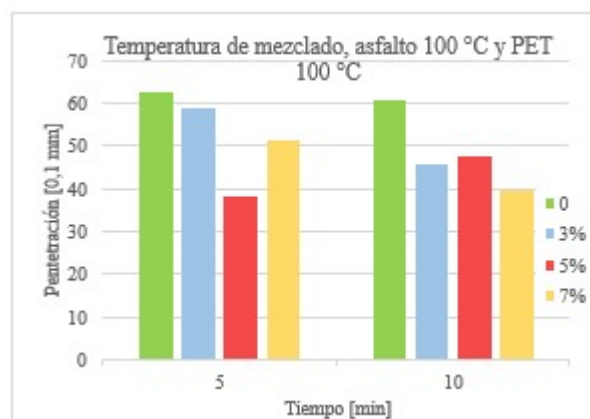


Figura 11. Variación de la penetración del asfalto.



En los resultados del ensayo de penetración se observan cambios al modificar el ligante con PET. La penetración del asfalto se logró modificar y los resultados indican que la modificación no fue producto del tiempo de mezclado y del calentamiento del asfalto. Los resultados no muestran una variación uniforme al adicionar mayor cantidad de PET, pero si indican que se producen modificaciones en las que el asfalto aumenta de consistencia.

A continuación, se muestran los resultados del punto de ablandamiento para las diferentes muestras de asfalto modificado.

Figura 12. Variación del punto de ablandamiento.

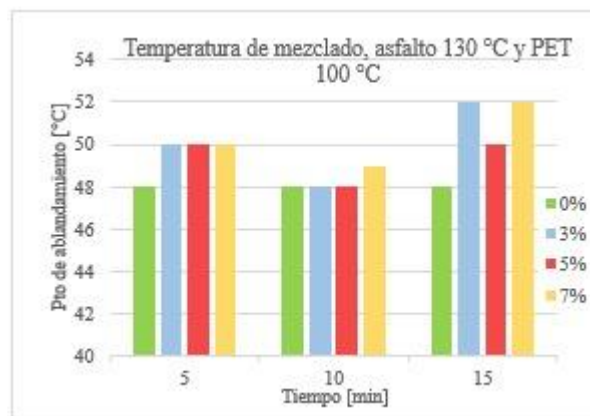


Figura 13. Variación del punto de ablandamiento.

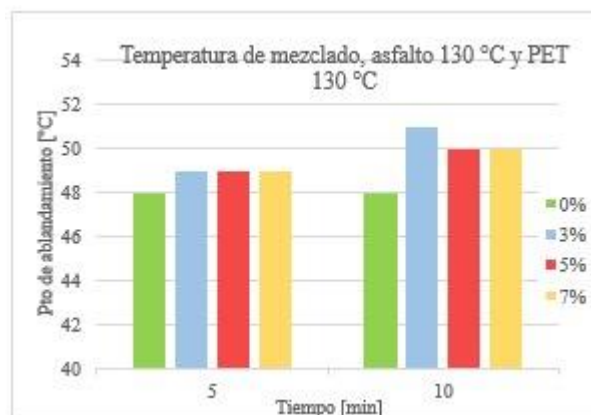
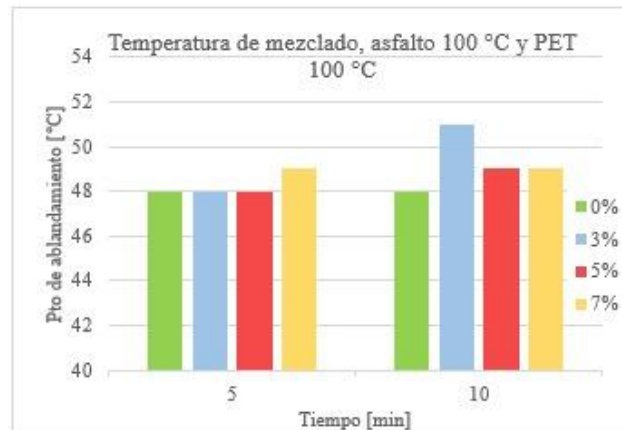


Figura 14. Variación del punto de ablandamiento.



Los resultados de punto de ablandamiento igualmente muestran una mayor consistencia de los ligantes modificados con PET. Se pone en evidencia que las condiciones de mezclado se deben controlar de manera más precisa para lograr resultados repetibles en la transformación del ligante.

A continuación, se evalúa el PET como una fracción del agregado granular de los concretos asfálticos.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS ASFALTO – ARENA Y ASFALTO – PET

Con las mezclas indicadas en la Tabla 2 se evaluó la variación del punto de ablandamiento y la rigidez de mezclas asfalto-PET con respecto a la mezcla asfalto arena.

Con estos resultados se quiere hacer un análisis comparativo entre el FAM (Fine Aggregate Matrix) de mezclas asfálticas con la inclusión de PET.

4.2.1 Poder rigidizante. Se realizó el ensayo de punto de ablandamiento para las muestras con diferente contenido de PET (3%,5% y 7%) con el propósito de establecer el Poder rigidizante del PET y compararlo con el de la fracción de arena que podría reemplazar.

Tabla 10. Variación del poder rigidizante del asfalto con PET.

Asfalto modificado con PET				
Porcentaje en volumen [%]	Asfalto [cm ³]	PET [cm ³]	Punto de ablandamiento [°C]	Poder rigidizante [°C]
3	238,846	7,165	50,1	2,1
5	238,846	11,942	50,5	2,5
7	238,846	16,719	50	2

Tabla 11. Variación del poder rigidizante del asfalto con arena.

Asfalto modificado con arena				
Porcentaje en volumen [%]	Asfalto [cm ³]	Arena [cm ³]	Punto de ablandamiento [°C]	Poder rigidizante [°C]
3	238,846	7,165	50,1	2,1
5	238,846	11,942	49	1
7	238,846	16,719	50,5	2,5

Los resultados no muestran cambios significativos pues el poder rigidizante varía entre 1 a 2 °C para las dos muestras.

4.2.2 Medida de la rigidez compleja de muestras asfalto – PET y asfalto – arena. El ensayo del módulo de rigidez y ángulo de desfase fue realizado aplicando esfuerzos de tensión - compresión con deformación controlada.

En la Figura 15, 16 y 17 se comparan el módulo dinámico para asfalto convencional, asfalto-arena y asfalto- PET, cada figura con un contenido diferente de arena y PET.

➤ Módulo de rigidez dinámico

Figura 15. Comparación de curvas maestras de Módulo dinámico para asfalto convencional y modificado con 3% de volumen de agregado.

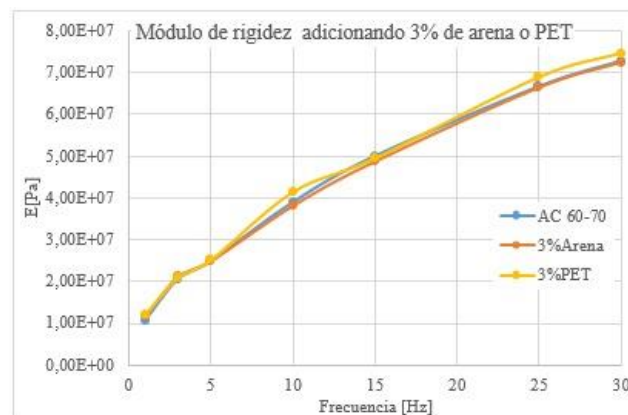


Figura 16. Comparación de curvas maestras de Módulo dinámico para asfalto convencional y modificado con 5% de volumen de agregado.

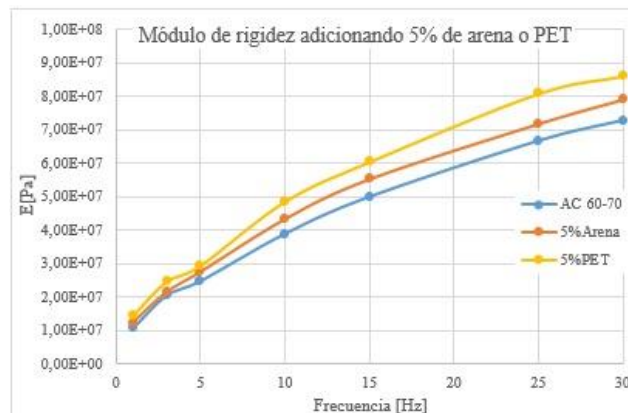
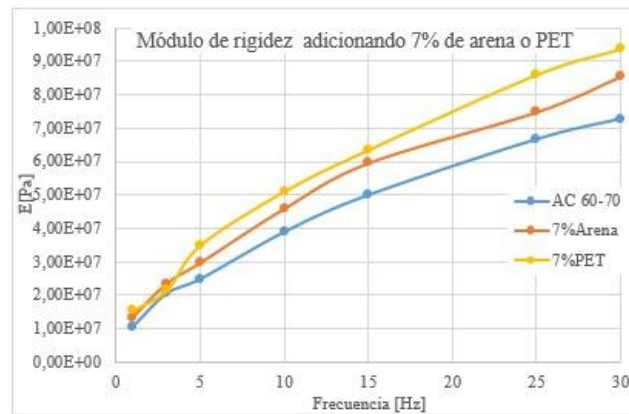


Figura 17. Comparación de curvas maestras de Módulo dinámico para asfalto convencional y modificado con 7% de volumen de agregado.



Al comparar las propiedades de rigidez de las muestras asfalto-PET con respecto a muestras asfalto- arena se observa un mayor incremento por adición de PET.

En la Tabla 12 se muestra una variación porcentual del módulo dinámico de las mezclas asfalto-PET con respecto a las mezclas asfalto-arena. En el módulo de rigidez se incrementó el valor hasta un 18%.

Tabla 12. Variación porcentual módulo dinámico.

Variación porcentual módulo dinámico del asfalto-PET con respecto a asfalto-arena			
Frecuencia [Hz]	3%	5%	7%
1	3,61	17,74	16,04
3	-0,95	15,13	-8,3
5	1,01	7,06	18,31
10	8,8	12,27	11,47
15	1,75	9,43	6,8
25	3,84	12,54	14,97
30	3,13	8,81	9,68

- **Ángulo de Fase.** En las Figuras 18,19, y 20 se hace un análisis comparativo de las curvas de ángulo de desfase del asfalto convencional, asfalto-arena y asfalto – PET.

Figura 18. Comparación de curvas maestras del ángulo de fase para asfalto convencional y modificado con 3% de agregado.

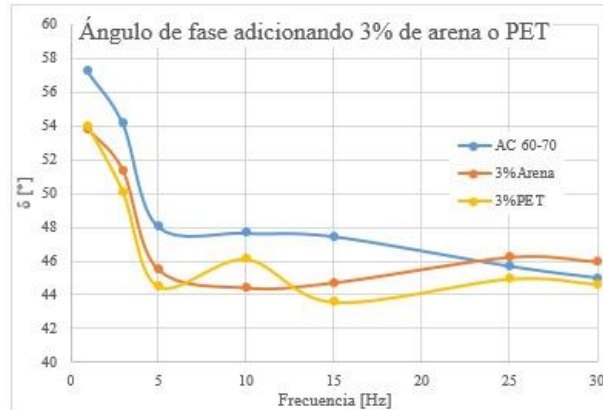


Figura 19. Comparación de curvas maestras del ángulo de fase para asfalto convencional y modificado con 5% de agregado.

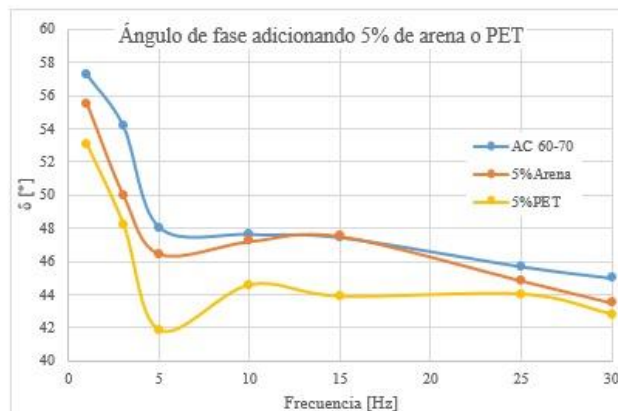
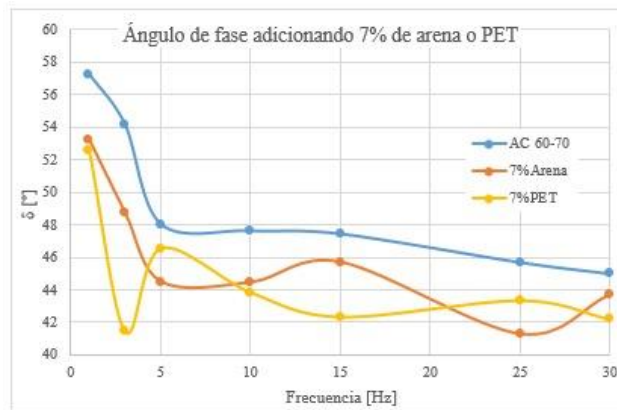


Figura 20. Comparación de curvas maestras del ángulo de fase para asfalto convencional y modificado con 7% de agregado.



Al comparar los ángulos de desfase obtenidos se observa que la muestra con PET tiene menores ángulos de desfase y en consecuencia mayor comportamiento elástico, lo que podría indicar una mayor resistencia a la fatiga del material y menores valores de la deformación permanente bajo cargas repetidas.

4.3 CARACTERIZACIÓN DE CONCRETOS ASFÁLTICOS CON ADICIÓN DE PET

Una primera evaluación de la incidencia del PET en la mezcla asfáltica se hizo mediante ensayos de estabilidad y flujo.

4.3.1 Estabilidad y flujo. Como el espesor de las briquetas no era uniforme en todas las muestras, se ajustaron los valores de estabilidad obtenidos por un factor de corrección según la norma INV E 748-13. Los resultados se muestran a continuación y en el Anexo A de forma detallada.

Tabla 13. Estabilidad y flujo de las diferentes muestras.

Probeta No.	Porcentaje reemplazando [%]	Gravedad específica Bulk	Estabilidad [N]	Flujo [mm]	Relación Estabilidad/Flujo [kN/mm]
1	100%	2,23	8807	3,75	2,30
2		2,24	9123	4,06	2,20
3		2,24	8379	4,28	2,00
Promedio		2,24	8770	4,03	2,17
4	60%	2,33	13104	3,62	3,60
5		2,33	14650	3,54	4,10
6		2,31	13421	3,21	4,20
Promedio		2,32	13725	3,46	3,97
7	30%	2,38	14390	3,52	4,10
8		2,37	15120	3,48	4,30
9		2,37	16150	3,28	4,90
Promedio		2,37	15220	3,43	4,43
10	0%	2,35	15981	3,25	4,92
11		2,34	14778	3,51	4,21
12		2,34	16792	3,15	5,33
Promedio		2,34	15850	3,30	4,82

Los resultados muestran que al reemplazar partículas de arena por PET en cantidades superiores al 60% podría causar un elevado debilitamiento de la mezcla; la estabilidad al reemplazar el 100% se redujo hasta un 50%.

5. CONCLUSIONES

Se realizaron estudios preliminares, en los que se evidenció que el PET en una mezcla asfáltica produce modificaciones. Los estudios incluyeron pruebas en los que el PET se empleó como modificador de asfaltos y como fracción del material granular de mezclas asfálticas. Con respecto a su empleo como modificador de asfaltos, se observaron cambios en la penetración y el punto de ablandamiento que sugieren cambios en el comportamiento fisicomecánico del ligante.

En el estudio como fracción del agregado, los ángulos de fase de las mezclas asfálticas disminuyeron en los materiales con adición de PET, lo que sugiere que es posible utilizarlo como parte integral del material granular pues se incrementa la componente elástica del módulo de rigidez y se reduce la componente viscosa; lo que podría significar que la capa asfáltica es más resistente a las fallas como fisuras y deformaciones permanentes, razón por la cual, el espesor de la capa asfáltica modificada puede disminuir respecto a la convencional.

Aunque los valores obtenidos de estabilidad y flujo para la modificación con 30 y 60% de PET están dentro del rango de las especificaciones de la Norma INV E-748, las mezclas bituminosas con PET muestran una menor resistencia a la deformación.

Evaluando simultáneamente los resultados de estabilidad Marshall y de rigidez compleja, muestran comportamientos contradictorios al adicionar PET; mientras la Estabilidad indica mayor deformabilidad del material, el ángulo de desfase indica materiales con mayor recuperación elástica.

Se presenta en forma exacta el aporte del desarrollo del trabajo en concordancia a la justificación presentada. Se describe en forma lógica, los resultados del trabajo, dando respuesta a los objetivos o propósitos planteados. Basado en los resultados recolectados, incluido el tratamiento estadístico o cualitativo. Se muestra en forma concisa los productos y/o resultados y se resaltan las contribuciones del trabajo al contexto local, regional, nacional e internacional, cuando aplique.

6. RECOMENDACIONES

Se debe estudiar de manera más profunda las condiciones de mezclado o de integración del PET al asfalto.

Se recomienda avanzar en el estudio de mezclas asfálticas modificadas con PET, evaluando la capacidad de la mezcla a resistir fatiga y deformación permanente.

Se realizaron estudios preliminares, en los que se evidenció que el PET en una mezcla asfáltica produce modificaciones ya sea como parte del agregado o como modificador del asfalto.

BIBLIOGRAFÍA

BELLVER, Elena. Contaminación. Materiales no biodegradables. [En línea]. 2016. (Recuperado en 12 de mayo del 2018). Disponible en <https://tendencias.com/eco/materiales-no-biodegradables/>

BOHÓRQUEZ, Natalia; FIGUEROA, *et al.* Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente. [En línea]. Diciembre 2007. Revista ingeniería e investigación. vol.27 No. 3. (Recuperado en 16 de octubre de 2018). Disponible en <https://www.redalyc.org/html/643/64327302/>

CONSORCIO SUPERVISIÓN DE PLANOS. Diseño mezcla asfáltica tipo MDC-19. 2019.

ECOPETROL. Ficha técnica asfaltos para pavimento. [En línea]. Incoasfaltos. (Recuperado en 01 noviembre del 2018) Disponible en: https://www.incoasfaltos.com/links/Ficha_Tecnica_Asfalto.pdf

GONGORA PEREZ, Juan Pablo. La industria de plástico en México y el mundo. [En línea]. 5 septiembre y octubre del 2014. Revista Comercio Exterior. (Recuperado en 12 de mayo del 2018). Disponible en http://revistas.bancomext.gob.mx/rce/magazines/761/3/la_industria_del_plastico.pdf

GRAJALES G., Jhon Alexander; RAMÍREZ L., Daniela y VIDAL S., Alberto José. Incorporación de tereftalato de polietileno como agente modificado en el asfalto. Trabajo de grado. Cali: Pontificia Universidad Javeriana. 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Ensayo de penetración. Norma INV E-706-13. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficie seca. Norma INV E-733-13. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola). Norma INV E-712-13. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall. Norma INV E-748-13. Santa fe de Bogotá: INVIAS, 2013

MUNERA OSSA, Juan Camilo. Modificación polimérica de asfaltos. Tesis de Magister en Ingeniería. Medellín: Universidad EAFIT. Escuela de Ingeniería. 2012. P.18.

ANEXOS

Anexo A. Resultados de la estabilidad y flujo.

“Ver anexos adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en base de datos de la Biblioteca UIS”.