

# Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente<sup>1</sup>

## Analysing polystyrene-modified asphalt and its incidence in a heat-dense asphalt mixture

Ana Sofía Figueroa Infante<sup>2</sup>, Fredy Alberto Reyes Lizcano<sup>3</sup>, Diana Hernández Barrera<sup>4</sup>, Christian Jiménez<sup>5</sup> y Natalia Bohórquez<sup>6</sup>

### RESUMEN

En esta investigación se presentan los resultados obtenidos al elaborar una mezcla asfáltica MDC-2 con asfalto modificado con Icopor (poliestireno), resultado de la trituración de vasos desechables, con el ánimo de mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas tipo rodadura y garantizar la durabilidad de las mismas bajo las solicitaciones impuestas en el período de diseño. Para el diseño se realizó la caracterización de los materiales pétreos, pertenecientes a una de las canteras de mayor utilización en la Sabana de Bogotá, del asfalto producido en Barrancabermeja, Santander, y del poliestireno obtenido de los desechos no biodegradables. El método empleado para la obtención de los porcentajes óptimos de asfalto-agregados-icopor, fue el Marshall. Se realizaron los siguientes ensayos: el estudio del asfalto teniendo en cuenta el envejecimiento, el comportamiento dinámico de la mezcla a partir de los ensayos de fatiga trapezoidal para 20°C y 30°C y para deformaciones de  $90 \times 10^{-6}$ ,  $150 \times 10^{-6}$  y  $220 \times 10^{-6}$ m, ahuellamiento para una carga de 13 toneladas, similar a la del eje más pesado de un bus de Transmilenio, módulo dinámico para 15°C, 20°C y 30°C y para las frecuencias de 2.5, 5 y 10Hz. Los resultados obtenidos se contrastaron con los de una mezcla asfáltica convencional. Como conclusiones de esta investigación se destacan: la disminución en más de un 50% de la deformación plástica ocurrida por el paso de vehículos de 13 ton, de acuerdo con el modelo utilizado, el aumento de la estabilidad de la mezcla asfáltica conservando un menor peso y la posibilidad de inclusión de estos materiales de desecho que impactan el ambiente pero contribuyen con la resistencia de un material como el concreto asfáltico, entre otros.

**Palabras clave:** asfalto modificado, asfalto, poliestireno, pavimentos, fatiga de mezclas bituminosas.

### ABSTRACT

This article presents some results obtained with an MDC-2 asphalt/polystyrene-modified asphalt mixture as a result of crushing waste glass. The stone, asphalt and polystyrene materials' were characterised for drawing up the design. The Marshall method was used for obtaining the best asphalt-stone-polystyrene percentages. The Superpave method was used for analysing the asphalt; the mixture's dynamic behaviour was analysed using a test involving 20°C and 30°C trapezoidal fatigue for  $90 \times 10^{-6}$ ,  $150 \times 10^{-6}$  and  $220 \times 10^{-6}$ m deformation. The truck-wheel test was analysed for a 13-ton load, similar to that of the heaviest axle on a *Transmilenio* (articulated) bus. The dynamic module test was analysed for 15°C, 20°C and 30°C and 2.5, 5 and 10 Hz frequencies. Conventional asphalt mixture and modified asphalt results were contrasted, interesting behaviour being observed regarding plastic deformation of the modified mixture in service

**Keywords:** modified asphalt, asphalt, polystyrene, pavement, bituminous mixture fatigue.

Recibido: enero 23 de 2007

Aceptado octubre 22 de 2007

<sup>1</sup> Esta investigación hace parte del trabajo al que se le otorgó el "Premio Internacional a la innovación en carreteras, Juan Antonio Fernández Del Campo", otorgado por la Asociación Española de la Carretera el 14 de septiembre de 2006, en Madrid, España.

<sup>2</sup> Ingeniera civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia. M. Sc. , en Infraestructura Vial, Universidad de los Andes. M. Sc. en docencia. Especialista, Geotecnia Vial y Pavimentos. Especialista, Gerencia de Construcciones. Directora, grupo de investigación Indetec, Universidad de La Salle. Consultora en geotecnia vial y pavimentos. [afigueroa@lasalle.edu.co](mailto:afigueroa@lasalle.edu.co)

<sup>3</sup> Ingeniero civil, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. PhD. Director, grupo de investigación Cecata, Pontificia Universidad Javeriana. Doctor en pavimentos, Universidad de Nantes y LCPC, Francia. Consultor en geotecnia y pavimentos. [fredy.reyes@javeriana.edu.co](mailto:fredy.reyes@javeriana.edu.co)

<sup>4</sup> Ingeniera civil. Investigadora, grupo Cecata, Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

<sup>5</sup> Estudiante, Semillero de Investigadores, grupo Indetec, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia.

<sup>6</sup> Estudiante, Semillero de Investigadores, grupo Indetec, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia.

## Introducción

Uno de los problemas con el que permanentemente se enfrentan los ingenieros de pavimentos es la calidad y heterogeneidad del asfalto que se obtiene en las refinerías y que está sujeto a las características de los crudos en cada uno de los pozos encontrados. Es decir, no solo es una limitación de la naturaleza sino también de equipos para poder normalizar todas las características posibles. Es por ello que en la primera etapa de la investigación sobre asfaltos modificados se consideró el uso del poliestireno como un rigidizador del concreto asfáltico para mitigar la deformación por ahuellamiento en lugares donde las altas temperaturas dan lugar a este problema o en lugares de estacionamiento transitorio en los cuales como consecuencia del arribo e inicio de la marcha permanente de los vehículos se acentúan los hundimientos por la misma causa (Figueroa y Reyes, 2005). La innovación en materiales para carreteras a partir del empleo de desechos no biodegradables es una preocupación mundial. Países como España, Francia y Estados Unidos han realizado trabajos con la utilización de llanta, vidrio y polietileno, e incluso se tiene normativa sobre su empleo, la cual se ha obtenido a partir de los resultados de investigación. El trabajo con icopor ha sido el interés de los grupos de investigación Indetec y Cecata, y la primera propuesta y análisis investigativo la presenta Colombia. En esta primera fase de la investigación se dan a conocer los resultados dinámicos de las pruebas con la utilización del poliestireno y las ventajas que representa su utilización en las mezclas asfálticas. En la próxima fase se espera contrastar resultados, hacer curvas maestras, modelación matemática, realizar ensayos a escala real y finalmente introducir en las normas colombianas la utilización de estos desechos para el mejoramiento del concreto asfáltico.

## Generalidades de los asfaltos

Los asfaltos son ligantes que se encuentran de diversas maneras en la naturaleza o se pueden producir por el hombre a partir del proceso de destilación del petróleo en una planta de refinación. En la naturaleza se pueden encontrar en estado puro o con una matriz de agregados pétreos gruesos o finos. Colombia es un país que posee una provisión interesante de asfaltos naturales en los departamentos de Boyacá, Caquetá, Tolima, Meta y Casanare, entre otros.

Aunque algunos de estos asfaltos se han estudiado, aún falta mayor investigación en el tema para aprovechar este recurso natural de nuestro país. Las últimas investigaciones realizadas en Colombia al respecto, tratan de determinar el comportamiento de las mezclas asfálticas con asfaltos naturales en caliente.<sup>7</sup>

Otra posibilidad de obtener asfalto es a partir de la refinación del petróleo. Este es el de mayor utilización en Colombia,

y la entidad que se encuentra a cargo de su explotación y refinación es Ecopetrol.

Los asfaltos están compuestos fundamentalmente por asfaltenos 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 mejor trabajabilidad (Figura 1).

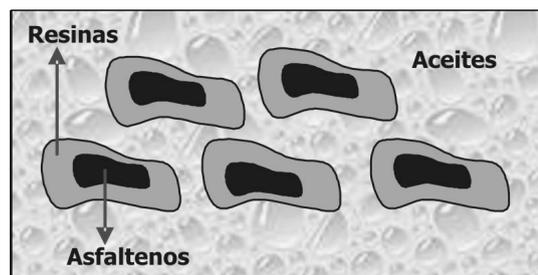


Figura 1. Composición del asfalto

Los asfaltos tienen propiedades ligantes y aglutinantes, compuestos en gran parte por hidrocarburos de consistencia semisólida a temperatura ambiente, pero pueden ser más fluidos en la medida en que se les incrementa la temperatura (Arenas, 2000). En esta investigación se trabajó con asfalto derivado del petróleo o asfalto residual, como se le llama para diferenciarlo de los asfaltos naturales. Uno de los aspectos que dificulta el estudio del comportamiento de los asfaltos es su condición termoplástica, es decir, que al incrementarse la temperatura presenta las características de un flujo *newtoniano*, esto es, la velocidad de desplazamiento es proporcional al esfuerzo de corte aplicado. En este caso la viscosidad es el coeficiente de proporcionalidad a esa temperatura, o sea, es independiente del tiempo de carga aplicado. Así mismo, al disminuir la temperatura se comporta como un flujo *no newtoniano*, o lo que es igual, como un flujo viscoelástico cuando ha sufrido envejecimiento o se ha sometido a baja temperatura (Arenas, 2000). En este caso la viscosidad depende de los cambios que se producen en el esfuerzo aplicado. Esta condición se llama "susceptibilidad al corte" o "índice de corte", el cual aumenta a medida que el asfalto se envejece.

Otros aspectos que se deben controlar son los del comportamiento y la viscosidad del asfalto durante la elaboración de las mezclas asfálticas en caliente, debido a que pueden presentar problemas con la temperatura de mezclado. Se ha de garantizar la viscosidad obtenida en el laboratorio a 135 °C. Una baja viscosidad a altas temperaturas de servicio genera ahuellamiento y una alta viscosidad, a baja temperatura de servicio lo rigidiza y se presentan fisuras.

<sup>7</sup> 4º Congreso Internacional del Asfalto, Cartagena, Colombia, 2004. Ing. David González y otros.

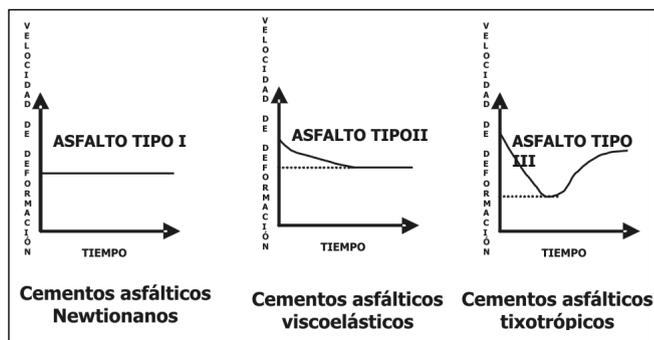


Figura 2. Variación de la velocidad de deformación para diferentes tipos de cemento asfáltico (Velocidad frente a Tiempo) (Arenas, 2000)

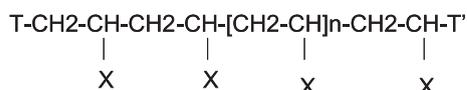
**Polímeros**

**Revisión histórica**

Existen diferentes tipos de polímeros: naturales y artificiales. Algunos de estos materiales son: el almidón, las proteínas, la celulosa, el algodón, las pieles, las fibras sintéticas, los plásticos, los cauchos, las pinturas, los adhesivos, los icoporos, etc. En el año de 1926 Herman Staundinger presentó en una reunión anual de físicos y ambientalistas alemanes sus descubrimientos sobre algunos de estos materiales. Su obtención se inició por la deshidrogenación del caucho natural. Staundinger atribuyó el alto peso molecular de estas sustancias a su constitución por cadenas largas de átomos unidas por enlaces covalentes. A estas pequeñas unidades las designó monómeros, y a la estructura resultante polímero. El mayor desarrollo de los polímeros se llevó a cabo durante la Segunda Guerra Mundial. Fue en este momento cuando se obtuvo el caucho sintético. La vulcanización del caucho natural llevada a cabo en América y Asia, y la realizada para la fabricación de las llantas de los vehículos, eran conocidas en el mundo entero, pero su acceso a Alemania durante la guerra presentaba serias dificultades y fue este el motivo principal para el desarrollo de nuevas tecnologías por parte de los alemanes. Carothers había obtenido en Estados Unidos un caucho sintético a partir del Cloropreno (2-cloro 1,3 butadieno). En 1956 Ziegler y Natta recibieron el premio Nobel de Química por la obtención del polipropileno isotáctico, de altísima comercialización en el mundo actual. Los siguientes años desarrollaron materiales como polietileno, polipropileno, policloruro de vinilo o poliestireno y sus copolímeros (Figuroa y Reyes, 2005).

**Reacciones de polimerización**

Como se dijo anteriormente, la molécula de polímero está conformada por la unión entre enlaces covalentes de moléculas más pequeñas llamadas monómeros. La transformación de monómeros en polímeros se lleva a cabo por medio de la polimerización, y para ello se tienen dos grandes grupos.



**Polimerizaciones de adición a un doble enlace:**

para que esta ocurra se necesita en el monómero un doble enlace C=C, como son los monómeros vinílicos: CH<sub>2</sub>=CHX, siendo x un sustituyente. La molécula obtenida finalmente es:

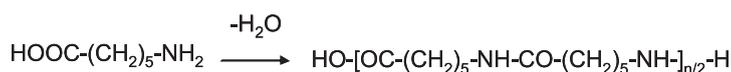
Donde:

T y T': catalizador, iniciador o solvente.

n: número de veces que se repite la unidad a lo largo de la cadena. Corresponde al grado de polimerización y está ligado al peso molecular de la cadena (Arenas, 2000).

**Polimerizaciones por condensación de monómeros multifuncionales:**

constituidos por monómeros capaces de reaccionar entre sí a partir de reacciones de condensación, por ejemplo: grupos de ácido-alcohol. La unión de un diácido y un dialcohol. En la reacción se forma un poliéster más moléculas de agua. La estructura de los dos grupos reaccionantes puede ser: (Ecopectrol, 1999; Caminos y puentes federales, México, 1994):



**Asfaltos modificados**

El uso de asfaltos modificados permite obtener mezclas asfálticas de mayor durabilidad y comportamiento bajo las cargas de tránsito. La tecnología de asfaltos modificados se emplea desde hace varios años en diferentes países del mundo. Algunos de los modificadores empleados comúnmente se muestran a continuación:

Tabla 1. Características generales de los modificadores

Polímero	Características
Termoplásticos	1. Se reblandecen con calor, pueden ser solubles 2. Al enfriarse se dejan moldear sin perder propiedades 3. Polímeros lineales. Forman pequeñas ramificaciones 4. Polietileno, polipropileno, policloruro de vinilo, poliestireno, copolímeros de etileno-acetato de vinilo EVA, poliamidas, etc.
Termoendurecibles	1. Formados por la base y el endurecedor. No se pueden transformar después de deformarse 2. Resinas fenólicas, epoxi, de poliéster, de poliuretano.
Elastómeros o cauchos	1. Polímeros insaturados, amorfos 2. Para conseguir las propiedades elásticas se debe vulcanizar 3. Caucho natural, caucho etileno-propileno, butadieno-estireno (SBR), de policloropreno, elastómeros termo-plásticos de butadieno-estireno (SBS).

Finalmente, al utilizar cualquiera de estos modificadores, se pretende tener una resistencia al envejecimiento, a los efectos del agua y en general a las condiciones climáticas, busca una mejor adherencia con los pétreos, propiedades elásticas, de viscosidad y en general con estas condiciones se alcanzan mezclas con mayor resistencia a la deformación y a la fatiga.

Algunos de los trabajos realizados son los siguientes:

#### **Con hule molido de neumáticos usados**

Las primeras investigaciones se empezaron hacia el año 1965 con la modificación de asfaltos para riegos de liga y en tratamientos superficiales (riego de sello, taponamiento y carpetas delgadas con material de tamaño de 1/4 a 3/8 de pulgada). Esta se llevó a cabo en la costa oeste de los Estados Unidos, en Arizona y California, en tratamientos superficiales de una o varias capas y en carpetas delgadas de dos a cinco centímetros de espesor de tipo de graduación abierta o media. La duración de estos tratamientos fue, en algunos casos, de más de dos veces la de los sistemas tradicionales (Palit et al., 2004).

#### **Látex sintéticos y naturales**

Se utilizaron primero en Europa (Francia y España) en 1970 incorporándolos al asfalto emulsificado para mejorar las características de las emulsiones utilizadas en riegos y en morteros asfálticos y posteriormente en la elaboración de mezclas asfálticas en frío y en caliente con asfaltos modificados (Gallego, 2003).

#### **Polímeros de tipo SBR (Estireno Butadieno Hule) y SBS (Estireno Butadieno Estireno)**

La industria de los impermeabilizantes hace aproximadamente veinte años empleó los SBR y después los SBS para mejorar los asfaltos en proporciones del 6% al 12% con resultados excelentes, siendo mejores los de tipo SBS. Posteriormente se empezó a modificar con polímeros el asfalto para pavimentos, sobre los cuales se observaron algunas ventajas como el cambio de viscosidad y además el comportamiento a temperaturas muy bajas (hasta menos de 40° C) (Oda y Fernández, 2002).

#### **Asfalteno natural "Gilsonita"**

Es un polvo triturado de depósito "minas" que se obtiene a bajas profundidades especialmente en el estado de Utah, de la Unión Americana. Su primer uso fue en impermeabilizantes, posteriormente, en mezclas asfálticas. Este producto tiene el 70% de asfaltenos enriquecidos con resina y aceite (nitrógeno base), pero de unas características físicas y químicas que dan una mayor adhesión a la mezcla, mayor resistencia estructural y durabilidad.

#### **Fibras cortas y escorias de fundición**

Su uso es más antiguo, alrededor de cuarenta años, pero su desarrollo ha sido limitado en virtud de que aun cuando me-

jora en algunos casos la capacidad estructural de las mezclas, no lo hace sobre su comportamiento a largo plazo y puede tener reacciones perjudiciales con ciertos materiales.

#### **Cal hidratada y azufre**

Son modificadores de mezclas asfálticas y se han utilizado con buenos resultados en materiales cuarzosos, mejorando su capacidad estructural y adherencia, pero con los inconvenientes de mezclado y contaminación (Montejo, 1998).

#### **Modificadores catalíticos**

Este sistema de origen europeo tiende a orientar las moléculas del asfalto cuando este entra en contacto con el material pétreo, se ha utilizado con frecuencia en algunos países del norte de Europa y el sureste de Asia con buenos resultados sin haber logrado entrar al mercado norteamericano, razón por la cual se tiene poca experiencia y se concentra en un trabajo de laboratorio de la UNAM. Sin embargo, los resultados de laboratorio son alentadores, y si esto se refleja en la práctica, puede ser de mucha utilidad.

### **Comportamiento observado en el estudio experimental**

#### **Materiales y métodos**

La investigación fue de tipo experimental y consistió en elaborar una mezcla asfáltica cuyo ligante fue un asfalto modificado con poliestireno obtenido de la trituración de los vasos desechables. Se determinaron las condiciones de estabilidad, fatiga y comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica tipo MDC-2 modificada con poliestireno bajo una carga de tránsito alta en comparación con una mezcla de la misma referencia pero de tipo convencional. Para el diseño de la mezcla asfáltica se requirió la caracterización de los materiales pétreos y asfálticos que la componen, a partir de los diversos ensayos de laboratorio.

Se tomaron como referencia las especificaciones y normas para ensayos de carreteras del Instituto Nacional de Vías y ASTM, que son las de mayor utilización en Colombia. La norma de referencia para el ensayo de fatiga fue la francesa, empleada en el LCPC. Posteriormente se realizó la caracterización del asfalto proveniente de la refinería de Barrancabermeja. El estudio del icopor se tomó básicamente de los innumerables trabajos que se han llevado a cabo con el mismo, según la Norma Técnica colombiana NTC 1524.

Para realizar la modificación del asfalto fue necesario triturar los vasos de icopor y realizar varias pruebas para obtener la gradación óptima de disolución en el asfalto. Finalmente, el material con el que se obtuvo el mejor resultado fue el pasatamiz N° 4. Uno de los mayores inconvenientes consistió en lograr la mezcla de estos dos materiales, para lo cual fue necesario trabajar a diferentes temperaturas y efectuar pruebas de incorporación hasta obtener la temperatura y comportamiento adecuados del material.

La elaboración de las mezclas asfálticas para determinar los porcentajes óptimos de asfalto y poliestireno, y todas las pruebas estáticas al respecto, se realizaron en el laboratorio de la Universidad de La Salle, y las pruebas dinámicas, en la Pontificia Universidad Javeriana.

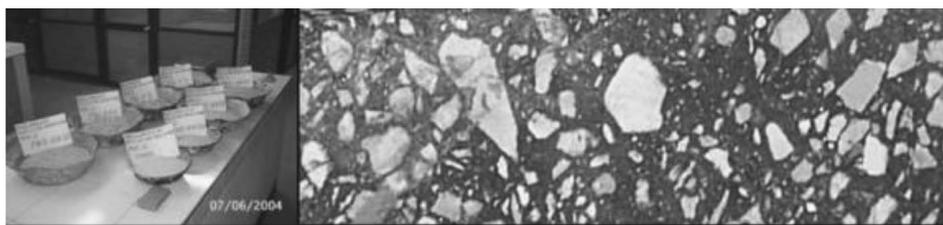


Figura 4. Granulometría de mezcla MDC-2

**Descripción y características del material utilizado**

**Caracterización del material granular**

Se empleó material granular para una mezcla asfáltica tipo MDC-2 según normativa Invías, Figura y Tabla 1. En la Tabla 2 se muestran los resultados de los ensayos realizados a los agregados en la Universidad de La Salle.

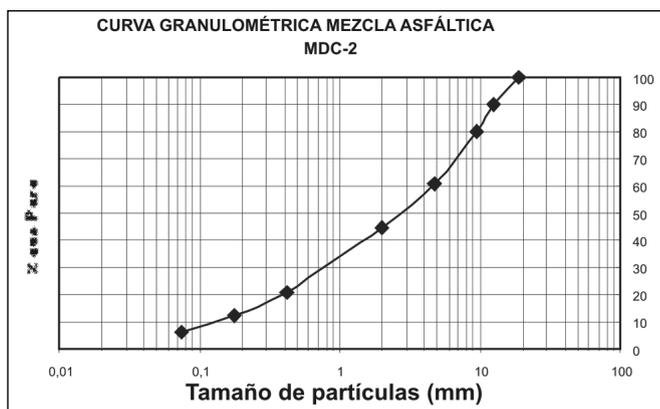


Figura 3. Curva granulométrica de mezcla MDC-2

Tabla 2. Granulometría mezcla MDC-2

Tamiz	% Retenido	% Pasa
1/2	90	10
3/8	80	10
Nº. 4	61	19
Nº. 10	45	16
Nº. 40	21	24
Nº. 80	12	9
Nº. 200	6.5	5.5
Fondo	5.5	

Tabla 3. Caracterización del material granular

Ensayo	Valor obtenido	Especificación	Valor Norma
Peso específico del agregado pétreo (g/cm³)	2.511	INV 221 INV 222	
Desgaste en la máquina de Los Ángeles en máx %	28	INV 218 INV 219	30
Índice de alargamiento en máx %	18.2	INV 230	35
Índice de aplanamiento en máx %	31.2	INV 230	35
Caras fracturadas min %	90	INV 227	75
Equivalente de arena min %	74	INV 133	50

**Caracterización del asfalto**

En el laboratorio de la Universidad de La Salle se realizaron los ensayos para caracterizar el asfalto.

Tabla 4. Caracterización del asfalto

Ensayo	Valor obtenido	Especificación	Valor Norma
Penetración 100g, 5 s a 25 °C (0.1 mm)	81	ASTM D70	80-100
Ductilidad a 25°C (cm)	+100	ASTM D118	Min 100
Peso específico a 25°C (g/cm³)	1.012	ASTM D70	
Viscosidad cinemática, 135°C (cSt)	303.01	ASTM D5	
Punto de ignición (°C)	185	ASTM D92	
Punto de llama (°C)	220	ASTM D92	
Punto de ablandamiento anillo y bola (°C)	45.20	ASTM D 36	

**Caracterización del poliestireno**

La caracterización del poliestireno, de acuerdo a la norma NTC 1524, se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Ensayos de caracterización del poliestireno

Ensayo	Valor
Temperatura de ablandamiento Vicat mínima (°C)	88.5
Índice de flujo en fusión mínimo (g/10 min)	10
Viscosidad de la disolución al 10% en tolueno mínima (cP)	17.6
Contenido máximo de estireno monómero residual (%)	0.2



Figura 5. Poliestireno utilizado, triturado de vasos desechables

**Caracterización del asfalto modificado con poliestireno**

Se realizaron los ensayos mostrados en la Tabla 5 para caracterizar el asfalto modificado con poliestireno.

Tabla 6. Caracterización del asfalto modificado con poliestireno

Ensayo	Valor obtenido
Penetración 100g, 5 s a 25 °C (0.1 mm)	70
Ductilidad a 25°C (cm)	+37
Peso específico a 25°C (g/cm <sup>3</sup> )	1.2
Punto de ignición (°C)	180°C
Punto de llama (°C)	220°C
Viscosidad cinemática, 135°C (cp) Brookfield	296
Viscosidad Brookfield, 135°C (cP)	326.7



Figura 6. Incorporación del poliestireno en el asfalto

### Preparación de las muestras

#### Diseño Marshall

El diseño Marshall consiste en la determinación del contenido óptimo de asfalto que se debe adicionar a una mezcla asfáltica en caliente cuyos agregados no pueden superar los 25 mm de tamaño y debe cumplir con unas propiedades de resistencia y durabilidad de acuerdo con el tráfico vehicular y el periodo de diseño del pavimento.

Este se realizó para tránsito alto. Para la mezcla sin modificar se fabricaron veintiún (21) probetas con contenido de asfalto entre 4% y 6.5%, e incrementos de 0.5%. Se obtuvo un porcentaje óptimo de asfalto del 6%. Para la mezcla con asfalto modificado con poliestireno se realizaron nueve (9) probetas. Es importante anotar que el poliestireno se adicionó por vía húmeda en proporciones de 0.5%, 1.0% y 1.5%. El resultado óptimo fue del 1%.

Al trabajar las probetas de la mezcla modificada se presentaron inconvenientes relacionados con la integración entre el asfalto y el poliestireno, debido a la poca solubilidad que este último presenta. Para mejorar este proceso se tamizó el poliestireno y se seleccionó el que pasaba el tamiz N° 4. Otro aspecto importante fue el control de la temperatura durante el ensayo, la mejor disolución se encontró a 135°C. A continuación se presenta la comparación de los ensayos realizados a las mezclas asfálticas con y sin adición de poliestireno.

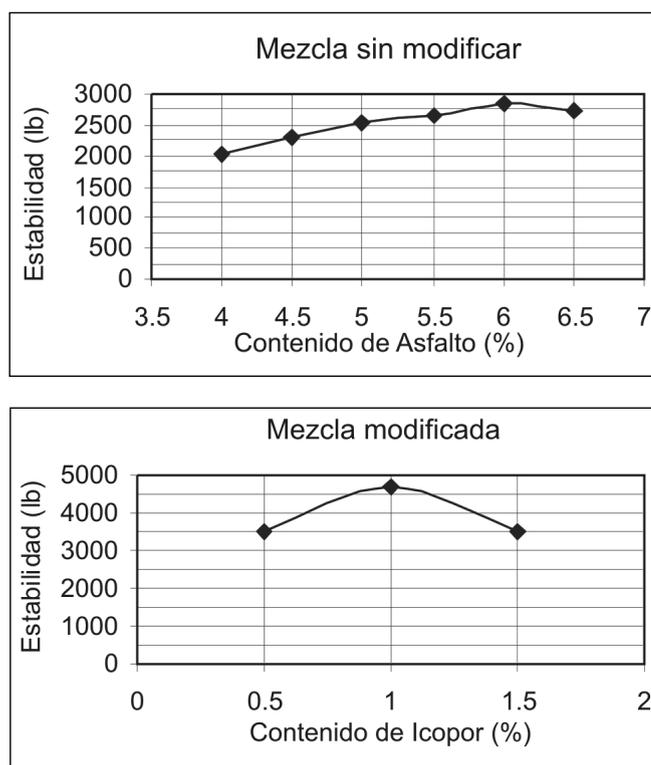


Figura 7. Estabilidad para la mezcla MDC-2 sin modificar y modificada

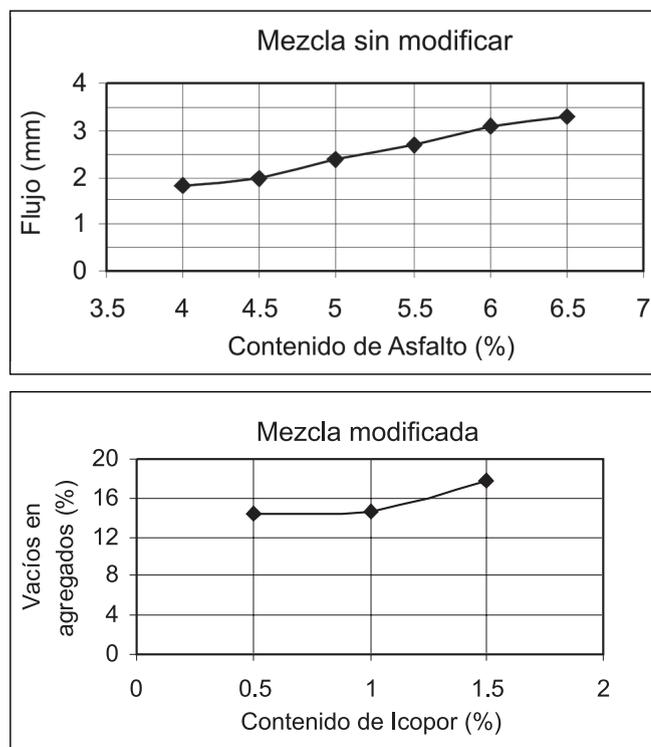


Figura 8. Flujo para la mezcla MDC-2 sin modificar y modificada

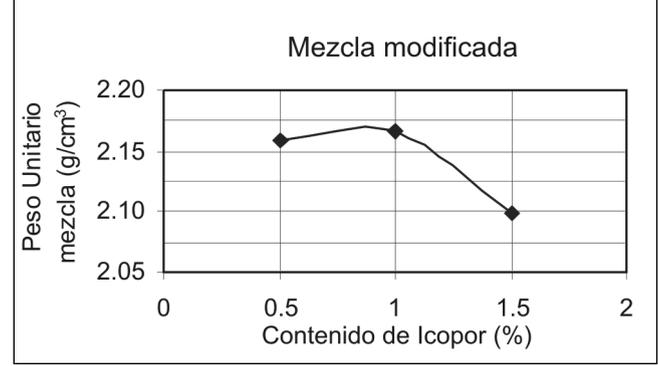
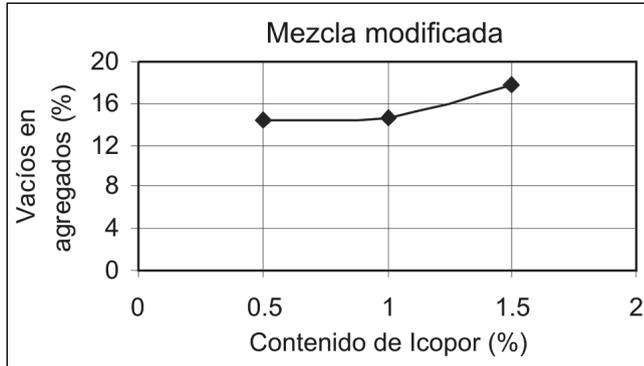
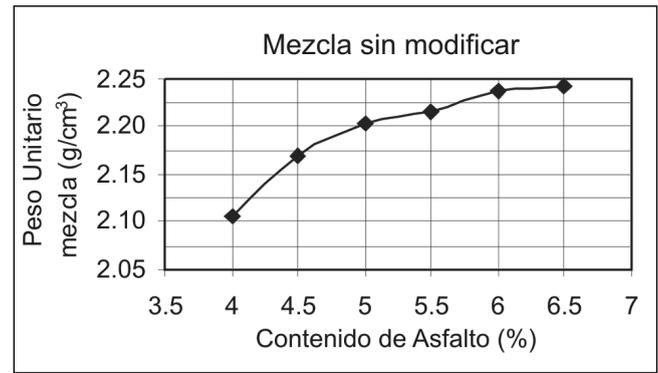
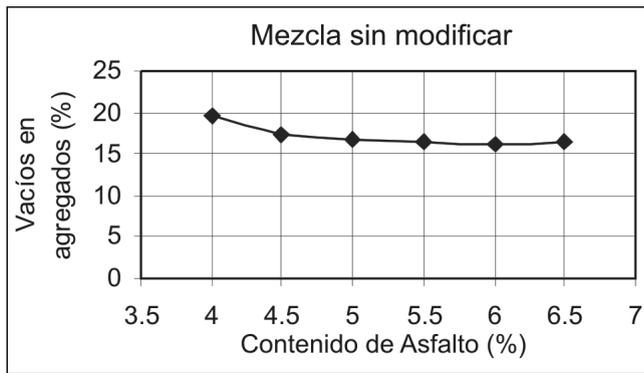


Figura 9. Vacíos en agregados para mezcla MDC-2 sin modificar y modificada

Figura 11. Peso unitario de la mezcla MDC-2 sin modificar y modificada

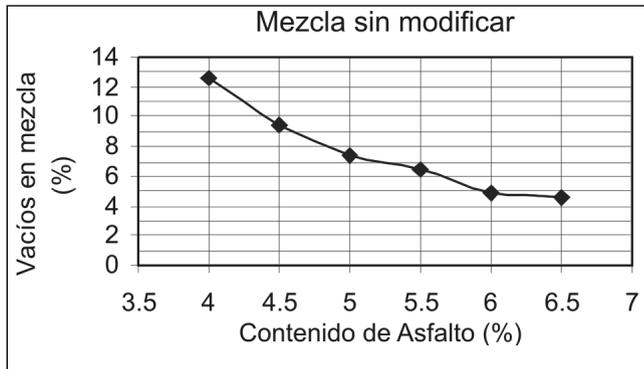


Tabla 7. Comparación de los resultados obtenidos en las mezclas asfálticas modificadas y sin modificar

Ensayo	Valor obtenido mezcla sin modificar	Valor obtenido mezcla modificada	Rango de comportamiento óptimo Norma Inviás
Estabilidad mínima (lb)	2900	4900	1650
Flujo (mm)	3.2	3.3	2 - 3.5
Vacíos en la mezcla	4.9	12.5	4 - 6%
Vacíos en agregados	15.2	14.8	Min. 15%
Peso Unitario (g/cm³)	2.240	2.168	

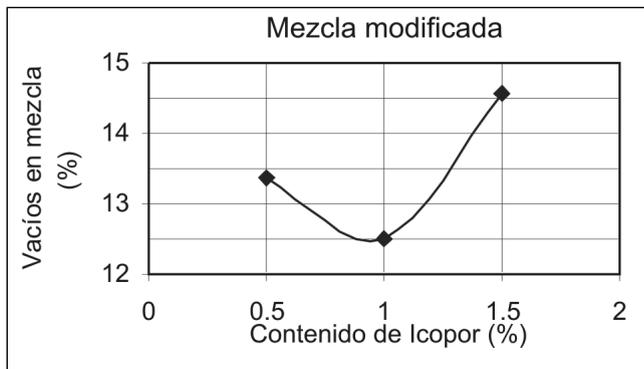


Figura 10. Vacíos en la mezcla MDC-2 sin modificar y modificada

**Ensayo de fatiga**

La fatiga de las mezclas asfálticas se manifiesta como el daño o deterioro debido a la repetición de solicitaciones de los vehículos en un periodo determinado. Finalmente el aspecto de mayor relevancia consiste en determinar el número de ciclos que soporta la estructura antes de fracturarse (Reyes Ortiz, 1997; Cuellar, 2003).

La evaluación de la vida útil o remanente de una mezcla asfáltica se puede analizar de acuerdo con los siguientes criterios:

- Con base en la deformación plástica.
- Con base en los esfuerzos (criterio de esfuerzo-vida adecuado para los casos en que los esfuerzos son bajos y los ciclos son numerosos)
- Con base en la deformación total (criterio de deformación-vida)

La fatiga de una mezcla asfáltica se determina cuando esta falla por ruptura, bajo el efecto de las cargas repetidas e iguales que se le aplican. Este ensayo se basó en la norma francesa NF P 98-261-1, el cual se fundamenta en la aplicación de una deformación sinusoidal  $Z = Z_0 \sin(\omega t)$  en la parte superior de una probeta de forma trapezoidal, que está empotrada en su base. En los bancos de fatiga de la Universidad Javeriana se llevaron a cabo los ensayos de fatiga con deformación controlada de  $90 \times 10^{-6}$ ,  $150 \times 10^{-6}$  y  $220 \times 10^{-6}$  m a una frecuencia de 10 Hz y temperaturas de 20, 25 y 30 °C (Lundtrot et al., 2004).



Figura 12. Briqueza trapezoidal en banco y fallada. Banco de fatiga, Universidad Javeriana

### Ensayo de ahuellamiento

El ensayo se realizó en la máquina ahuelladora de la Universidad Javeriana, la cual está basada en la metodología del Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, y el procedimiento de ensayo está determinado en la Norma Francesa NF P 98-253-1. El ensayo se realizó a 42 r.p.m, en donde el paso de una llanta con 0.662 MPa de presión y peso por eje de 13 toneladas produce deformaciones permanentes en una muestra de  $10 \times 16 \times 50$  cm. La temperatura de ensayo fue de 60 °C, considerada como la temperatura de la mezcla en servicio. Se tomaron las lecturas de deformación permanente producidas por el paso de la llanta en determinados números de ciclos. Para cada una de las dos probetas sin modificar se hizo el ensayo hasta 6700 y 3500 ciclos respectivamente, mientras que para la mezcla modificada se llevaron hasta 5000 y 7500 ciclos, respectivamente.

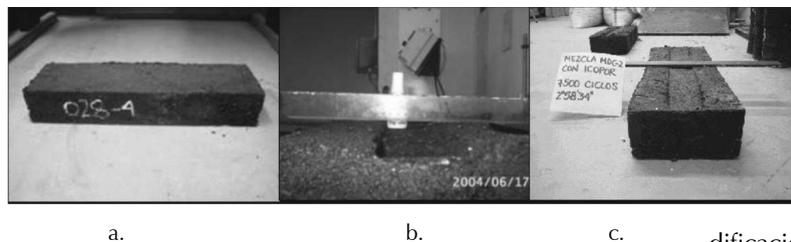


Figura 13. a. Briqueza para ahuellamiento antes del ensayo, b. Briqueza sin modificar ahuellada, y c. Briqueza modificada ahuellada

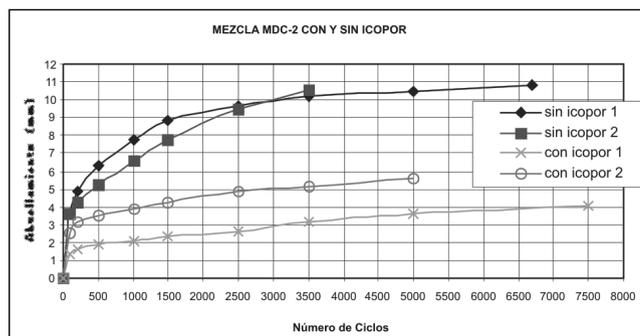


Figura 14. Comparación de ahuellamiento para la mezcla con y sin adiciones de poliestireno

### Ensayo de módulo dinámico

Los ensayos de módulo dinámico se llevaron a cabo en el Nottingham Asphalt Tester (NAT) por el método de deformación controlada, siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D 4123. Para este ensayo se fabricaron tres briquetas de mezcla asfáltica sin modificar y tres briquetas con asfalto modificado. Las temperaturas de ensayo fueron 15, 20 y 30 °C, y las frecuencias, 2.5, 5 y 10 Hz.

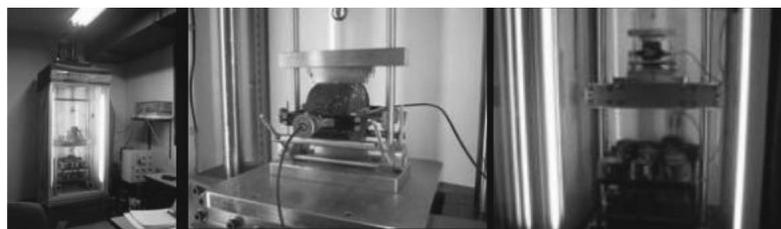


Figura 15. Ensayo de módulo dinámico. Laboratorio Pontificia Universidad Javeriana

### Discusión y conclusiones

La ductilidad en la mezcla modificada con poliestireno disminuyó en un 63% debido a la rigidez que le proporciona el modificador a la mezcla. Esta característica adquirida indica una menor susceptibilidad térmica del asfalto.

En el diseño Marshall se observa un aumento en la estabilidad de la mezcla modificada con poliestireno respecto a la convencional. Este resultado es interesante siempre y cuando se controle la fatiga de la mezcla asfáltica modificada. Por otra parte, el flujo no tiene un cambio significativo, condición que favorece su empleo en climas cálidos.

El peso unitario disminuyó en la mezcla modificada de tal manera que para una mayor estabilidad se tiene una mezcla más liviana. Debido a la modificación, los vacíos aumentaron; este espacio adicional permite la reacomodación de partículas dentro de la mezcla al ser sometidas a las solicitaciones y a altas temperaturas.

En el ensayo de módulo dinámico se observó que los valores del módulo de la mezcla modificada son mayores que los de la mezcla sin modificar en todas las temperaturas y frecuencias. En la tabla 8 se presenta la variación porcentual para las mezclas modificadas y sin modificar. La variación porcentual de los módulos alcanza hasta un 51%, para la temperatura más alta.

Tabla 8. Valores de módulos para 15, 20 y 30 °C.

Temperatura (°C)	15			20			30		
Frecuencia	2.5	5	10	2.5	5	10	2.5	5	10
Tipo de mezcla	Módulo (MPa)								
Mezcla sin modificar	6121	7328	8705	3609	4761	5783	921	1219	1692
Mezcla modificada	7417	10250	9625	4982	5644	7384	1389	1814	2407
Variación porcentual	21%	40%	11%	38%	19%	28%	51%	49%	42%

En la Figura 16 se observa que los mayores valores de módulo corresponden a la temperatura de 15°C.

Del comportamiento del módulo dinámico para los dos tipos de mezcla se observa que para las diferentes temperaturas hay un incremento de este último a medida que aumenta la frecuencia, con excepción de la mezcla modificada a 15°C, en la cual se observa una disminución a 10 Hz, y para una misma frecuencia se presenta incremento en el módulo dinámico a medida que disminuye la temperatura de ensayo. Estas variaciones se deben considerar para el diseño de la estructura utilizando el promedio de los módulos, debido a la variación que en un mismo día experimenta la mezcla asfáltica por los cambios de temperatura.

En la figura 16 se presenta la comparación de los módulos entre los dos tipos de mezcla a diferentes temperaturas.

Se observa que el mayor módulo se presenta para 15°C y para la mezcla modificada con poliestireno.

El que una mezcla asfáltica presente un alto módulo mitiga considerablemente las deformaciones por efecto de las cargas.

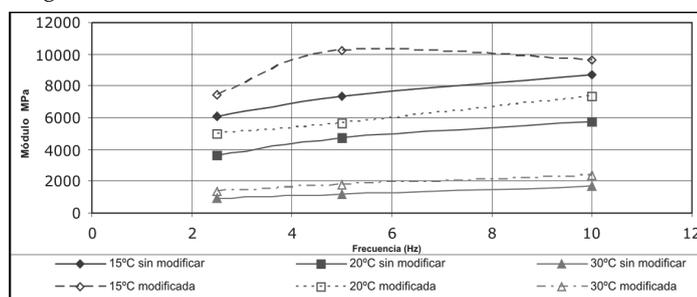


Figura 16. Valores de módulos para la mezcla MDC-2 modificada y sin modificar

En las gráficas que se presentan a continuación se observan los valores de módulo dinámico en todas las frecuencias de ensayo para cada una de las temperaturas de ensayo y para los dos tipos de mezcla asfáltica.

En cuanto al comportamiento por fatiga se observa en la tabla 9 y en la figura 19, la mezcla sin adición de poliestireno presenta un mejor comportamiento a la fatiga, ya que resiste mayor número de ciclos para un mismo nivel de deformación con respecto a la mezcla modificada. A medida que aumenta la temperatura la deformación disminuye para un mismo número de ciclos en la mezcla modificada y sin modificar. Este resultado de fatiga no se esperaba en los resultados, y una manera de mejorarlo es adicionar un material como caucho para tener una mejor respuesta a la fatiga.

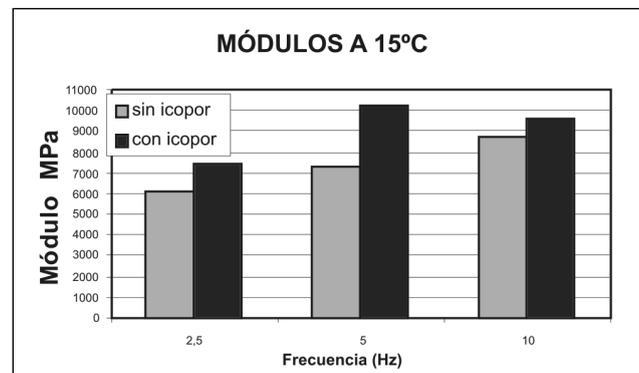


Figura 16. Valores de módulo para mezcla con y sin adición de poliestireno a 15 °C.

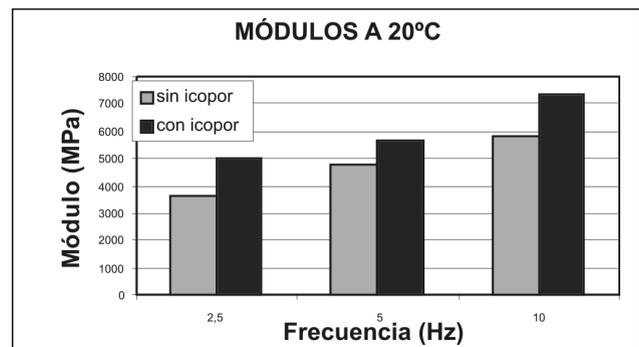


Figura 17. Valores de módulo para mezcla con y sin adición de poliestireno a 20 °C.

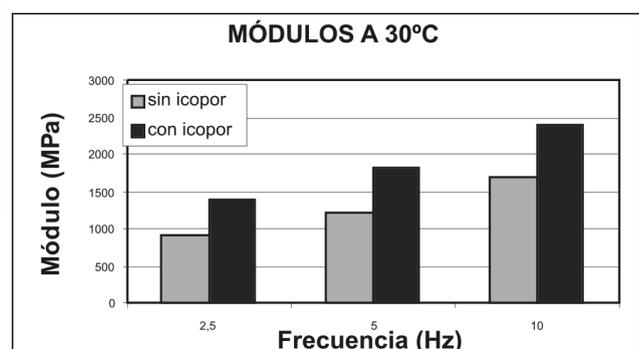


Figura 18. Valores de módulo para mezcla con y sin adición de poliestireno a 30 °C.

Tabla 9. Leyes de fatiga para las mezclas asfálticas MDC-2 con y sin adiciones de poliestireno

Temperatura de ensayo	20°C		30°C	
Factor	$\epsilon_a$	b	$\epsilon_a$	b
Mezcla sin modificar ( $\times 10^{-6}$ m)	419	-0.442	497.3	-0.229
Mezcla modificada ( $\times 10^{-6}$ m)	188	-0.263	175	-0.213

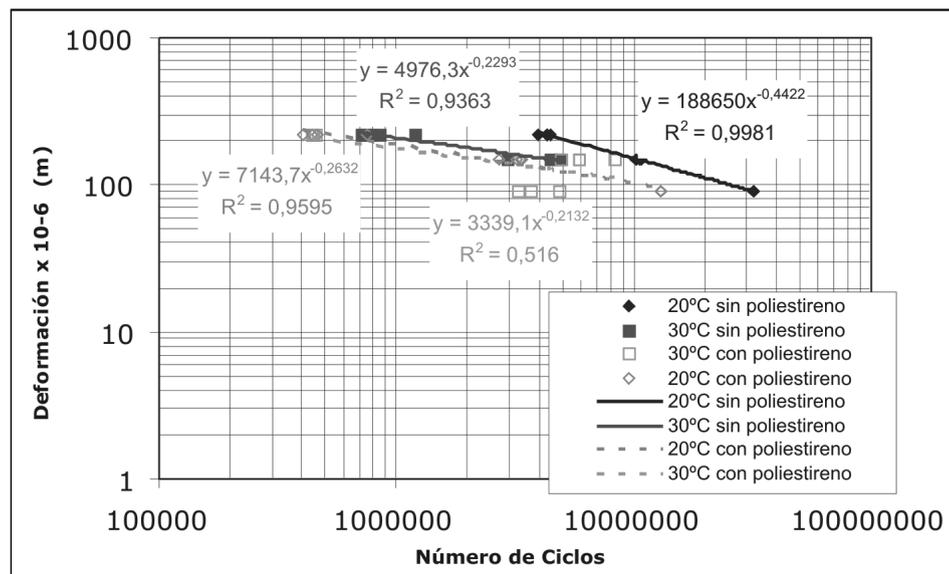


Figura 19. Ley de Fatiga para la mezcla MDC-2 con y sin adiciones de poliestireno

Respecto a la deformación plástica, la mezcla modificada con poliestireno presentó menor ahuellamiento que la mezcla sin modificar, tal como se observa en la figura 19. Las probetas de mezcla sin modificar alcanzaron ahuellamientos de 10.9 y 10.6 mm, en tanto que en las probetas con poliestireno los ahuellamientos fueron de 5.6 y 4.1 mm.

Si se comparan los valores de deformación permanente a 3500 ciclos, para la mezcla sin modificar son 10.2 y 10.6 mm y para la mezcla modificada son 5.1 y 3.1 mm. Por lo tanto se obtiene una disminución hasta del 70% en el ahuellamiento para la mezcla modificada con poliestireno.

## Conclusiones

Uno de los mayores inconvenientes fue lograr la integración perfecta entre el asfalto y el icopor aunque se trabajó con icopor triturado que pasó tamiz N° 4 para facilitar su manejo. El control de la temperatura durante el ensayo es fundamental para obtener un buen resultado, pues a mayor temperatura y poca disolución el icopor se vitrifica y esto obstaculiza completamente el proceso.

La estabilidad Marshall obtenida en la mezcla modificada con icopor fue superior a la mezcla convencional y el flujo se conserva casi igual, eso permite suponer que estas mezclas obtienen un nivel de rigidez importante favoreciendo su uso en climas cálidos.

El peso unitario se disminuyó en la mezcla modificada de tal manera que para una mayor estabilidad se tiene una mezcla

más liviana, condición que amortigua las cargas transmitidas al suelo pero favorece la disipación de esfuerzos generados por las cargas de tránsito.

En el ensayo de ahuellamiento se obtuvieron menores deformaciones permanentes para la mezcla con adición de poliestireno. Este mejoramiento es mayor al 50%.

Para cada una de las temperaturas de ensayo en módulo dinámico se tiene un incremento de valor del módulo a medida que se incrementa la frecuencia del ensayo. A mayor frecuencia se tiene, mayores valores de módulo, excepto para la mezcla modificada a 15 °C y 10 Hz de frecuencia.

La mezcla modificada con poliestireno presenta un mejor comportamiento en el ensayo de módulo dinámico, pues se obtienen mayores valores de este. Para todas las temperaturas de ensayo se observó un incremento desde 11% hasta

51%. Se recomienda trabajar con el promedio de los módulos obtenidos.

En cuanto a la fatiga del material, se recomienda realizar un número de pruebas en el NAT con el ánimo de comparar resultados y de acuerdo a esto tomar una decisión de adición polimérica o no. Si bien la respuesta no es crítica, este aspecto se puede mejorar en la mezcla modificada con poliestireno.

El desarrollo del proyecto queda abierto para complementar por otros métodos su eficacia, el mejoramiento a la fatiga y finalmente la obtención de un diseño estructural técnicamente viable pero más económico.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la planta de agregados Patria S.A, a la ingeniera Diana Montaña y al ingeniero Juan Carlos Salazar, quienes han contribuido permanentemente con la investigación. Al grupo de laboratoristas de la Pontificia Universidad Javeriana, de la Universidad de La Salle, y a los estudiantes que en algún momento estuvieron vinculados a esta investigación.

## Bibliografía

Arenas, H. L., Tecnología del cemento asfáltico., Fundación para Actividades de Investigación y Desarrollo, Calí, 2000.

Cuellar, A., Estudio comparativo de las leyes de fatiga de una mezcla cerrada 0/10 con y sin adiciones de icopor., Trabajo de Grado, Universidad Javeriana, Colombia, 2003.

Desarrollo de tecnologías para el uso de asfaltos y mezclas asfálticas modificadas., Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicio Conexos, México, 1994.

Ecopetrol., Cartilla Práctica para el manejo de los Asfaltos Colombianos., Instituto Colombiano del Petróleo, 1999.

Figuerola, Reyes., Asfaltos modificados con Poliestireno., Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia, 2005.

Gallego Medina, D. J., Mezclas bituminosas con betunes de alto contenido en caucho de neumáticos: una elección por las altas prestaciones., Universidad Politécnica De Madrid, Madrid, 2003.

Montejo Fonseca, A., Ingeniería de pavimentos para carreteras., Bogotá : Impreandes, 1998.

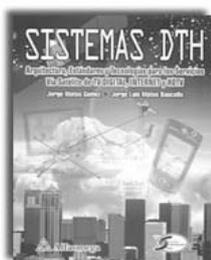
Oda., S. y Fernandes J. J. L., Viabilidad Técnica de Usar Caucho de Neumático como Material de Pavimentación Asfáltica., Universidad Estadual de Maringá, Brasil, 2002.

Palit, S. K., Sudhakar Reddy, T. K. y Pandey, B.B., Laboratory Evaluation of Crumb Rubber Modified Asphalt Mixes., Journal of Civil Engineering, January/February, 2004.

Reyes Ortiz, O., Mejoramiento de las propiedades mecánicas de una capa de asfalto con desperdicios plásticos., Bogotá, 1997.

Lundtstrom, R., Di Benedetto, H., Isacsson, U., Influence of Asphalt Mixture Stiffness on Fatigue Failure., Journal of Material in Civil Engineering, November/December, 2004.

## **novedades** **Alfaomega Colombiana S.A.**



### **SISTEMAS DTH**

Matos Gómez, Jorge ;  
Matos Baucells Jorge Luis  
356 págs ilustr.  
Rústica 17 X 23 cm  
ISBN 978-970-15-1277-7  
Coedición: Alfaomega -  
Creaciones Copyright

DTH (direct-to-home) son transmisiones directas al público desde satélites geoestacionarios, logrando la convergencia de medios a partir de un único soporte. Así, en la actualidad, los sistemas DTH son capaces de distribuir, además de TV, Internet y los nuevos servicios de TV de Alta Definición (HDTV), DTH puede cubrir grandes áreas, como aquellas donde la infraestructura de los operadores de TV por cable es débil y la televisión tradicional no está presente, un claro ejemplo de las zonas montañosas ó rurales., Ejemplo: "Sky".

Adquiera nuestros textos en el punto de venta **Alfaomega Carrera 15 No 64a - 29** o en las principales librerías del país.

Afiliarse a nuestro **CLUB DEL CONOCIMIENTO** a través de nuestra página web, y reciba descuentos en nuestro punto de venta, contenidos actualizados vía Internet, información de novedades, prioridad en productos promocionales y entregas a domicilio sin costo adicional.

Visite nuestra página Web:  
**[www.alfaomega.com.co](http://www.alfaomega.com.co)**