

IAG66-06-2013
USO DE MATERIALES DE DESECHO COMO MODIFICANTES
DE ASFALTO EN COSTA RICA
Utilizando materiais de resíduos como modificadores de asfalto na
Costa Rica

José Pablo Aguiar Moya, Ph.D.
LanammeUCR, Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
jose.aguiar@ucr.ac.cr

Jorge Salazar Delgado
LanammeUCR, Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
jorge.salazardelgado@ucr.ac.cr

Rafael Ernesto Villegas Villegas
LanammeUCR, Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
rafael.villegas@ucr.ac.cr

Fabricio Leiva Villacorta, Ph.D.
LanammeUCR, Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
rafael.villegas@ucr.ac.cr

Luis Guillermo Loría Salazar, Ph.D.
LanammeUCR, Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

Alejandro Navas Carro, M.Sc.
LanammeUCR, Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
alejandro.navas@ucr.ac.cr

Resumen

Costa Rica, como la gran mayoría de países en vías de desarrollo se enfrenta con la dificultad de manejar los desechos no biodegradables que genera la industria del país. Por tanto, considerando el volumen de asfalto que se requiere cada año, un método realista de desecho de estos materiales es el uso de los mismos como modificantes de asfalto.

Como parte del proyecto se ha evaluado el uso de poliestireno (estereofón), bolsas de polietileno, caucho de llanta y material de búmer de auto como posibles modificantes de asfalto. El proceso de homogenización del material de desecho dentro de la matriz asfáltica se evaluó mediante Microscopía de Fuerza Atómica (AFM). Adicionalmente, los materiales de desecho se caracterizaron con ensayos físico-químicos y calorimétricos. El desempeño se midió mediante ensayos de creep repetido, multi stress creep recovery y ensayos de fatiga. Las temperaturas de

degradación del material de desecho fueron considerablemente superiores a las temperaturas de modificación del asfalto.

El asfalto original corresponde a un AC-30 (PG64-22). Se identificó que todos los modificantes reducen la deformación en al menos un 50% después de 250 ciclos de carga de creep repetido y con la excepción de las bolsas de polietileno, todos los asfaltos modificados son aptos para aplicaciones de alto tráfico. Adicionalmente, la mayoría de los modificantes mejoran las propiedades de fatiga.

Resumo

Costa Rica, como a grande maioria dos países em desenvolvimento, está confrontado com a dificuldade de lidar com resíduos não biodegradáveis que são gerados pela indústria do país. Portanto, considerando a quantidade de asfalto requerido cada ano, um método realista de eliminação destes materiais é a sua utilização como modificadores de asfalto.

Como parte do projeto avaliou-se o uso de poliestireno (isopor), sacos de polietileno, borracha de pneus e material dos pára-choques de carro como potenciais modificadores do asfalto. O processo de homogeneização do material de resíduos dentro da matriz de asfalto foi avaliada através da Microscopia de Força Atômica (AFM). Adicionalmente, os materiais de resíduos foram caracterizados com ensaios físico-químicos y calorimétricos. O desempenho foi medido por ensaios de creep repetido, multi stress creep recovery e ensaios de fadiga. As temperaturas de degradação do material de resíduo foram consideravelmente superiores às temperaturas de modificação do asfalto.

O asfalto original corresponde a um AC-30 (PG64-22). Identificou-se que todos os modificadores reduziram a deformação de pelo menos 50% depois de 250 ciclos de carga de creep repetido e com a exceção dos sacos de polietileno, todos os asfaltos modificados são apropriados para aplicações de alto tráfego. Além, a maioria dos modificadores melhoraram as propriedades de fadiga.

INTRODUCCIÓN

Los altos requisitos de desempeño a los que se someten los pavimentos en la actualidad requieren de un aseguramiento de las propiedades del asfalto a ser usado en cada proyecto para resistir la demanda climática y de tráfico. Sin embargo, en muchos casos, el alto nivel de tráfico, altas cargas y presiones de inflado requieren que el asfalto sea modificado. La modificación del asfalto puede atender tres propósitos: 1) asegurar que el asfalto se desempeño adecuadamente dentro del rango de temperaturas de servicio, 2) mejorar la respuesta del pavimento ante condiciones críticas de servicio (ej. alto porcentaje de cargas lentas) y 3) mejorar la durabilidad y enpropiedades de envejecimiento del asfalto (Woo et al., 2007).

Muchos tipos de materiales se pueden agregar al asfalto como modificantes. Los modificantes comerciales más comunes corresponden a polimeros elastoméricos como el estireno-butadieno-estireno (SBS) y estireno-butadieno-caucho (SBR). Ambos son polimeros con matriz flexible y largas cadenas químicas. Otros tipos de polimeros, como los plastómeros, también son usados (ej. polietileno y etileno-vinil-acetato [EVA])). Adicionalmente, materiales como cal hidratada, cenizas, vidrio triturado, azufre elemental, ácido polisulfúrico y gilsonita también son usados (Bahia et al., 2001; West et al., 1993; Styron et al., 1993).

Sin embargo, cuando se considera el incremento en el costo de los asfaltos (NDOT, 2012) y el costo de los asfaltos modificados con un aditivo comercial típico, la búsqueda por fuentes de

modificación alternativas se vuelve más atractiva. En general, el asfalto modificado puede incrementar el costo del asfalto original entre un 60% y un 150% (Coomarasamy et al., 1998). Por tanto, el uso de materiales de desecho como una opción económica alternativa para modificar asfaltos es realista. Adicionalmente, el utilizar materiales de desecho trae consigo ventajas adicionales como lo es la reutilización de un material que en muchos casos podría terminar en fosas o basureros a cielo abierto, generando un fuerte impacto en el ambiente.

Materiales de Desecho como Modificantes de Asfalto

Con la excepción de algunos polímeros reciclado, existe poca experiencia en el uso de materiales de desecho como modificantes de asfalto. Específicamente, la mayoría de la experiencia acumulada en el uso de polímeros de desecho se relaciona con el caucho de llantas (Palit et al., 2004). Lo que típicamente se espera de modificaciones con este tipo de polímeros es una mejora en el desempeño a la deformación permanente y a la fatiga. Adicionalmente, en algunos casos se ha observado que este tipo de asfalto modificado presenta menor susceptibilidad térmica y mayor resistencia al daño por humedad (Gallego-Medina, 2003; Oda et al., 2002). Sin embargo, con base en la literatura publicada, son pocos los casos (ej. caucho de llanta triturada) en que la modificación se ha llegado a implementar para su uso en campo.

Los autores consideran que una de las razones principales por las cuales esto ha ocurrido y por la que el uso de este tipo de modificantes no se ha diversificado más es la limitada disponibilidad de plantas de reciclaje con capacidad de procesar los materiales a una condición óptima para su incorporación al asfalto. Adicionalmente, el proceso de incorporación en planta requiere de equipos adicionales o modificaciones/calibración de las mismas. No obstante, la preocupación global para un manejo más adecuado de los desechos y la minimización del desperdicio está generando una tendencia cada vez mayor a reciclar y reprocesar materiales.

En el caso de Costa Rica, el polietileno de alta densidad de las bolsas utilizadas para recubrir los racimos de banano durante su cosecha ha sido evaluada recientemente como un posible modificante de asfalto (Villegas-Villegas et al., 2012). Esto es de importancia al nivel local puesto que el desecho de cientos de toneladas del material se ha vuelto problemático, con la complejidad adicional que el material está impregnado de clorpirifós, el cual es dañino para el ambiente y la salud humana. Los resultados iniciales asociados al uso de la bolsa como modificante de asfalto indican que la misma genera una mejora en la resistencia del asfalto a la deformación permanente y utilizarla provee el beneficio adicional de eliminar el clorpirifós del ambiente, puesto que el mismo se degrada durante el proceso de mezclado del asfalto con el modificante.

Basándose en esta experiencia es que los autores han evaluado el uso de otros materiales de desecho como posibles modificantes del asfalto: estereofón, búmer de carro, caucho de llanta y bolsas de polietileno. Más específicamente, el objetivo del artículo es evaluar la posibilidad de incorporar los materiales anteriormente mencionados en el asfalto, así como los cambios resultantes en el desempeño (principalmente a fatiga y deformación permanente), del asfalto modificado.

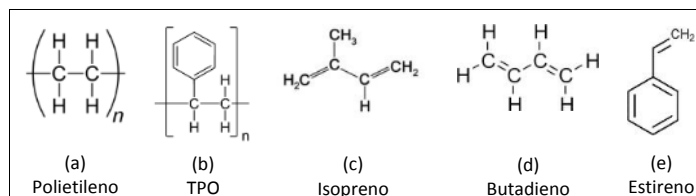
MATERIALES Y MÉTODOS DE ANÁLISIS

Los ensayos para caracterizar el asfalto y los modificantes se realizaron en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR, Universidad de Costa Rica), en

colaboración con el Laboratorio Nacional de Nanotecnología (LANOTEC) y el Laboratorio de Polímeros del Instituto Nacional de Aprendizaje (INA).

El asfalto original que fue utilizado corresponde a un AC-30, obtenido de la Refinería Costarricense de Petróleo (RECOPE). El asfalto corresponde al único asfalto original de utilización en las carreteras nacionales. El desecho de bolsas de polietileno corresponde a polietileno de alta densidad (HDPE). El material de búmer corresponde a olefinas termoplásticas (TPO) que corresponde a una mezcla de filler de polímero que puede incluir caucho, talco, fibra de carbón, fibra de vidrio, polipropileno, polietileno, bloque de copolímero de polipropileno y otros fillers. El estereofón corresponde a un poliestireno y el caucho de llanta típicamente está compuesto por tres polímeros: poliisopreno (caucho natural), polibutadieno y poliestireno-butadieno (Quek et al., 2012). Los compuestos principales presentes en los materiales de desecho analizados se resumen en la Figura 1.

Figura 1: Componentes Principales en Materiales de Desecho



Análisis de Materiales

Tanto los materiales de desecho, como el asfalto, fueron evaluados. El asfalto se evaluó mediante la metodología Superpave, basándose en el sistema PG antes y después de la modificación. Los materiales de desecho se analizaron con base en su curva calorimétrica, transición térmica, distribución del asfalto después de la modificación y su calidad en términos generales.

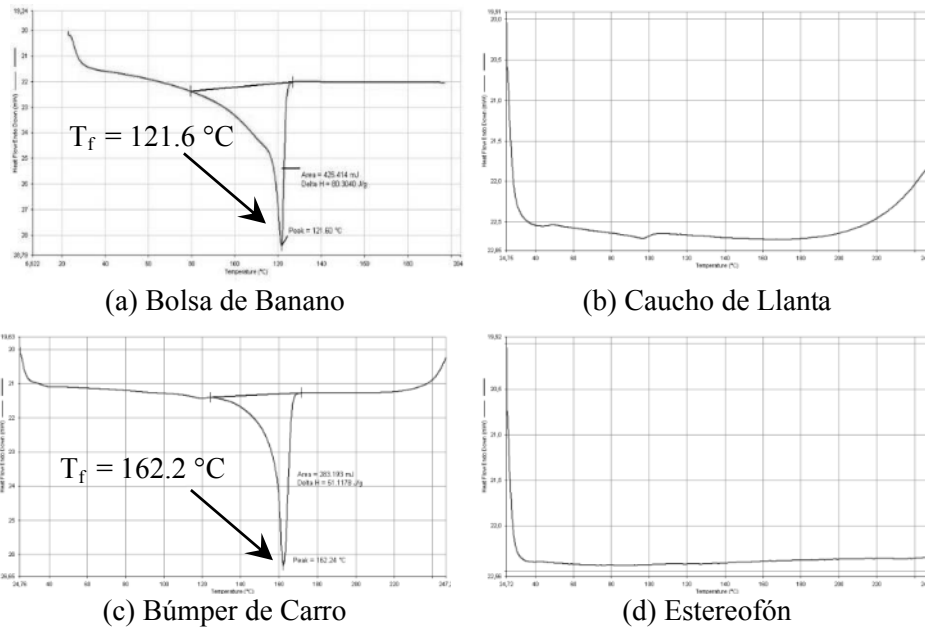
El análisis de los materiales de desecho se realizó mediante Análisis Termogravimétrico (TGA) y Barridos de Calorimetría de Escaneo Diferencial (DSC) y Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR). Para evaluar la composición de los materiales y el desempeño del asfalto original y modificado se realizó Cromatografía Iatroscan (asfalto original), Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) y FTIR. Para analizar el desempeño del asfalto durante su vida útil, se envejeció el mismo con el Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO) y la Cámara de Envejecimiento por Presión (PAV), para posteriormente ser evaluado con el Reómetro Dinámico de Cortante (DSR) bajo creep repetido (NCHRP 459), Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) (AASHTO TP70-07) y fatiga bajo deformación controlada (NCHRP 459).

RESULTADOS

Caracterización de Materiales de Desecho

Los modificantes fueron incorporados al asfalto según la siguiente dosificación por peso de asfalto: bolsa de polietileno (3%, fragmentos de 4 x 4 cm), búmer de carro (3%, material pasando la malla No. 30), estereofón (1,5%, según graduación de planta recicladora – aproximadamente material retenido en malla No. 8) y caucho de llanta (3%, material pasando malla No. 50). Como referencia, un SBS (2,5%) y SBR (2,5%) comercial también fueron incluidos en algunos de los análisis como referencia a los materiales de desecho. Análisis de DSC fue realizado para observar el comportamiento de las muestras como función de la temperatura: rango de 25°C a 200°C (Elseifi et al., 2010; Daly et al., 2010).

Figura 2: Análisis de DSC en Materiales de Desecho



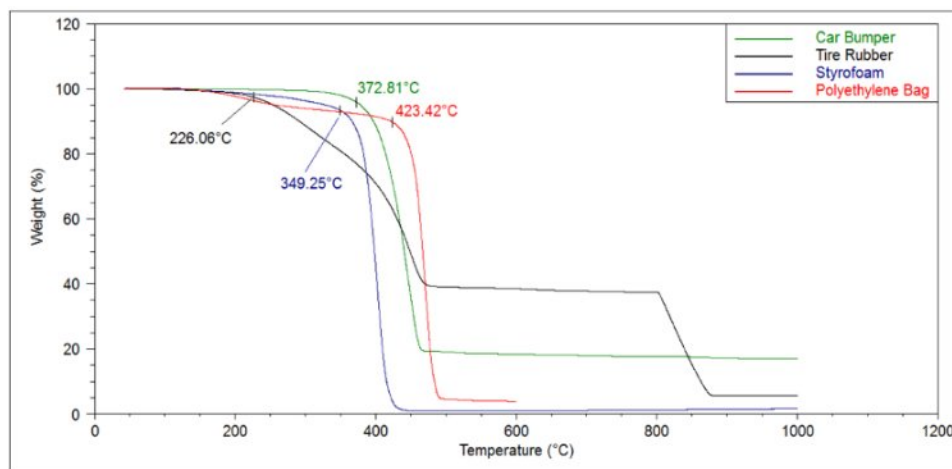
Con base en la información recolectada por el DSC, se buscó determinar las temperaturas de fusión (T_f) la temperatura de transición vítrea (T_g). La T_f y T_g fueron utilizadas para estimar la temperatura óptima de incorporación del material de desecho al asfalto. La Figura 2 muestra los resultados de DSC para los distintos materiales de desecho.

Tanto la bolsa de polietileno como el material de búmpier (TFO) exhiben estructuras cristalinas. Consecuentemente, ambos materiales presentan una T_f bien definida. En el caso de la bolsa de polietileno, donde la $T_f \approx 122^\circ\text{C}$, una temperatura de modificación superior fue seleccionada (145°C). Lo anterior se realizó con la finalidad de asegurar que la viscosidad del asfalto fuera lo suficientemente baja como para que el polímero pudiera incorporarse adecuadamente en la matriz asfáltica. El proceso de modificación fue realizado en el laboratorio mediante un mezclador de bajo cortante.

Debido a su naturaleza amorfa, el caucho de llanta y el estereofón (poliestireno) no presentan una T_f bien definida pero más bien exhiben una T_g . Basándose en la T_g , la temperatura de modificación se definió como aproximadamente.

El Análisis Termogravimétrico (TGA) se usó para determinar la temperatura de degradación de los materiales de desecho. Un modificador que empieza a degradarse por debajo de la temperatura de modificación del asfalto no es adecuado pues habrá perdido sus propiedades para el momento en que la modificación ha sido terminada. En el caso de los materiales de desecho, todas las temperaturas de degradación superaron los 200°C y por tanto, son adecuados para su incorporación al asfalto (Figura 3).

Figura 3: Análisis de TGA en Materiales de Desecho



Caracterización del Asfalto Original y Modificado

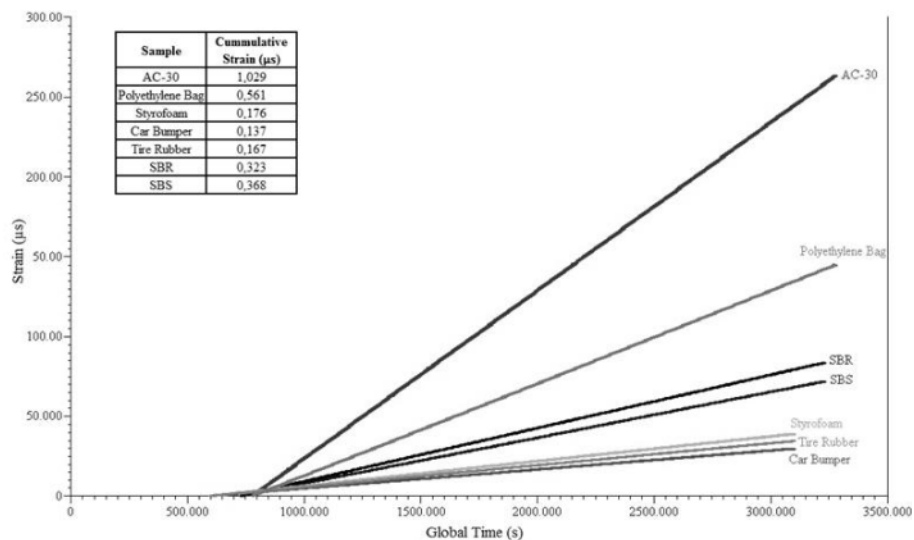
Un análisis de cromatografía fue realizado con el cromatografo Iatroscan para medir las fracciones SARA del asfalto original. Se determine que las fracciones del asfalto son las siguientes: Saturados 5,4%, Aromáticos 35,3%, Resinas 41,4% y Asfaltenos 17,9% (Índice de estabilidad coloidal = 0.3).

La caracterización del asfalto se realizó siguiendo la metodología Superpave para el asfalto original, el asfalto envejecido a corto plazo (RTFO) y el asfalto envejecido a largo plazo RTFO+PAV). La Tabla 1 muestra la caracterización Superpave para el asfalto original y los asfaltos modificados, bajo las tres condiciones de envejecimiento.

Tabla 1: Análisis Reológico del Asfalto

G*/sinδ ≥ 1 kPa, Asfalto Original					
Temperatura	64 °C	70 °C	76 °C	82 °C	True PG
AC-30	1,78	0,89	0,47	-----	69,0
Bolsa de polietileno	3,11	1,53	0,80	-----	73,9
Búmper de carro	-----	2,92	1,47	0,78	79,6
Estereofón	3,63	1,79	0,91	-----	74,2
Caucho de llanta	-----	2,45	1,28	0,70	78,4
SBR	3,00	1,52	0,81	-----	73,9
SBS	3,60	2,04	1,19	-----	78,0
G*/sinδ ≥ 2,2 kPa, Asfalto envejecido con RTFO					
Temperatura	64 °C	70 °C	76 °C	82 °C	True PG
AC-30	5,97	2,94	1,47	-----	72,4
Bolsa de polietileno	11,31	5,55	2,77	1,35	77,8
Búmper de carro	-----	-----	2,88	1,50	78,4
Estereofón	-----	4,65	2,33	1,20	76,5
Caucho de llanta	-----	-----	2,51	1,34	77,2
SBR	9,23	4,87	2,60	1,19	76,8
SBS	13,84	8,13	4,89	2,17	82,4
G*·sinδ ≤ 5 MPa, Asfalto envejecido con RTFO+PAV					
Temperatura	Temp. Intermedia (°C)		MPa		
AC-30	22		4,14		
Bolsa de polietileno	22		4,14		
Búmper de carro	25		4,44		
Estereofón	25		4,15		
Caucho de llanta	22		4,34		
SBR	13		4,20		
SBS	22		4,89		

Figura 4: Comparación de Creep Repetido para Asfalto Original y Modificados



Para caracterizar el desempeño del asfalto, se utilizó el ensayo de creep repetido. Los resultados se muestran en la Figura 4. El ensayo que se realiza a 70°C consiste en someter la muestra de asfalto a 250 ciclos de carga (la temperatura de ensayo corresponde a una temperatura PG base con la cual todos los asfalto modificados cumplen). El esfuerzo cortante aplicado es de 100 Pa y el tiempo de creep es de 1 s con un periodo de recuperación de 9 s (NCHRP 459).

La figura indica que todos los modificantes resultan en una reducción significativa de la deformación permanente acumulada (con respecto al asfalto original). La bolsa de polietileno mostró la menor mejoría en deformación permanente. No obstante, dicha mejora equivale a una reducción de aproximadamente el 50% de la observada en el asfalto original. Los modificantes restantes se desempeñaron excepcionalmente bien y resultaron en deformaciones permanentes inclusive menores a las de los asfaltos modificados con SBS y SBR que se han venido utilizando en Costa Rica.

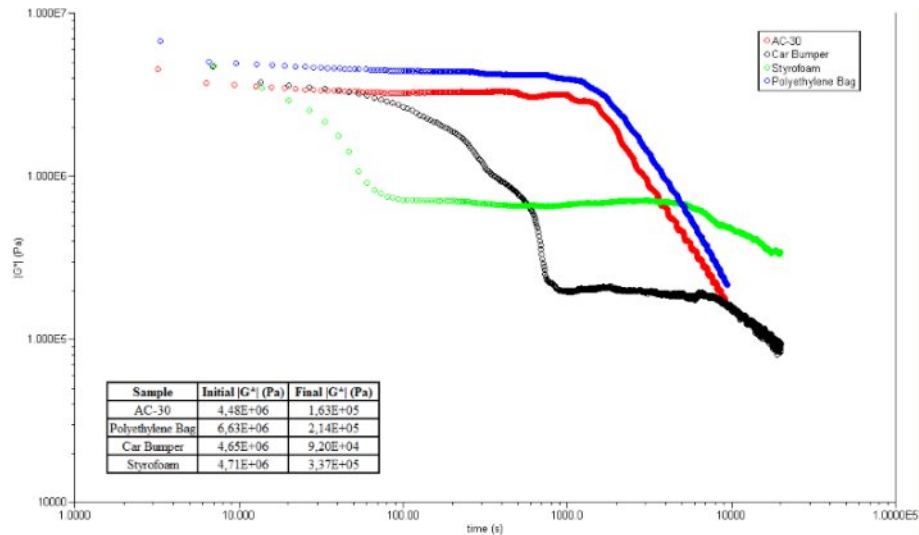
La Tabla 2 muestra el desempeño del asfalto modificado con los distintos materiales de desecho, cuando los mismos son sometidos al ensayo de Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) para deformación permanente. Los resultados confirman las observaciones de la Figura 4 e indican que para la mayoría de los casos, el asfalto modificado con materiales de desecho puede ser utilizado en aplicaciones de alto tránsito. Específicamente, el asfalto modificado con búmer de carro, estereofón, caucho de llantas y SBS comercial pueden ser utilizados para pavimentos con altos niveles de demanda vehicular. Esto es importante pues, según el criterio MSCR, el asfalto original solo debería ser utilizado en aplicaciones de bajo volumen de tránsito.

Tabla 2: Análisis Reológico del Asfalto

Polímero	Resultado	$J_{NR@3,2KPa}$	$(J_{NR@3,2KPa} - J_{NR@0,1KPa}) / J_{NR@0,1KPa}$
AC-30	---	7,344	0,22
Bolsa de Polietileno	Tráfico Estándar	3,180	0,26
Búmer de Carro	Alto Tráfico	1,476	0,25
Estereofón	Alto Tráfico	1,952	0,24
Caucho de Llanta	Alto Tráfico	1,831	0,32
SBR	Tráfico Estándar	3,284	0,37
SBS	Alto Tráfico	1,575	0,26

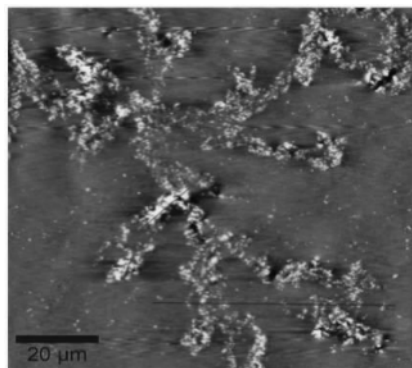
Condiciones de Tráfico	$J_{NR@3,2KPa}$	$(J_{NR@3,2KPa} - J_{NR@0,1KPa}) / J_{NR@0,1KPa}$
Tráfico Estándar ($< 1 \times 10^7$ ESALs)	< 4	$< 0,75$
Alto Tráfico ($1 \times 10^7 - 3 \times 10^7$ ESALs)	< 2	$< 0,75$
Tráfico Muy Alto ($> 3 \times 10^7$ ESALs)	< 1	$< 0,75$

Figura 5: Comparación de Fatiga para Asfalto Original y Modificados

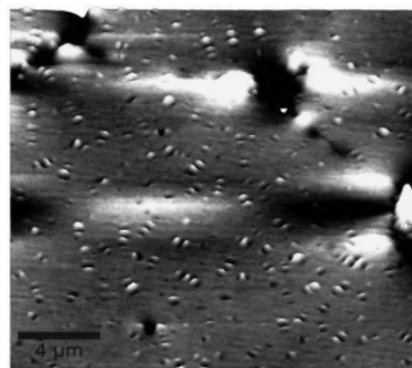


Adicionalmente, se realizó análisis de fatiga. El análisis fue desarrollado a 25 °C usando una frecuencia angular de 10 rad/s, bajo deformación controlada (10%), según lo establecido en NCHRP 459 (la temperatura de ensayo corresponde a un grado PG intermedio con el cual todos los asfaltos modificados cumplen). Los resultados se muestran en la Figura 5. Con la excepción del asfalto modificado con la bolsa de polietileno, se encontró que el inicio de la fase terciaria en los asfaltos modificados se postergó al menos 5 veces con respecto al asfalto original. Esto es un indicativo que la resistencia a la fatiga del asfalto modificado se ha incrementado.

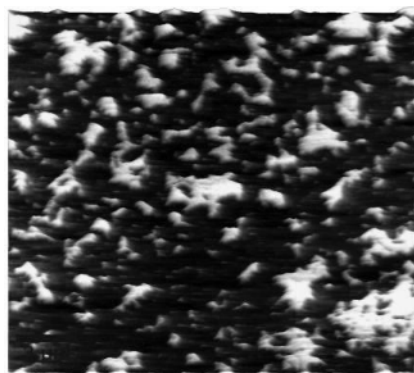
Figura 6: Topografía AFM de Asfaltos Modificados



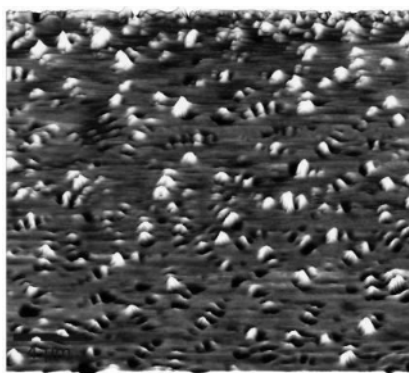
(a) Bolsa de Polietileno



(b) Caucho de Llanta



(c) Búmpер de Carro



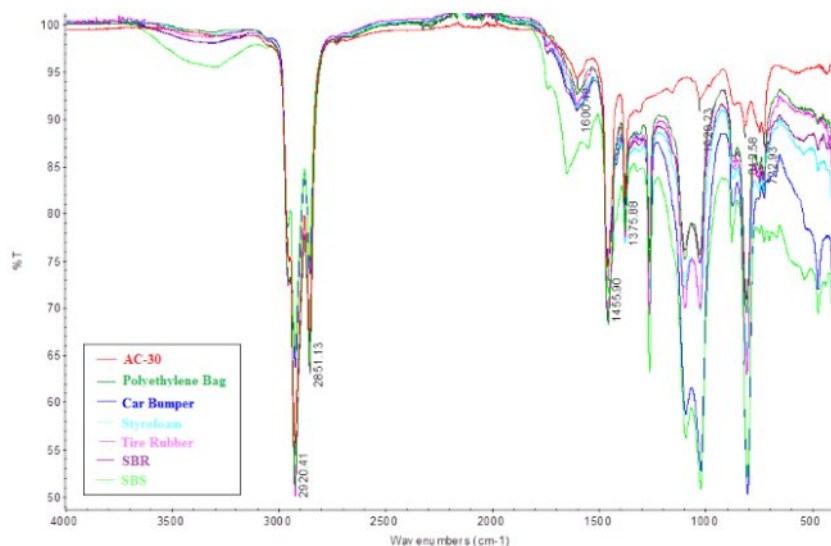
(d) Estereofón

El análisis de la distribución/dispersión del modificador dentro del asfalto se realizó mediante Microscopía de Fuerza Atómica (AFM). La técnica permite observar la topografía de la muestra, y por tanto la rugosidad del material. Las imágenes de AFM de los asfaltos modificados con materiales de desecho se presentan en la Figura 6. La imagen muestra las diferentes formas en que el modificador se incorpora a la estructura del asfalto. Nótese que en el caso de caucho de llanta existen partículas que no se han incorporado adecuadamente al asfalto. Esto es un indicador de que las partículas de material a incorporar deberían ser de menor tamaño que las utilizadas para facilitar la incorporación del mismo en el asfalto.

Finalmente, la Figura 7 muestra los espectros infrarrojos medidos en las muestras para caracterizar la estructura molecular de los materiales modificados (Kuptsov, 1994; Wei et al., 1996). El espectro infrarrojo del asfalto original tuvo las siguientes bandas características: bandas de alta intensidad de CH_2 que pueden ser asociadas a hidrocarburos saturados ($2851\text{-}2920\text{ cm}^{-1}$), bandas de intensidad media (1600 cm^{-1}) y baja (1500 cm^{-1}) de $\text{C}=\text{C}$ (Ar) que pueden ser asociadas a hidrocarburos aromáticos, bandas de intensidad media de $\text{C}-\text{N}$ que corresponden a aminas aromáticas (1340 cm^{-1}) y las bandas de baja intensidad de $\text{R}-\text{O}-\text{Ar}$ que corresponden a alquil-aril-éteres (1170 cm^{-1} , 1030 cm^{-1}).

Se debe resaltar que las últimas 4 bandas del espectro son las que indican la presencia de modificador en el asfalto. Estas bandas son las que pueden asociarse a la mejora en el desempeño del asfalto. Nótese que las bandas del espectro entre los 1000 y 1200 cm^{-1} son las que muestran el mayor cambio tras la modificación. Adicionalmente, la banda de 800 cm^{-1} tiene muy baja intensidad en el caso del asfalto original pero se incrementa considerablemente con la incorporación del modificador. Este incremento se relaciona con cambios en el contenido de hidrocarburos aromáticos y aminas aromáticas. Como referencia, el asfalto modificado con SBS muestra el mayor incremento en las bandas resaltadas anteriormente y el asfalto modificado con bolsas de polietileno el menor.

Figura 7: Comparación de Espectros IR para Asfalto Original y Modificados



CONCLUSIONES

Los materiales de desecho evaluados resultaron en un incremento del grado PG de 6 °C ó 12 °C, dependiendo del modificador. Adicionalmente, reducciones en la deformación permanente de más de 50% e incrementos en la resistencia a la fatiga fueron observados. Basándose en lo anterior (con la excepción de la bolsa de polietileno) los asfaltos modificados son aptos para uso en aplicaciones de alto tráfico vehicular - vías principales.

Por tanto, la investigación realizada muestra que el uso de los materiales de desecho no solo sirve para mejorar el desempeño de los asfaltos, sino que también se brinda un beneficio adicional al ambiente: en vez de desechar o quemar los materiales, se podrían utilizar los mismos en proporciones de aproximadamente 4 kg de material por metro cúbico de asfalto (según las dosificaciones utilizadas en el estudio).

Sin embargo, con base en lo observado durante el estudio, existen algunos aspectos que vale la pena resaltar: 1) debido a la naturaleza heterogénea de los materiales (diferentes plantas de producción y sitios de recolección de desechos) es importante que previo al uso de cualquier material de desecho se realice análisis de material para garantizar que es similar a los evaluados desde el punto de vista químico y reológico. En caso contrario, el material deberá ser analizado y caracterizado en detalle para evaluar la compatibilidad del mismo con el asfalto. 2) El tamaño de las partículas del modificador es fundamental. Esto se puede observar en el estudio con las partículas de caucho de llanta: partículas más finas aseguran una incorporación más homogénea a la matriz del asfalto. 3) Es conveniente realizar ensayos de desempeño adicionales para asegurar que durante el proceso de modificación del asfalto no se esté envejeciendo el asfalto y que no se vayan a presentar problemas de agrietamiento en el mediano y largo plazo. Y finalmente, 4) las propiedades de adherencia del asfalto necesitan ser verificadas para evaluar la posibilidad de una reducción en la capacidad cementante del asfalto, a pesar de posibles mejoras en el desempeño desde el punto de vista de deformación o fatiga.

REFERENCIAS

- Bahia, H.U., Hanson, D.I., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M.A., Anderson, R.M., Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design, Reporte NCHRP No. 459, 2001, NCHRP.
- Coomarasamy, A., Hesp, S.A.M., Performance of scrap tire rubber modified asphalt paving mixes, Rubber World, 1998.
- Daly, W.H., Negulescu, I.I., Glover, I., A Comparative Analysis Of Modified Binders: Original Asphalts And Materials Extracted From Existing Pavements, Reporte No. FHWA/LA.10/462, 2010, LTRC.
- Elseifi, M., Mohammad, L.N., Glover, I., Negulescu, I.I., Daly, W.H., Abadie, C., Relationship between Molecular Compositions and Rheological Properties of Neat Asphalt Binder at Low and Intermediate Temperatures, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 22, No. 12, 2010, p. 1288-1294.
- Gallego-Medina, D., Mezclas bituminosas con betunes de alto contenido en caucho de neumáticos: una elección por las altas prestaciones, Universidad Politécnica De Madrid, Madrid, 2003.
- Kuptsov, A.H., Applications of Fourier Transform Raman Spectroscopy in Forensic Science, Journal of Forensic Sciences, JFSCA, Vol. 39, No. 2, 1994, p. 305-318.
- NDOT, Nevada DOT Contract Escalation Clauses for Fuel, Asphalt Cement and Steel, Nevada, 2012, http://www.nevadadot.com/About_NDOT/NDOT_Divisions/Operations/Construction/Contract_Escalation_Clauses.aspx
- Palit, S., Reddy, K.S., Pandey, B., Laboratory Evaluation of Crumb Rubber Modified Asphalt Mixes, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 16, No. 1, 2004, p. 45-53.
- Oda, S., Fernandes, J.J.L., Viabilidade Técnica de Usar Caucho de Neumático como Material de Pavimentação Asfáltica, Universidad Estadual de Maringá, Brasil, 2002.
- Quek, A., Balasubramanian, R., Mathematical modeling of rubber tire pyrolysis, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Vol. 95, 2012, p. 1-13.
- Styron, R.W., Gustin, F.H., Viness, T.L., MSW Ash Aggregate for Use in Asphalt Concrete, Use of Waste Materials in Hot-Mix Asphalt, 1993, p. 129-144.
- Villegas-Villegas, R.E., Loria-Salazar, L.G., Aguiar-Moya, J.P., Fernández-Gomez, W.D., Reyes-Lizcano, F.A., Recycling of banana production waste bags in bitumens: A green alternative, Proceedings of the 5th Euroasphalt & Eurobitumen Congress, 2012.
- Wei, J.B., Shull, J.C., Lee, Y.J., Hawley, M.C., Characterization of Asphalt Binders Based on Chemical and Physical Properties, International Journal of Polymer Analysis and Characterization, Vol. 3, No. 1, 1996, p. 33-58.
- West, R.C., Page, G.C., Murphy, K.H., Evaluation of Crushed Glass in Asphalt Paving Mixtures, Use of Waste Materials in Hot-Mix Asphalt, 1993, p. 117-128.
- Woo, W.J., Ofori-Abebresse, E., Chowdhury, A., Hilbrich, J., Kraus, Z., Epps-Martin, A., Glover, C.J., Polymer Modified Asphalt Durability in Pavements, Reporte No. FHWA/TX-07/0-4688-1, 2007, TxDOT.