

Artículo de Investigación

Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD

Evaluation of rheological and thermic properties of neat and modified asphalt with a waste of LDPE

William Andrés Castro López¹, Hugo Alexander Rondón Quintana¹,
Juan Carlos Barrero Calixto²

¹Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, wcastrol@udistrital.edu.co, harondonq@udistrital.edu.co, ²Universidad Católica de Colombia, Departamento de Ciencias Básicas, jcbarrero@ucatolica.edu.co

Received: 25/03/2015. Modified: 30/09/2015. Accepted: 29/10/2015

Resumen

Contexto: La tecnología de los asfaltos y las mezclas asfálticas modificadas ha sido una técnica ampliamente estudiada y utilizada en el mundo. Con la adición de polímeros al asfalto se modifican las propiedades mecánicas, químicas y reológicas de las mezclas asfálticas para intentar mejorar su comportamiento cuando son sometidas a diferentes condiciones de carga y del medio ambiente. Se reporta el resultado de un estudio de caracterización reológica y térmica ejecutado sobre un cemento asfáltico CA 60-70 convencional y uno modificado con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD).

Método: La modificación del asfalto se realizó por vía húmeda en una proporción de PEBD/CA=5% con respecto a la masa. Para tal fin, ensayos de reología usando un reómetro dinámico de corte (DSR), y técnicas de Termogravimetría (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) fueron ejecutados sobre ambos asfaltos.

Resultados y Conclusiones: El asfalto modificado con PEBD desarrolla un incremento notable en la rigidez y mejoramiento del grado de funcionamiento del asfalto a altas temperaturas. Adicionalmente, el asfalto modificado es más resistente a la oxidación y al envejecimiento por aumento de temperatura. Sin embargo, experimenta disminución de la resistencia al agrietamiento, bajo temperaturas bajas e intermedias de servicio.

Palabras clave: Calorimetría Diferencial de Barrido, cemento asfáltico modificado, envejecimiento, PEBD, temperatura, Termogravimetría.

Abstract

Context: The asphalt technology and modified asphalt mixtures has been widely used and studied, worldwide. Adding polymers to asphalt modifies mechanical, chemical and rheological properties, trying to improve behavior of the mixtures subjected to different environmental and load conditions. The paper report results from rheological and thermal characterization on conventional 60-70 asphalt cement and 60-70 asphalt cement modified by introducing a waste of low density polyethylene (LDPE).

Method: Modification of the asphalt was performed by wet way in a proportion of LDPE/CA=5% with respect to the mass. Rheological (using DSR), Thermogravimetry (TGA) and Differential Scanning Calorimetry (DSC) techniques were performed.

Results and Conclusions: The modified asphalt develops a remarkable increase in stiffness and improvement of the performance grade at high temperatures of service. Additionally, the modified asphalt is more resistant to oxidation and aging processes due to heat. However, the asphalt modified showed a decrease in crack resistance at low and intermediate temperatures of service.

Keywords: Differential Scanning Calorimetry, LDPE, modified asphalt, rheology, temperature, Thermogravimetry.

Open access



Citación: Castro, W. A., Rondón, H. A. y Barrero, J. C. (2016). Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD. En: Ingeniería, Vol. 21, No. 1, pp. 7-18
© los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2016.1.a01>

1. Introducción

Con la adición de polímeros u otros aditivos al asfalto, se intentan modificar sus propiedades físico-mecánicas, químicas y reológicas. La idea de emplear asfaltos modificados tiene como propósito mejorar la respuesta que experimentan las mezclas que los utilizan, cuando son sometidas a diferentes condiciones de carga (monotónica y cíclica) y del medio ambiente [1]. El uso de esta tecnología es también frecuente cuando es necesario que la superficie de la carretera posea una vida útil más larga de lo normal, o en aplicaciones especializadas que permiten espesores más delgados de capas asfálticas o disminuir dichos espesores [2].

Los polímeros se pueden clasificar en dos grandes grupos: termoendurecibles y termoplásticos. Los primeros no se utilizan para modificar asfaltos, pues son materiales que a altas temperaturas se descomponen o degradan totalmente sus propiedades. Los termoplásticos, por el contrario, son los utilizados para modificar asfaltos, ya que pueden ser sometidos a altas temperaturas sin que se degraden demasiado sus propiedades. Los termoplásticos a su vez se subdividen en dos clasificaciones: elastómeros y plastómeros. Los tipos de elastómeros más utilizados para modificar asfaltos son los cauchos naturales como el estireno-butadieno-estireno (SBS, por sus siglas en inglés), cauchos sintéticos derivados del petróleo (estireno-butadieno-caucho, SBR) y el grano de llanta reciclado y triturado (GCR). Dentro de la gama de los plastómeros se encuentran, entre otros: el polietileno de alta y baja densidad (PEAD y PEBD, respectivamente), polipropileno (PP), poliestireno (PS) y policloruro de vinilo (PVC). Los elastómeros experimentan bajo carga una recuperación importante en la deformación. Este tipo de polímero al ser agregados al asfalto mejora principalmente el comportamiento resiliente (recuperación elástica) de las mezclas cuando son solicitadas a ciclos de carga y descarga [3-5]. Cuando las mezclas se modifican con aditivos plastoméricos se obtiene un incremento en la resistencia mecánica de las mezclas, debido a que el asfalto se vuelve rígido [6-12]. Otros aditivos recientemente investigados para modificar asfaltos son el almidón y las nanopartículas [13-14] y nanoarcillas [15-18].

En el presente estudio se reportan los resultados de una fase experimental tendiente a evaluar la respuesta reológica y térmica que experimenta un cemento asfáltico CA 60-70 convencional y uno modificado con polietileno de baja densidad (PEBD). Para tal fin, ensayos de caracterización, reología empleando un reómetro dinámico de corte (DSR, por sus siglas en inglés), Termogravimetría (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en inglés) fueron ejecutados. Empleando el DSR se determinó el grado de funcionamiento (PG, por sus siglas en inglés) del asfalto convencional y el modificado con PEBD a altas e intermedias temperaturas de servicio, cuando dichos asfaltos son sometidos a procesos de envejecimiento a corto y largo plazo. A través del TGA se midió la pérdida de masa de los asfaltos en función de la temperatura con atmósfera inerte. A través del DSC se caracterizó el cambio de comportamiento dúctil-frágil que experimentaron los asfaltos a través de la determinación de la temperatura de transición vítrea-T_g. El CA 60-70 fue escogido teniendo en cuenta que es el que más se produce y utiliza en Colombia para la fabricación de mezclas asfálticas. Dicho asfalto se modificó, con el fin de evaluar la respuesta que experimenta el ligante cuando se modifica con un desecho plastomérico, que ha reportado amplios beneficios cuando se utiliza como modificador de asfaltos y mezclas asfálticas [19]. El PEBD se escogió debido principalmente a que: i) es un material de alta resistencia térmica y química; ii) de acuerdo con [20], en Bogotá D.C. diariamente se producen alrededor de 600 toneladas de basuras de las cuales el 10% aproximadamente son plásticos y el consumo *per capita* de estos materiales en Colombia es de 11.3 kg anuales. De este 10% gran parte proviene de desechos de PEBD,

que puede ser utilizado para modificar las propiedades de mezclas asfálticas y así disminuir el impacto ambiental negativo que generan.

El ensayo de reología con DSR es utilizado para evaluar el comportamiento visco-elástico que experimenta el CA a intermedias y altas temperaturas de servicio. El procedimiento de ensayo puede ser consultado en AASHTO T 315-05. En el DSR se miden dos parámetros fundamentales: el módulo complejo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ). G^* puede ser considerado como la resistencia del CA a deformarse por esfuerzos de corte repetidos, mientras que δ es el desfase entre el esfuerzo cortante aplicado y la deformación de corte resultante durante el ensayo. Entre mayor sea δ , el material es más viscoso. Un material que experimente un comportamiento totalmente elástico experimenta un $\delta=0^\circ$, mientras que uno puramente viscoso presenta $\delta=90^\circ$. G^* y δ son utilizados para intentar predecir la resistencia al ahuellamiento y al agrietamiento por fatiga. Con el fin de evitar ahuellamiento en una mezcla asfáltica, el ligante asfáltico debe ser lo suficientemente rígido (bajo corte) y elástico, por lo tanto, la relación $G^*/\sin\delta$ debe ser grande. $G^*/\sin\delta$ debe ser como mínimo 1 kPa y 2.2 kPa para un ligante sin envejecimiento en RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) y con este respectivamente. Para evitar agrietamiento por fatiga, la mezcla debe ser elástica pero no tan rígida hasta que se fragilice (la rigidez debe ser la suficiente para que la mezcla experimente un comportamiento dúctil); por lo tanto, $G^*\sin\delta$ debe ser mínima. Como máximo se admite $G^*\sin\delta=5000$ kPa [1, 21].

La Termogravimetría (TGA) es una técnica que se basa en el registro de la variación en el porcentaje de la masa de una muestra, bien sea como función de la variación en temperatura a lo largo del tiempo, o como función de la variación del tiempo durante el cual la muestra permanece a una temperatura constante (proceso isotérmico). Por medio de esta técnica se pueden medir cambios en la masa de la muestra, asociados a procesos tales como: reacciones de oxidación, reacciones de descomposición, vaporización, sublimación y desorción. La calorimetría diferencial de barrido (DSC) es una técnica experimental dinámica que permite determinar la cantidad de calor que absorbe o libera una sustancia, cuando es mantenida a temperatura constante, durante un tiempo determinado, o cuando es calentada o enfriada a velocidad constante, en un determinado intervalo de temperaturas. Por otra parte, es bien sabido que el conocimiento de la estabilidad térmica de un material, así como la completa caracterización de sus transiciones, es de primordial interés en los materiales con potenciales aplicaciones industriales. Con la utilización de esta técnica se busca estudiar la influencia del historial térmico en la estructura microscópica de los materiales, como herramienta que permita establecer una posible correlación entre el comportamiento a nivel macroscópico y microscópico. En general, las transiciones de fase de primer orden se pueden detectar por medio de la DSC. Esto se puede aprovechar en aplicaciones como: i) medidas de capacidad calorífica aparente (fenómenos de relajación estructural; ii) determinación de temperaturas características de transformación o de transición tales como transición vítrea, transición ferro-paramagnética, cristalización, transformaciones polimórficas, fusión, ebullición, sublimación, descomposición e isomerización; iii) estabilidad térmica de los materiales; y iv) cinética de cristalización de los materiales [22-23].

Por otro lado, los polímeros son macromoléculas constituidas por moléculas más pequeñas llamadas monómeros. A ciertas temperaturas, se comportan como un líquido viscoso, con sus cadenas en constante movimiento, reordenando su posición y tendiendo a deslizarse unas sobre otras. A medida que se enfría, las cadenas pierden movilidad y se atraen más disminuyendo el volumen, lo que limita sus grados de libertad. Aunque sus cadenas están aún vibrando ya no pueden girar para cambiar su posición y no tienen forma de amortiguar los impactos, adoptando las características de un sólido rígido y frágil. El cambio, entre estos dos comportamientos del material se da a través de

un evento térmico, asociado a una transición de fase de segundo orden, conocido como temperatura de transición vítrea T_g , donde hay cambios de su densidad y rigidez [24].

2. Materiales y métodos

2.1. Caracterización del asfalto

Al cemento asfáltico CA 60-70, se le realizaron los ensayos que exige la especificación del Instituto Nacional de Vías INVIAS [25-26] para caracterizarlos, los resultados se presentan en la tabla I. Así, se observa que el asfalto cumple con los requisitos mínimos de calidad para ser utilizado en la fabricación de mezclas asfálticas.

Tabla I. Características generales del CA 60-70.

Ensayo	Método	Unidad	Recomendado INVIAS [25]	Resultado
Ensayos sobre el asfalto original				
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0,1 mm	60-70	65
Índice de penetración	NLT 181/88	-	Entre -1 y +1	-0,8
Viscosidad absoluta (60°C)	ASTM D-4402	Poises	1000 mín.	1800
Ductilidad (25°C, 5cm/min)	ASTM D-113	cm	>100	>105
Punto de ablandamiento	ASTM D-36-95	°C	-	50
Solubilidad en Tricloroetileno	ASTM D-2042	%	>99	>99
Contenido de agua	ASTM D-95	%	<0,2	<0,2
Punto de inflamación	ASTM D-92	°C	232 mínimo	285
Ensayos sobre el residuo luego del RTFOT				
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	1,0 máximo	0,65
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	% (de la penetración original)	48 mínimo	73

Fuente: elaboración propia.

2.2 Preparación del asfalto modificado

El desecho de polietileno fue obtenido del reciclaje de palillos de coloración blanca que son utilizados para mezclar bebidas calientes en empresas (ver figura 1) y presenta una densidad de 0,92 g/cm³. Los palillos fueron cortados de tal forma que sus dimensiones pasaran el tamiz No. 4 y fuera retenido en el No. 10 de un ensayo de granulometría.

Los palillos de PEBD fueron mezclados por vía húmeda al CA 60-70 en una relación de PEBD/CA=5,0% a una temperatura entre 150 ± 5°C. La temperatura fue escogida debido a que por encima de la misma el CA experimenta envejecimiento por pérdida de componentes químicos por oxidación y, por debajo, el mezclado se dificulta. El tiempo de mezclado fue de 40 minutos. La relación de PEBD/CA=5,0% fue escogida debido a que reportó el mejor comportamiento en una mezcla de concreto asfáltico [19]. Sobre el cemento asfáltico modificado se realizaron ensayos de caracterización como el de penetración, punto de ablandamiento, ductilidad y envejecimiento en RTFOT.



Figura 1. Palillos reciclados de PEBD.

Fuente: elaboración propia.

2.3 Caracterización reológica y térmica del asfalto convencional y del modificado

Los ensayos de caracterización reológica se ejecutaron empleando un reómetro dinámico de corte (DSR), siguiendo los lineamientos establecidos en la especificación AASHTO T 315-05. Dicha caracterización, se ejecutó a altas e intermedias temperaturas de servicio. La prueba básica DSR utilizó como muestra una lámina delgada colocada entre dos placas circulares. La placa inferior es fija, mientras que la placa superior oscila hacia adelante y hacia atrás, a través de la muestra a 10 rad/s (1.59 Hz para simular el efecto de un vehículo circulando a 90 km/h) para crear una acción de corte.

Para realizar los ensayos de caracterización térmica empleando las técnicas TGA y DSC, se utilizaron muestras del cemento asfáltico CA 60-70 convencional (sin aditivo, PEBD/CA=0%), del PEBD y del asfalto modificado con PEBD (PEBD/CA=5,0%), a su vez, se depositaron en capsulas de aluminio. Las masas oscilaron entre 0,325 mg y 8,222 mg. Para ejecutar los ensayos se empleó un equipo “Universal T.A. Instruments”, en atmósfera controlada de nitrógeno gaseoso. En ambas técnicas se establecieron ratas de barrido de 5° C/minuto. Los rangos de temperaturas utilizados en los ensayos oscilaron entre la ambiente (25° C) y 340° C para la técnica TGA, y entre -20° C y 350° C para la técnica DSC. Los parámetros obtenidos fueron la temperatura de transición vítrea Tg en el DSC y los porcentajes de pérdida de masa en el TGA, los cuales fueron calculados empleando el software “TA Universal Analysis”.

3. Resultados

3.1 Ensayos de caracterización sobre el asfalto modificado

Comparando los resultados presentados en las tablas I (asfalto convencional) y tabla II (asfalto modificado, PEBD/CA=5%), se observa que: i) el aditivo tiende a rigidizar notablemente el asfalto (incrementa el punto de ablandamiento y disminuye la penetración); ii) la ductilidad

disminuye de manera lógica, ya que el aditivo se rigidiza cuando ocurre el enfriamiento del asfalto modificado. Adicionalmente el aditivo debe romper, al mezclarse con el asfalto, parte de su microestructura; iii) el asfalto modificado con PEBD incrementa su resistencia a inflammar a altas temperaturas; y iv) el asfalto modificado es más resistente a la pérdida de masa en el ensayo de envejecimiento a corto plazo en RTFOT.

Tabla II. Características generales del CA 60-70 modificado con PEBD.

Ensayo	Método	Unidad	CA 60-70 modificado
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0,1 mm	35
Ductilidad (25°C, 5cm/min)	ASTM D-113	cm	55
Punto de ablandamiento	ASTM D-36-95	°C	61
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	0,4
Punto de inflamación	ASTM D-92	°C	301

Fuente: elaboración propia.

3.2 Ensayos de caracterización reológica

Las tablas III y IV muestran los resultados de caracterización reológica del asfalto de referencia (sin aditivo, PEBD/CA=0%) y modificado con PEBD/CA=5%, respectivamente. El grado de desempeño a altas e intermedias temperaturas de servicio del asfalto de referencia CA 60-70 (sin aditivo, HUSIL/CA=0%) es 58° C ($|G^*|/\sin\delta > 1.0$ kPa para asfalto sin envejecer y $|G^*|/\sin\delta > 2.2$ kPa para asfalto envejecido en RTFOT) y 22° C ($|G^*|/\sin\delta < 5000$ kPa para asfalto envejecido en RTFOT + PAV), respectivamente. G^* , δ , RTFOT y PAV (Pressure Aging Vessel) se refieren a módulo de corte complejo, ángulo de fase, envejecimiento a corto plazo en horno de película delgada rotatorio y envejecimiento a largo plazo en vasijas sometidas a presión, respectivamente. Cuando se modificó el asfalto CA 60-70 con PEBD/CA=5% el grado de desempeño a altas temperaturas de servicio aumentó a 70 °C, lo cual es indicador de un ligante más resistente a fenómenos como el ahuellamiento en climas de alta temperatura. Sin embargo, a temperaturas

Tabla III. Características reológicas del CA 60-70.

Temperatura [°C]	Frecuencia [rad/s]	δ [°]	G^* [Pa]	$ G^* /\sin\delta$ [kPa]	$ G^* \cdot \sin\delta$ [kPa]
CA 60-70, sin envejecer					
58	10	87	2470	2.473	2.467
64	10	88	1002	1.00	1.00
CA 60-70 envejecido en RTFOT					
58	10	85	4276	4.29	4.26
64	10	87	1701	1.70	1.70
CA 60-70 envejecido en RTFOT + PAV					
19	10	45	10193000	14415.1	7207.6
22	10	47	6659000	9105.0	4870.0

Fuente: elaboración propia.

intermedias, el grado de desempeño desmejoró (aumentó de 22 a 26° C). Lo anterior es indicador de un asfalto menos resistente a fenómenos de agrietamientos cuando es sometido a menores temperaturas de servicio. Con base en los resultados reportados, el asfalto modificado al someterse a temperaturas por debajo de los 26° C puede volverse frágil y quebradizo.

Tabla IV. Características reológicas del CA 60-70 modificado.

Temperatura [°C]	Frecuencia [rad/s]	δ [°]	G* [Pa]	G* /sin δ [kPa]	G* · sin δ [kPa]
CA 60-70 modificado con PEBD/CA=5%, sin envejecer					
64	10	68	2566,7	2,77	2,38
70	10	69	1294,3	1,39	1,21
CA 60-70 modificado con PEBD/CA=5%, envejecido en RTFOT					
70	10	70	2233	2,38	2,10
76	10	72	1289	1,36	1,23
CA 60-70 modificado con PEBD/CA=5%, envejecido en RTFOT + PAV					
22	10	43	10.329.130	15.145,4	7.044,4
26	10	44	7.111.600	10.237,6	4.940,1

Fuente: elaboración propia.

3.3 Ensayos TGA

En las figuras 2 y 3 se muestran los termogramas obtenidos con la técnica TGA para el asfalto CA 60-70, el PEBD y el CA modificado con PEBD. En la figura 2 se observa que el CA 60-70 experimenta, para temperaturas entre 25°C (ambiente promedio) y 165 °C (en planta de asfalto), una pérdida de masa aproximada de 4,89%, mientras para la región entre 165°C y 305 °C, hay una pérdida aproximada de 17,98%. En el caso del PEBD (figura 3) se observa una pérdida despreciable de su masa para temperaturas inferiores a 220°C. Entre 220°C y 340°C se observa una pérdida de masa de tan solo 1,56%. Para el caso del CA modificado con PEBD (figura 2), entre 30°C y 165 °C, se observa una pérdida de masa de 0,53%, mientras que para la

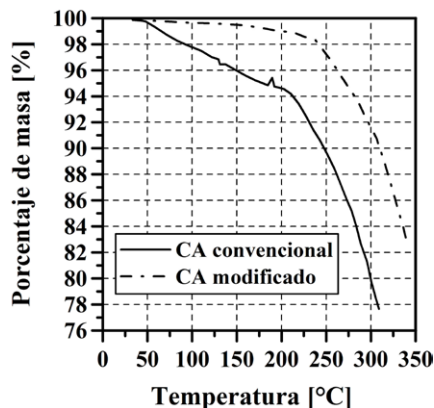


Figura 2. Termograma del CA 60-70 convencional (sin aditivo) y del modificado (PEBD/CA=5%).

Fuente: elaboración propia.

región entre 165°C y 340°C experimenta una pérdida del 16,56%. En el rango de temperatura al cual está expuesto el CA en una planta de asfalto, durante el proceso de fabricación de mezclas asfálticas (140 a 165°C), el CA 60-70 con y sin modificación con PEBD experimentan una pérdida de masa aproximada de 0,95% y 4,7%, respectivamente. Lo anterior evidencia que el cemento asfáltico modificado es más estable en todo el rango de temperaturas y podría experimentar menor oxidación y por ende envejecimiento.

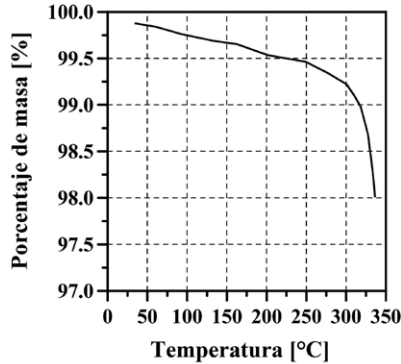


Figura 3. Termograma del PEBD.

Fuente: elaboración propia.

3.4. Ensayos DSC

En las figuras 4, 5 y 6, se muestran los resultados obtenidos con la técnica DSC. En la figura 4 se observa que el CA 60-70 experimenta una temperatura de transición vítrea $T_g=12,75^\circ\text{C}$, mientras que el PEBD no presenta temperatura de transición vítrea (figura 5), mostrando solamente un pico asociado al proceso de fusión a los $152,46^\circ\text{C}$ con una energía de fusión de $92,61\text{ J/g}$. El CA modificado con PEBD experimenta una temperatura de transición vítrea $T_g=37,63^\circ\text{C}$ y un pico de fusión a los $154,24^\circ\text{C}$, con una energía asociada al calor laten-

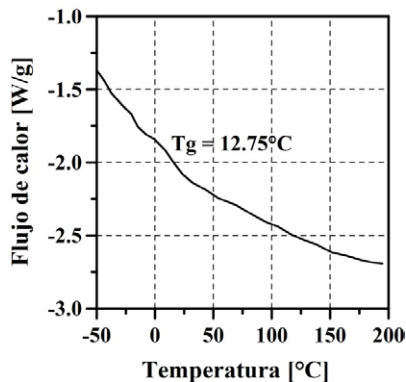


Figura 4. Resultado DSC del CA 60-70.

Fuente: elaboración propia.

te de 16,03 J/g. Estos resultados muestran que, al agregar PEBD al CA 60-70, la temperatura T_g experimenta un desplazamiento de 12,75°C a 37,63 °C. En otras palabras, se ha inducido un cambio en el comportamiento dúctil-frágil del asfalto hacia mayores temperaturas. Lo anterior significa que el asfalto modificado experimentará un comportamiento frágil cuando la temperatura del mismo dentro de la mezcla asfáltica esté por debajo de 37,63°C. Para el caso del asfalto CA 60-70 sin aditivo, este comportamiento frágil se adquiere cuando la temperatura del asfalto dentro de la mezcla sea inferior a 12,75°C.

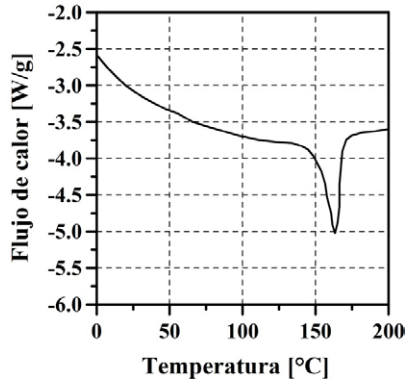


Figura 5. Resultado DSC del PEBD.

Fuente: elaboración propia.

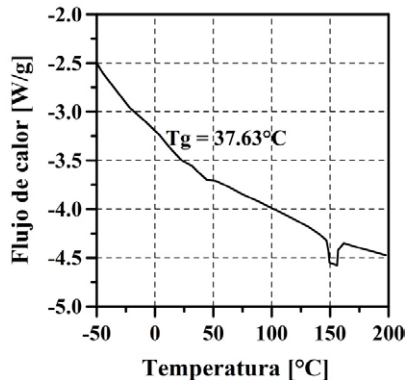


Figura 6. Resultado DSC del CA modificado.

Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

Aunque el contenido de PEBD agregado al asfalto es bajo (5% con respecto a su masa), se reportan cambios significativos en las propiedades del ligante modificado: i) incremento de la rigidez y mejoramiento del grado de funcionamiento del asfalto a altas temperaturas; y ii) disminución de la resistencia al agrietamiento a temperaturas bajas e intermedias de servicio. Lo anterior induce a pensar en la utilización del asfalto modificado en la fabricación de mezclas

asfálticas, que vayan a ser utilizadas en climas de alta temperatura (para resistir fenómenos como el ahuellamiento) y capas asfálticas gruesas.

Según los termogramas TGA, la pérdida de masa que experimenta el CA 60-70 es de 22,87% en el rango de temperatura entre 30°C a 300°C, mientras el PEBD pierde el 1,56%. Al modificar el CA 60-70 con el PEBD se obtiene un material que pierde un total de 17,09%. En el rango de temperatura al cual está expuesto el CA en una planta de asfalto (140°C a 165°C), el CA 60-70 con y sin modificación con PEBD experimenta una pérdida de masa aproximada de 0,95% y 4,7%, respectivamente. El asfalto modificado es evidentemente más resistente a la pérdida de masa. Lo anterior lleva a concluir que el asfalto modificado podría llegar a ser más resistente a la oxidación y al envejecimiento por aumento de temperatura, en comparación con el asfalto CA 60-70 sin modificar.

A partir de los resultados DSC, se evidencia que el cemento asfáltico CA 60-70 es un material amorfo (pues no hay un pico asociado a procesos de fusión) que presenta una temperatura de transición vítrea alrededor de los 12,75°C. Por otro lado, el PEBD muestra ser un polímero predominantemente cristalino, ya que no se evidencia la presencia de una temperatura de transición vítrea. Finalmente, el material que se obtiene, al modificar el CA 60-70 con PEBD, presenta las propiedades de los materiales precursores, es decir muestra una temperatura de transición vítrea y un pico asociado a un proceso de fusión. Al comparar estas temperaturas se encuentra que han experimentado, correspondientemente, un desplazamiento con respecto a las temperaturas que se observan en el CA 60-70 y el PEBD, así: la Tg para el CA 60-70 es 12,75°C y para el CA 60-70 modificado es 37,63°C. El pico de fusión para el PEBD se ubica en los 152,46°C, mientras que para el caso del CA 60-70 modificado se ubica en los 154,24°C. Lo anterior indica que el asfalto modificado experimenta un cambio de comportamiento dúctil a frágil a mayores temperaturas de servicio que aquel sin modificar, pudiendo experimentar *in situ*, menor resistencia a fenómenos como agrietamientos a bajas temperaturas de servicio y fatiga. Lo anterior es debido principalmente a que el PEBD por ser un polímero termoplástico rigidiza el asfalto. Estos resultados son coherentes con los reportados en los ensayos de caracterización reológica. Sin embargo, no existe una correlación directa entre la mínima temperatura de servicio reportada en el ensayo de reología (26° C) y aquella reportada en el ensayo DSC (37.63° C).

Al contrastar el comportamiento del asfalto CA 60-70 con el modificado, se observa una respuesta diferente, la cual se manifiesta como un fenómeno colectivo producido a nivel micro-estructural, es decir, la diferencia en las respuestas a los estímulos térmicos solo se pueden explicar por una alteración de dicha estructura.

Referencias

- [1] H. A. Rondón y F. A. Reyes, "Pavimentos–Materiales, Construcción y Diseño". Bogotá D.C.: Ed. ECOE, 2015, 573 p.
- [2] D. Casey, C. McNally, A. Gibneya and M. Gilchrist, "Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt". *Journal of Resources, Conservation and Recycling*, Volume 52, Number 10, 2008, pp. 1167-1174.
- [3] M. Rahi, E. Fini, P. Hajikarimi, and F. Nejad, "Rutting characteristics of styrene-ethylene/propylene-styrene polymer modified asphalt". *Journal of Materials in Civil Engineering*, Volume 27, Number 4, 2015, 04014154.

- [4] X. Yan, X. Jin, W. Li, F. Xiao and Y. Zhang, “The effect of modifying technologies on asphalt pavement performance”. CICTP 2014, ASCE, 2014, pp. 1101-1109.
- [5] S. Wang, Q. Wang, X. Wu and Y. Zhang, “Asphalt modified by thermoplastic elastomer based on recycled rubber”. *Construction and Building Materials*, Volume 93, 2015, pp. 678–684
- [6] M. Domingos, and A. Faxina, “Susceptibility of asphalt binders to rutting: literature review”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015, 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001364, 04015134.
- [7] K. Yan, H. Xu, and L. You, “Rheological properties of asphalts modified by waste tire rubber and reclaimed low density polyethylene”. *Construction and Building Materials*, Volume 83, 2015, pp. 143-149.
- [8] F. M. Nejad, A. Azarhoosh, and G. H. Hamed, “Effect of high density polyethylene on the fatigue and rutting performance of hot mix asphalt – a laboratory study”. *Road Materials and Pavement Design*, Volume 15, Number 3, 2014, pp. 746-756.
- [9] M. Arabani, S. M. Mirabdolazimi and A. R. Sasani, “The effect of waste tire thread mesh on the dynamic behaviour of asphalt mixtures”. *Construction and Building Materials*, Volume 24, Number 6, 2010, pp. 1060-1068.
- [10] E. Ahmadiania, M. Zargar, M. R. Karim, M. Abdelaziz and P. Shafigh, “Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt”. *Materials and Design*, Volume 32, Number 10, 2011, pp. 4844-4849.
- [11] K. Alshamsi, M. Baawain, K. Aljabri, R. Taha and Z. Al-kamyani, “Utilizing waste spent catalyst in asphalt mixtures”. *Procedia–Social and Behavioral Sciences*, Volume 53, 2012, pp. 326-334.
- [12] L. Widojoko and P. E. Purnamasari, “Study the use of cement and plastic bottle waste as ingredient added to the asphaltic concrete wearing course”. *Procedia–Social and Behavioral Sciences*, Volume 43, 2012, pp. 832-841.
- [13] A. Jamshidi, M. R. M. Hasan, H. Yao, Z. You, and M. O. Hamzah, “Characterization of the rate of change of rheological properties of nano-modified asphalt”. *Construction and Building Materials*, Volume 98, 2015, pp. 437-446.
- [14] G. Polacco, S. Filippi, F. Merusi, and G. Stastna, “A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility”. *Advances in Colloid and Interface Science*, Volume 224, 2015, pp. 72-112.
- [15] F. Hussain, S. Roy, K. Narasimhan, K. Vengadassalam and H. Lu, “E-Glass—Polypropylene pultruded nanocomposite: manufacture, characterization, thermal and mechanical properties”. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Volume 20, Number 4, 2007, pp. 411-434.
- [16] J. Yu, L. Wang, X. Zeng, S. Wu, and B. Li, “Effect of montmorillonite on properties of styrene–butadiene–styrene copolymer modified bitumen”. *Polymer Engineering & Science*, Volume 47, Number 9, 2007, pp. 1289-1295.
- [17] J. Yu, X. Zeng, S. Wu, L. Wang, and G. Liu, “Preparation and properties of montmorillonite modified asphalts”. *Materials Science and Engineering*, Volume 447, Number 1–2, 2007, pp. 233-238.
- [18] Z. You, J. Mills-Beale, J. M. Foley, S. Roy, G. M. Odegard, Q. Dai and S. W. Goh, “Nanoclay-Modified asphalt materials: preparation and characterization”. *Construction and Building Materials*, Volume 25, Number 2, 2011, pp. 1072-1078.
- [19] H. A. Rondón, W. Fernández, and W. Castro, “Mechanical properties evaluation of a dense hot asphalt mixture modified with a residue of Low Density Polyethylene (LDPE)”. *Ingeniería de Construcción*, Volume 25, Number 1, 2010, pp. 83-94.
- [20] F. A. Reyes y A. F. Figueroa, “Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas – Síntesis de la investigación colombiana”. Bogotá D.C.: Editorial Pontificia Universidad Javeriana, 2008, 103 p.

- [21] A. Motamed, and H. Bahia, "Influence of test geometry, temperature, stress level, and loading duration on binder properties measured using DSR". *Journal of Materials in Civil Engineering*, Volume 23, Number 10, 2011, pp. 1422-1432.
- [22] J. Puello, "Evolución del comportamiento viscoelástico lineal de fracciones pesadas del petróleo crudo sometidas a envejecimiento acelerado". Tesis de doctorado en Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, Colombia, 2012.
- [23] M. G. Volonté y P. Quiroga, *Análisis farmacéutico*. La Plata: Ed. La Plata, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Exactas, 2013, 347 p.
- [24] J. J. Sánchez, "Comportamiento térmico y mecánico del poli(etilén tereftalato) (PET) modificado con resinas poliméricas basadas en bisfenol-A". Tesis de doctorado, Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metallúrgica, 2003.
- [25] INVIAS–Instituto Nacional de Vías, *Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras*. Bogotá D.C.: Autor, 2013.
- [26] INVIAS–Instituto Nacional de Vías, *Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.: Autor, 2013a.

William Andrés Castro López

Físico egresado de la Universidad del Valle; magíster en Física de la Universidad del Valle -Cali, doctor de la Universidad del Valle sede Cali -Colombia; Profesor asistente en el área de Ciencias Básicas en la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; adscrito al grupo de investigación "Centro de Estudios de Pavimentos", donde realiza estudios sobre materiales para carreteras. Contacto: wacastrol@udistrital.edu.co

Hugo Alexander Rondón Quintana

Ingeniero Civil de la Universidad Francisco de Paula Santander ; magíster en ingeniería, Universidad de Los Andes; doctor de la Universidad de Los Andes; profesor asociado en el área de los pavimentos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá; adscrito al grupo de investigación "Centro de Estudios de Pavimentos", donde realiza estudios sobre materiales para carreteras. Contacto: hondonq@udistrital.edu.co

Juan Carlos Barrero Calixto

Físico de la Universidad de los Andes de Bogotá; especialista en filosofía de la Ciencia de la universidad del Bosque; máster (c) en Sistemas integrados de Gestión; universidad Camilo José Cela; maestrando en investigación operativa y estadística, universidad tecnológica de Pereira; Docente de la Universidad Católica de Colombia y consultor en áreas de ingeniería a empresas de transporte y petroleras. Contacto: jcbarrero@ucatolica.edu.co