



Tecnura

ISSN: 0123-921X

tecnura@udistrital.edu.co

Universidad Distrital Francisco José de  
Caldas  
Colombia

Yung Vargas, Yee Wan; Cordoba Maquilón, Jorge Eliécer; Rondón Quintana, Hugo  
Alexánder

Evaluación del desgaste por abrasión de una mezcla drenante modificada con residuo de  
llanta triturada (GCR)

Tecnura, vol. 20, núm. 50, octubre-diciembre, 2016, pp. 106-118

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Bogotá, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257049511009>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto



## Evaluación del desgaste por abrasión de una mezcla drenante modificada con residuo de llanta triturada (GCR)

### Evaluation of abrasion of a modified drainage mixture with rubber waste crushed (GCR)

Yee Wan Yung Vargas<sup>1</sup>, Jorge Eliécer Cordoba Maquilón<sup>2</sup>, Hugo Alexánder Rondón Quintana<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 21 de febrero de 2016

**Fecha de aceptación:** 10 de septiembre de 2016

**Cómo citar:** Yung V., Y.W.; Cordoba M. J.E. y Rondón Q., H.A. (2016). Evaluación del desgaste por abrasión de una mezcla drenante modificada con residuo de llanta triturada (GCR). *Revista Tecnura*, 20(50), 106-118. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a08

#### RESUMEN

**Contexto:** Las mezclas asfálticas drenantes son definidas como aquellas cuyos vacíos con aire oscilan entre 20% y 25%, y emplean como ligante, un asfalto modificado con algún polímero principalmente elastomérico. A diferencia de otros estudios reportados sobre el tema, se evaluó el efecto de la temperatura de mezcla entre el asfalto modificado con GCR y el material pétreo (160 °C y 170 °C), y la variación de las temperaturas de compactación para cada una de ellas (110 °C, 130 °C, 150 °C) y (150 °C, 160 °C, 170 °C) respectivamente.

**Método:** El presente estudio evaluó en laboratorio, la resistencia al desgaste por abrasión (ensayo Cántabro) y la rigidez bajo carga monotónica (ensayo Marshall) y cíclica (módulo resiliente) que experimentó una mezcla asfáltica drenante MD fabricada con asfalto modificado con grano de caucho reciclado de llanta (GCR) por vía húmeda (se modifica el asfalto con el GCR a alta temperatura). Como asfalto base para la fabricación de las mezclas se utilizó cemento asfáltico CA 60-70 (PG 64-22).

**Resultados:** se reporta un incremento notable en la resistencia al desgaste por abrasión, a la resistencia bajo carga monotónica y la rigidez bajo carga cíclica de la MD cuando se modifica con GCR.

**Conclusiones:** Como conclusión general se resalta la influencia que tienen las temperaturas de mezcla entre el asfalto y el GCR, así como la de compactación (asfalto modificado y agregado) sobre el comportamiento de la MD modificada con GCR.

**Palabras clave:** Asfaltos modificados; desgaste por abrasión; mezclas drenantes; Estabilidad Marshall; GCR; Módulo resiliente.

#### ABSTRACT

**Context:** Porous asphalt mixtures are defined as an asphalt concrete with air voids content of around 20% and 25%, and the typical binder is a modified asphalt with some elastomeric polymer. Unlike other studies reported on the subject: i) The effect of mixing temperature between asphalt modified with GCR and stone materials (160 °C and 170 °C) was evaluated, ii) as the variation of compaction

- 1 Ingeniera civil, especialista en Vías y Transporte, magíster en Ingeniería-Infraestructura y Sistemas de Transporte. Docente de la Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia. Contacto: [yeewanyv@ufps.edu.co](mailto:yeewanyv@ufps.edu.co); [ywyungv@unal.edu.co](mailto:ywyungv@unal.edu.co)
- 2 Ingeniero civil, especialista en Vías y Transporte, especialista en Psicología Organizacional, magíster en Ingeniería-Infraestructura y Sistemas de Transporte, coctor en Ingeniería. Docente Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. Contacto: [jecordob@unal.edu.co](mailto:jecordob@unal.edu.co)
- 3 Ingeniero civil, magíster en Ingeniería Civil, doctor en Ingeniería. Profesor titular, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia. Contacto: [harondonq@udistrital.edu.co](mailto:harondonq@udistrital.edu.co)

temperatures for each of (110 °C, 130 °C, 150 °C) and (150 °C, 160 °C, 170 °C), respectively.

**Method:** This study measured in laboratory, the resistance to abrasion (Cantabria trial) and the stiffness under monotonic (Marshall test) and cyclical (resilient modulus) loading of a porous asphalt mixture MD. Asphalt cement CA 60-70 (PG 64-22) was used as binder. This binder was modified with recycling tyre rubber (GCR) by wet way (The GCR and binder are completely mixed to form asphalt rubber).

**Results:** a significant increase in resistance to abrasion, resistance under monotonic loading and stiffness under cyclic loading of the MD is reported when this mixture is modified with GCR.

**Conclusion:** The results showed that there is a highlighted influence of mix temperature (between asphalt and GCR) and compaction temperature (modified asphalt and aggregate) on the behavior of the MD modified with GCR.

**Keywords:** Modified asphalt; abrasive wear; porous asphalt; Marshall stability; GCR; Resilient modulus.

## INTRODUCCIÓN

### Problemática ambiental

De acuerdo con Rondón y Reyes (2015), los neumáticos en desuso son uno de los materiales más desechados en el mundo. Aproximadamente: i) el 2 % de los residuos sólidos totales provienen del desecho de neumáticos en desuso (Singh, Nimmo, Gibbs y Williams, 2009); ii) en Estados Unidos se desechan anualmente aproximadamente 300 millones de llantas (Zhong, Zeng y Rose, 2002; Shen, Amirkhanian y Lee, 2007); iii) de acuerdo con Botero *et al.* (2005), en Puerto Rico se produce, por cada habitante, un neumático de desecho al año; iv) la producción anual en Brasil es de aproximadamente 45 millones de llantas, y de estas, cerca de 30 millones son desechadas (Neto *et al.*, 2003); v) para el año 2003 existían aproximadamente 900 millones de neumáticos colocados de manera inapropiada en el medio ambiente (Magalhães y Soares, 2003); vi) en China, en el año 2002 se produjeron 80 millones de llantas de desecho, y se esperaba para el año 2010 un número total de neumáticos abandonados de 200 millones (Cao, 2007); vii) en Bogotá D.C. (Colombia), tan solo en 1999 se generaron 1'981.375 llantas en desuso, y esta magnitud incrementó a 2'642.938 para

mediados de agosto de 2010 (Rondón y Reyes, 2015). Estos desechos impactan negativamente el ambiente, contaminando principalmente el aire de la atmósfera, ya que por lo general son almacenados (generando focos de infección), incinerados al aire libre o utilizados como fuente de energía alterna (Rondón y Reyes, 2015).

### Antecedentes sobre asfalto-GCR

Modificar asfaltos es una técnica ampliamente utilizada en el mundo para mejorar la respuesta de asfaltos y mezclas asfálticas (Rondón y Fernández, 2014; Rondón, Sánchez y Castaño, 2014). La tecnología de modificar materiales asfálticos con caucho no es reciente. En la década de 1840 aparece en Inglaterra la primera patente de un ligante asfáltico modificado con caucho natural. En la década de 1960, Charles H. MacDonald descubrió con éxito una forma exitosa de incorporar grano de caucho reciclado de llanta (GCR) al asfalto, y a dicha mezcla la denominó *asfalto-caucho*. Una descripción histórica sobre el tema de asfaltos y mezclas modificadas con GCR puede ser consultada en Carlson y Zhu (1999). De acuerdo con Rondón y Reyes (2015), el tamaño de las partículas de GCR para ser utilizado como modificador de asfalto debe ser menor a 6,3 mm (Rondón y Reyes, 2015). Para modificar el asfalto con GCR se

emplean por lo general dos técnicas: i) por vía húmeda, el GCR es adicionado al asfalto a alta temperatura; ii) por vía seca, el GCR reemplaza parte del agregado pétreo dentro de la mezcla. En la actualidad, Colombia cuenta con las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (Invías) (2013, artículo 413-13) para la caracterización de cementos asfálticos (CA) modificados con GCR, la cual se basa en la ASTM D-6114. Para el caso de Bogotá D.C., la ciudad cuenta con una especificación para la “aplicación de grano de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas en caliente (vía húmeda)” según especificación del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) (2011, artículo 560-11). En ambas especificaciones se describen los objetivos, los alcances, los tipos de materiales, las condiciones para el recibo de los trabajos, la forma de producción del asfalto-caucho y la forma de medida y pagos entre otros aspectos.

Algunas ventajas de utilizar GCR para la modificación de asfaltos y mezclas asfálticas son: i) aumento en la resistencia a la fatiga y al ahuellamiento (Dong y Tan, 2011; Hsu, Chen y Hung, 2011; Punith *et al.*, 2012); ii) incremento de la resistencia al envejecimiento (Huang, 2008; Dong y Tan, 2011; Punith, Xiao y Amirkhanian, 2011); iii) aumento de la resistencia al agrietamiento por bajas temperaturas (Choubane, Sholar, Musselman y Page, 1999; Huang, Bird y Heidrich, 2007; Khodary, 2010); iv) menor susceptibilidad térmica (Othman, 2006; Khodary, 2010; Dong y Tan, 2011); v) incremento en la resistencia al daño por humedad (Dong y Tan, 2011; Punith, Xiao y Amirkhanian, 2011); vi) mayor resistencia del asfalto modificado al calor (IDU y Universidad de los Andes, 2002, 2005); vii) incremento en la recuperación elástica del asfalto bajo carga (Huang, 2008; Khodary, 2010); viii) disminución del ruido de rodadura (Putman, 2005; Anderson, Pierce, Uhlmeier y Weston, 2008; Wang, Chang, Xing y Xing, 2009); ix) mejoramiento de las propiedades reológicas (Huang, 2008; Kumar, Mehndiratta y Singh, 2010; Punith, Xiao y Amirkhanian, 2011); x) generan capas asfálticas de mayor durabilidad y

menor necesidad de mantenimiento en proyectos viales (Wang y Zeng, 2006; Cooper, Mohamad y Abadie, 2007; Lee, Amirkhanian, Putman y Kim, 2007); xi) disminuyen el impacto ambiental negativo que producen las llantas (Huang, Bird y Heidrich, 2007; Wang *et al.*, 2009; Xiao y Amirkhanian, 2009). Algunas desventajas de utilizar GCR para modificar asfaltos son: i) incrementan la viscosidad del ligante generando un aumento en la temperatura de mezcla y compactación (Bahia y Davies, 1994); ii) la modificación del CA con el GCR se realiza a temperaturas elevadas (entre 175 y 200 °C), produciendo un aumento en el uso de energía y combustibles durante la fabricación de la mezcla (Dong y Tan, 2011), iii) hay necesidad de comprar un equipo de modificación para mezclar el asfalto con el GCR y almacenarlo, lo que incrementa el costo inicial de la mezcla; iv) en ciertos casos, el caucho capta parte de los aceites del asfalto, lo que afecta las propiedades de adherencia y cohesión (Peralta *et al.*, 2010).

### Mezclas asfálticas drenantes

En Colombia estas mezclas son conocidas como MD de acuerdo con INVIAS (2013, artículo 453-13). Son mezclas cuyo porcentaje de vacíos es lo suficientemente alto (entre 20-25 %) para permitir que se filtre el agua de lluvia con rapidez y evacuarla hacia las obras de drenaje de la vía, evitando el fenómeno de hidropneumático y encharcamiento en las vías. Adicionalmente, son mezclas que por su alta porosidad generan una textura superficial rugosa, adecuada para que la fricción entre el neumático de los vehículos con la rasante del pavimento sea alta, contribuyendo a la disminución en los niveles de accidentalidad de las vías. Son mezclas utilizadas para conformar la capa de rodadura en la capa asfáltica. El cemento asfáltico empleado es modificado con polímeros (Rondón y Reyes, 2015). El diseño de este tipo de mezcla se ejecuta por medio del método y ensayo Cántabro (ASTM D7064). En este, se evalúa la resistencia al desgaste por abrasión y a la disgregación, las briquetas

o muestras son cilíndricas del tipo Marshall, compactadas a 50 golpes por cara, y se siguen los lineamientos especificados en INV. E-760-13, NLT 352/00.

Modificar mezclas porosas con el fin de transformar y mejorar sus propiedades mecánicas (especialmente en vías sometidas a climas de alta temperatura y tráfico pesado) ha sido recomendado ampliamente hace ya varios años (Ruiz, Alberola, Pérez y Sánchez, 1990; Álvarez, Martín y Estakhri, 2011). A continuación se presentan algunos estudios ejecutados sobre mezclas asfálticas drenantes o porosas modificadas con GCR o elastómeros. Cetin (2013), en un estudio sobre una mezcla asfáltica porosa modificada con GCR, reporta que el tamaño de las partículas de GCR influye sobre la resistencia a la abrasión, al daño por humedad y la rigidez bajo carga cíclica. En términos generales, registra que un incremento en el tamaño y contenido de GCR en la mezcla porosa disminuye su resistencia mecánica y durabilidad. Una conclusión similar la presenta Ibrahim *et al.* (2014), y además mencionan, que esta disminución en la resistencia es más notoria cuando reduce el contenido de asfalto. Según estos últimos investigadores, cuanto mayor sea el contenido de GCR adicionado, mayor debe ser la cantidad de asfalto necesario para optimizar el comportamiento de una mezcla asfáltica porosa, especialmente si el GCR presenta tamaño de partícula gruesa. Lo anterior puede ser explicado a partir de los resultados reportados por Katman *et al.* (2005). Estos investigadores reportaron una disminución en la resistencia a la abrasión cuando se modificó por vía húmeda una mezcla porosa. Según ellos, el GCR absorbe parte de la cantidad de ligante que se necesita para cubrir adecuadamente el agregado pétreo, disminuyendo la adherencia entre el ligante y dicho agregado, la resistencia al daño por humedad y al fenómeno de *stripping*. Partl, Pasquini, Canestrari y Virgili (2010) modificaron dos mezclas porosas con un polímero elastomérico (estireno-butadieno-estireno, SBS) y reportaron, con base en ensayos de laboratorio y un modelo de

daño, una mayor resistencia al fenómeno de fatiga de estas mezclas en comparación con las convencionales (sin modificar). Cao *et al.* (2011) también reportan, a partir de ensayos de tracción indirecta, deformación permanente y fatiga, un mejor comportamiento de las mezclas porosas cuando se modifican con un polímero elastomérico. Hsu, Cheng y Hung (2011) reportan un incremento en la resistencia a la deformación permanente y la rigidez bajo carga cíclica de mezclas porosas cuando se modifican con caucho. Tahmoressi (2001) en la evaluación de cinco vías pavimentadas a escala real en el estado de Texas (USA) con mezcla asfáltica porosa, registró un mejor comportamiento (especialmente en la resistencia al agrietamiento) de dichas mezclas cuando se modifican con GCR. Por otro lado, estas mezclas son utilizadas cuando se quiere disminuir el ruido de rodadura (Nelson y Abbott, 1990; Lu y Harvey, 2011).

## OBJETIVO DEL ESTUDIO

La mayor parte de los estudios ejecutados sobre modificación de mezclas asfálticas con GCR han sido realizados sobre mezclas de concreto asfáltico o del tipo denso y en caliente. En comparación con este último, se han realizado pocos estudios sobre modificación de mezclas drenantes o porosas modificadas con GCR. A pesar que se han ejecutado diversas investigaciones sobre el tema de estudio, la discusión sobre la eficacia de emplear GCR para fabricar mezclas drenantes no ha finalizado. Por consiguiente, los resultados de la presente investigación ayudan a que se profundice en la discusión. El objetivo del presente estudio fue evaluar la resistencia al desgaste por abrasión, la resistencia bajo carga monotónica y la rigidez bajo carga cíclica que desarrolla una mezcla asfáltica drenante cuando se modifica por vía húmeda el asfalto con un residuo de llanta triturada GCR. Las mezclas fueron elaboradas empleando como asfalto base, cemento asfáltico normalizado tipo CA 60-70, residuo de llanta triturada con tamaño máxima de partícula de 0,6 mm y granulometría

de material pétreo acorde con la especificación Invías (2013, artículo 453-13) para la elaboración de mezclas drenantes. A diferencia de otros estudios al respecto, en el presente se evaluó el efecto de la temperatura de mezcla entre el asfalto y el GCR (vía húmeda de modificación), y entre el asfalto ya modificado y el agregado pétreo (temperatura de mezcla y de compactación).

## METODOLOGÍA

### Caracterización de materiales

En la tabla 1 se presentan los resultados de los ensayos ejecutados para caracterizar el agregado pétreo utilizado para la fabricación de las mezclas drenantes. Se observa en dicha tabla que los

materiales pétreos cumplen los requisitos mínimos de calidad exigidos por la especificación Invías (2013, artículo 453-13) para mezclas drenantes. Los resultados de los ensayos ejecutados sobre el cemento asfáltico normalizado CA 60-70 se evaluaron en condiciones normales (sin modificar), y modificado con la llanta triturada GCR (tabla 2). La relación GCR/CA presentada en la tabla 2 es en peso. Se reporta un incremento notable en la rigidez cuando se aumenta el contenido de GCR en el asfalto (incremento en el punto de ablandamiento y disminución de la penetración). El GCR que se utilizó presenta un tamaño inferior a 0,6 mm (tamiz No. 30), libre de metal, fibras textiles u otros contaminantes, como lo refiere las especificaciones técnicas del IDU (2011, artículo 560-11) e Invías (2013, artículo 413-13).

**Tabla 1.** Resultados de ensayos sobre materiales pétreos

Ensayo	Especificación	Resultado	Valor especificado
Humedad	INV. E-122-13	1,49 %	-
Desgaste Micro-Deval	INV. E-238-13	8,97 %	20 % máximo
Caras fracturadas en los agregados	INV. E-127-13	95 %	(85/70), 1 cara/2 caras
Sanidad frente al ataque de sulfatos	INV. E-220-13	0,63 %	12 % máximo
10 % de finos (valor en seco)	INV. E-224-13	140 kN	110 kN mínimo
Equivalente de arena	INV. E-133-13	55,13 %	50 % mínimo
Índice de alargamiento	INV. E-230-13	7 %	-
Índice de aplanamiento	INV. E-230-13	18 %	-

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 2.** Resultados de ensayos sobre CA 60-70 sin modificar y modificado con GCR

GCR/CA [%]	Ductilidad [cm], AASHTO T 51	Punto de ignición [°C], ASTM D-92	Punto de ablandamiento [°C], AASHTO T 53	Penetración [0.1 mm], AASHTO T 49
0	141,7	315,56	44	59,5
10	50,7	287	45,5	50,7
12	40,0	289	48	47,7
15	28,3	285	50,5	40,7
17,5	17,7	289	51	33,0
20	11,3	301	53,5	28,0

Fuente: elaboración propia

## Determinación del porcentaje óptimo de GCR en el asfalto

Se realizaron combinaciones de CA 60-70 con diferentes porcentajes de GCR/CA=10 %, 12 %, 15 %, 17,5 % y 20 % con respecto al peso por vía húmeda. La combinación del asfalto (CA 60-70) con el GCR se realizó teniendo en cuenta los parámetros presentados en la tabla 3 (basados en los establecidos por la especificación IDU, 2011).

Con el fin de realizar el diseño de la mezcla asfalto-GCR, se ejecutaron ensayos de viscosidad (tabla 4) empleando un viscosímetro rotacional (AASHTO T 316). De acuerdo con los resultados de las viscosidades mostrados en la tabla 4, se tomó como contenido óptimo de GCR en peso a adicionar al asfalto 17 %, ya que está dentro de los parámetros establecidos por la especificación Invías (2013, artículo 413-13): i) viscosidad 1,5 y 3,0 Pa-s; ii) penetración entre 40 y 60 décimas de mm; iii) punto de ablandamiento máximo de 55 °C.

## Diseño experimental

La granulometría base utilizada para la fabricación de las mezclas asfálticas drenantes MD convencional (sin aditivo, GCR/CA=0 %) y modificadas MD-M (GCR/CA=17 %) se presenta en la tabla 5 (Invías, 2013, artículo 453-13).

La fase experimental para evaluar la respuesta mecánica de las mezclas MD-M se dividió en dos etapas:

*Etapa 1.* Inicialmente se evaluó la resistencia al desgaste por abrasión de la mezcla MD convencional y la modificada MD-M ejecutando ensayos Cántabro (ASTM D7064, INV. E-760-13). Este ensayo fue realizado teniendo en cuenta que es el utilizado para el diseño de mezclas asfálticas drenantes. Ambos tipos de mezclas (MD y MD-M) fueron fabricadas empleando contenidos de asfalto CA=4,0 %, 4,5 % y 5,0 %. De acuerdo con la especificación ASTM D 6925, la viscosidad de laboratorio recomendada para obtener la temperatura de fabricación de mezclas asfálticas del tipo

**Tabla 3.** Mezcla del asfalto con el GCR

GCR/CA [%]	Temperatura de mezcla [° C]	Tiempo de mezcla [minutos]
10	160	55
12	160	55
15	160	55
17,5	165	60
20	165	60

**Fuente:** elaboración propia

**Tabla 4.** Resumen de resultados de viscosidad para diferentes GCR/CA

GCR/CA [%]	Viscosidad [Pa-s]
0	0,12
10	0,46
15	0,64
17,5	1,85
20	3,54

**Fuente:** elaboración propia

**Tabla 5.** Granulometría para mezclas drenantes

Tamiz		Porcentaje que pasa
Normal	Alternativo	MD y MD-M
19,0 mm	3/4"	100
12,5 mm	1/2"	85
9,5 mm	3/8"	62,5
4,75 mm	No. 4	23,5
2,00 mm	No. 10	14,5
425 mm	No. 40	8,5
75 mm	No. 200	5

**Fuente:** elaboración propia.

abierta o porosa es, por lo general, aquella donde el ligante alcance una viscosidad entre 700 cp y 900 cp. Para el caso de asfaltos modificados este requisito no es confiable, debido en gran medida a que el comportamiento de estos materiales es fuertemente dependiente de la velocidad de corte (fluido no newtoniano) y las temperaturas reportadas en muchas ocasiones son altas y no realistas (West, Watson, Turner y Casola, 2010; Zoorob, Castro y

Pereira, 2012) degradando, a dichas temperaturas, las propiedades originales del ligante al oxidarlo y envejecerlo. Adicionalmente genera problemas de emisiones contaminantes a la atmósfera. Por lo anterior, las mezclas convencionales fueron elaboradas a 130°C entre el asfalto y el material pétreo, con temperatura de compactación (100 °C, 110 °C, 130 °C). Las mezclas con aditivo (GCR) fueron fabricadas por ensayo y error bajo temperaturas de mezcla de 160 °C y 170 °C entre el asfalto modificado y el material pétreo. Así mismo la temperatura de compactación tuvo variaciones de (110 °C, 130°C, 150 °C) para la mezcla de 160 °C, y temperatura de compactación (150 °C, 160 °C, 170 °C) para la mezcla de 170 °C.. Por cada porcentaje de asfalto, temperatura de mezcla y temperatura de combinación entre el asfalto y el GCR fueron fabricadas cinco briquetas para la realización del ensayo Cántabro. Las mezclas se compactaron a 50 golpes por cara y cada briqueta presentaba una masa de 1000 g siguiendo los lineamientos establecidos por Invías (2013, artículo 453-13). Ejecutando el ensayo Cántabro, se determinaron las pérdidas por desgaste por abrasión en la máquina de los ángeles en seco y en húmedo (estas últimas sumergidas durante 24 horas a 60 °C en baño maría).

*Etapa 2.* Con los resultados del ensayo Cántabro se establecieron el contenido óptimo de asfalto, las temperaturas de mezcla y temperatura de combinación entre el asfalto y el GCR. Para establecer los parámetros mencionados anteriormente se utilizaron los criterios establecidos por Invías (2013) para el diseño de mezclas drenantes: i) los vacíos con aire de la mezcla (AASHTO T 269) no deben ser inferiores al 20 % y superiores al 25 %; ii) la pérdida por desgaste en el ensayo cántabro (NLT 352, ASTM D7064, INV. E-760-13) no debe ser superior al 25 % en seco; iii) el tiempo que tardan 100 ml de agua en atravesar la muestra no deberá exceder 15 segundos; iv) el porcentaje de asfalto no debe ser inferior al 4,5 % con respecto al peso de los agregados. Lo anterior con el fin de fabricar nuevas briquetas de 1000 g compactadas

a 50 golpes por cada cara (cinco por cada contenido de asfalto CA=4,0 %, 4,5 % y 5,0 % y GCR/CA=17 % en peso) para evaluar la resistencia bajo carga monótonica a través del ensayo Marshall (AASHTO T 245-97, 2004), y la rigidez bajo carga cíclica mediante la determinación del módulo resiliente (AASHTO TP31) a tres temperaturas (10 °C, 20 °C y 30 °C) y frecuencias de carga (2,5 Hz, 5 Hz y 10 Hz). Cada ensayo de módulo resiliente fue realizado sobre nueve muestras (tres por cada temperatura) fabricadas de la misma forma como se manufacturaron las briquetas para los ensayos Cántabro y Marshall.

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

En las figuras 1-3 se presentan los resultados del ensayo Cántabro realizados sobre las mezclas drenantes convencional MD (sin aditivo, GCR/CA=0 %) y modificada MD-M (GCR/CA=17 %). Para el caso de la mezcla asfáltica drenante MD convencional (figura 1) se observa que la mayor resistencia al desgaste por abrasión en seco lo experimenta cuando se fabrica con un contenido de asfalto CA=5,0 %. En este porcentaje de asfalto, las mezclas desarrollan un desgaste por abrasión inferior al máximo especificado por Invías (2013) de 25 % para cualquier temperatura de mezcla utilizada. Este criterio de máximo desgaste por abrasión lo cumple adicionalmente la mezcla convencional cuando es fabricada a temperatura de 130 °C para cualquier porcentaje de asfalto empleado, y con un porcentaje de asfalto de 4,5 % y temperaturas de mezcla de 110 °C y 130 °C. Para el caso del desgaste por abrasión bajo condición húmeda se observa que la mayor resistencia la experimenta la mezcla fabricada con un contenido de asfalto CA=4,5 % bajo temperatura de mezcla de 130 °C (pérdida en húmedo de 64,56 %). Este valor es superior al máximo exigido por la especificación Invías (2013) de 45 % para el diseño de mezclas MD. En síntesis, para el caso de la mezcla asfáltica convencional, el mejor comportamiento al desgaste por abrasión lo desarrolla la mezcla fabricada



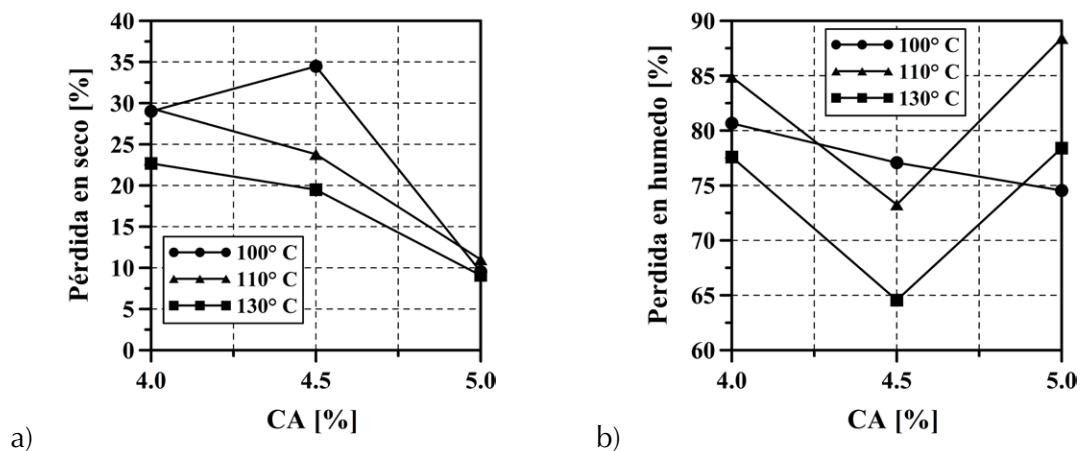
bajo temperatura de mezcla de 130 °C y contenido de asfalto CA=4,5 %.

Para el caso de las mezclas drenantes modificadas con GCR (MD-M) y fabricadas combinando el asfalto y el material pétreo a 160 °C, se observa una disminución notable de la resistencia al desgaste por abrasión en seco y húmedo cuando se comparan con las mezclas de control convencionales MD (figura 2). Tan solo las mezclas MD-M con contenido de asfalto CA=5,0 % cumplen el requisito mínimo de desgaste por abrasión en seco requerido por Invías (2013), y la resistencia bajo condición húmeda disminuye ostensible. Contrario a lo anterior, cuando en las mezclas MD-M se combina el asfalto y el material pétreo a 170 °C, la resistencia al desgaste por abrasión en seco y húmedo aumenta con respecto a la de control MD (figura 3). Para un contenido de asfalto CA=4,5 % (mínimo exigido por Invías, 2013), el mejor comportamiento al desgaste por abrasión en seco y húmedo lo desarrolla la mezcla MD-M fabricada bajo temperatura de mezcla de 170 °C con una compactación de 160 °C (disminución de 31 % y 10 % en las pérdidas por desgaste por abrasión en seco y húmedo respectivamente). Lo anterior indica que el GCR requiere de altas temperaturas para poderse mezclar con el asfalto. En síntesis, la

mejor respuesta de las mezclas se reporta cuando aumenta la temperatura en la cual se combinan los elementos constituyentes: asfalto-GCR-agregados pétreos (temperatura de mezcla de 170° C entre el asfalto modificado y material pétreo, a una temperatura de compactación de 160°C). Lo anterior se debe principalmente a que el asfalto en combinación con el GCR incrementa la viscosidad del ligante base, requiriendo mayores temperaturas para alcanzar un estado de fluidez óptimo que le permita adherirse mejor al agregado pétreo (manejabilidad y compactabilidad de la mezcla).

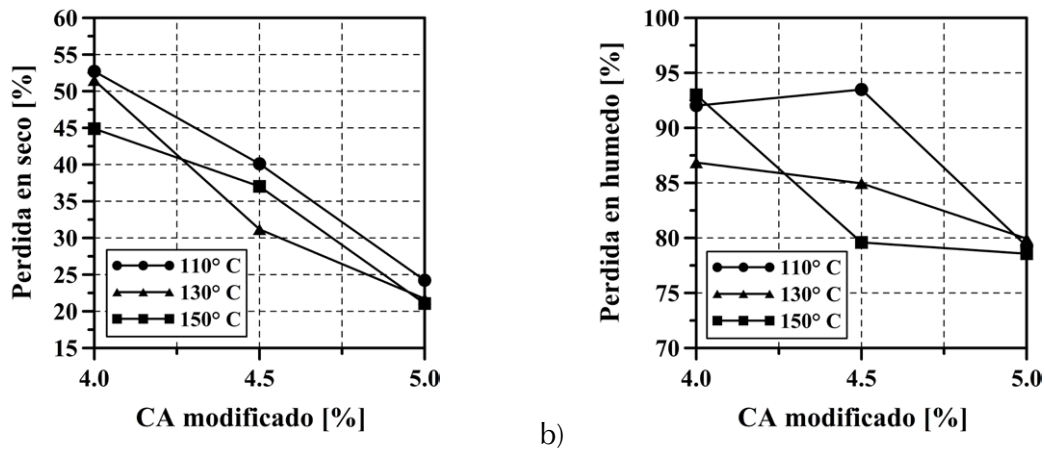
### Ensayo de resistencia bajo carga monótonica (Marshall)

Para la ejecución del ensayo Marshall se fabricaron briquetas con contenidos de CA=4,5 %, GCR/CA=17 %, temperatura de combinación entre el asfalto y GCR de 170 °C y de mezcla con el agregado pétreo de 170 °C. Estos parámetros fueron escogidos teniendo en cuenta los resultados anteriormente presentados de desgaste por abrasión en el ensayo Cántabro y los criterios redactados en el capítulo de metodología. En la tabla 6 se presentan los resultados obtenidos de la prueba de resistencia bajo carga monótonica (Marshall). Se reporta



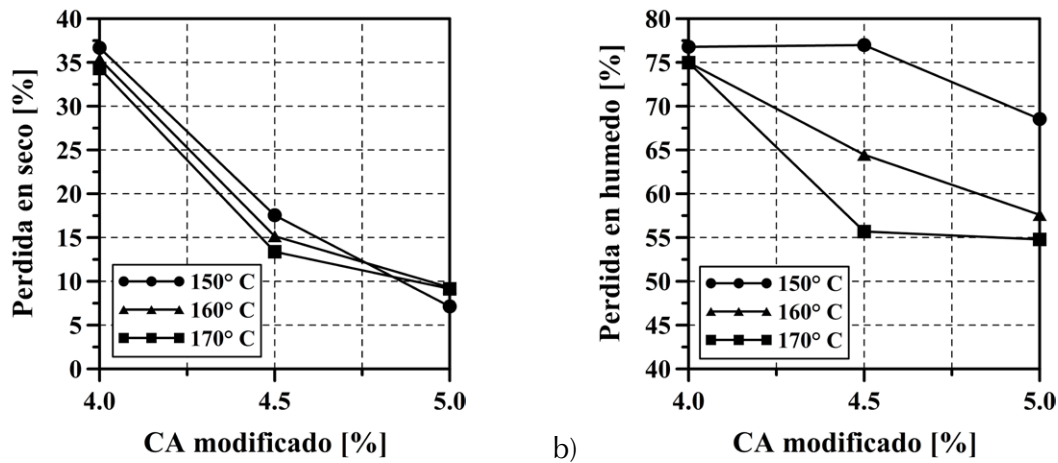
**Figura 1.** Desgaste por abrasión en mezclas drenantes convencionales (sin aditivo GCR) variando la temperatura de compactación

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 2.** Desgaste por abrasión en mezclas drenantes con aditivo GCR variando temperaturas de compactación. Temperatura de mezcla entre asfalto modificado con (GCR) y material pétreo: 160° C.

Fuente: elaboración propia.



**Figura 3.** Desgaste por abrasión en mezclas drenantes con aditivo variando temperaturas de compactación. Temperatura de mezcla entre asfalto modificado con (GCR) y material pétreo: 170° C.

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 6.** Resumen de estabilidad-flujo y relación estabilidad/flujo

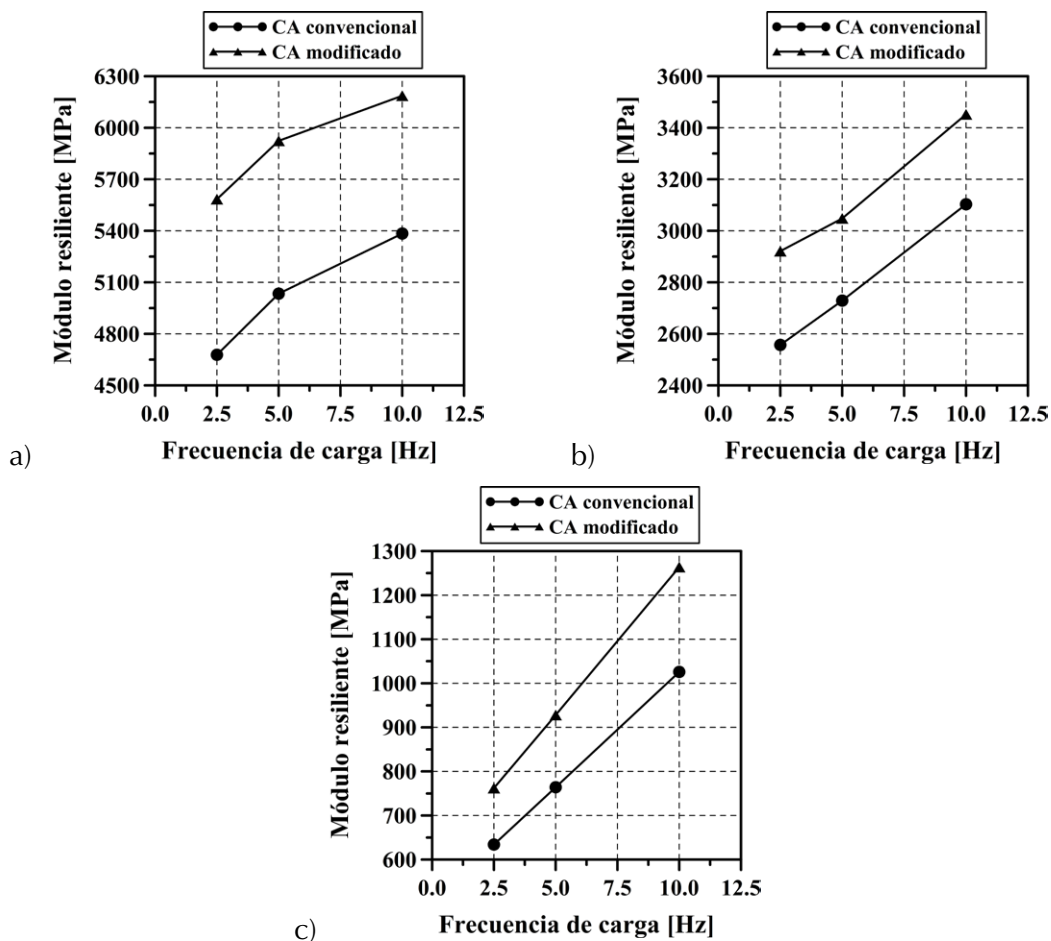
Mezcla	CA [%]	GCR/CA [%]	Flujo [mm]	E [kN]	E/F [kN/mm]
GCR/CA=0%	4,5	0	4,83	38,5	7,98
GCR/CA=17%	4,5	17	4,04	65,5	16,21

Fuente: elaboración propia.

un incremento significativo en la estabilidad (E) y relación estabilidad/flujo (E/F) de la mezcla asfáltica modificada con GCR, lo que induce a pensar que de manera directa la mezcla drenante modificada MD-M es más resistente bajo carga monotónica, y de manera indirecta, más resistente al fenómeno de acumulación de las deformaciones permanentes (ahuellamiento) a altas temperaturas de servicio. El uso de GCR (MD-M) incrementa E y E/F en 70,1 % y 103,1 %, respectivamente, con respecto a la mezcla MD que no lo utiliza. Lo anterior se debe principalmente al incremento en rigidez que desarrolla el asfalto cuando se modifica con el GCR.

## Módulo resiliente

Para la ejecución del ensayo de módulo resiliente también fueron fabricadas briquetas con contenidos de CA=4,5 %, GCR/CA=17 %, temperatura de combinación entre el asfalto y GCR de 170 °C y de mezcla con el agregado pétreo de 170 °C. En la figura 4 se presenta la evolución del módulo resiliente de las mezclas drenantes convencional MD (sin aditivo, GCR/CA=0 %) y modificada MD-M (GCR/CA=17 %). Se observa un incremento típico en los valores de módulo resiliente cuando disminuye la temperatura e incrementa la frecuencia de carga. Adicionalmente se reporta un incremento



**Figura 4.** Módulos resilientes para mezclas MD sin modificar y modificadas con GCR. a) 10 °C; b) 20 °C; c) 30 °C

**Fuente:** elaboración propia.

significativo en la rigidez bajo carga cíclica cuando la mezcla drenante se modifica con GCR. El incremento promedio en el módulo es de aproximadamente 17 % para cualquier temperatura de ensayo. Este incremento en el módulo es debido principalmente a la mayor rigidez y viscosidad que desarrolla el asfalto base cuando se modifica con el GCR.

## CONCLUSIONES

El presente estudio midió la resistencia al desgaste por abrasión, bajo carga monotónica y cíclica que experimentó una mezcla asfáltica drenante cuando se modificó por vía húmeda con GCR. Con el fin de evaluar dichas resistencias, se adelantaron ensayos Cántabro, Marshall y módulo resiliente. A partir de los resultados se concluye:

- El cemento asfáltico base incrementa su viscosidad y rigidez cuando se adiciona GCR por vía húmeda.
- Las temperaturas de mezcla entre el asfalto y el GCR, así como la de mezcla entre el asfalto ya modificado y el agregado pétreo, influyen notoriamente en el comportamiento de la mezcla drenante modificada. Se reporta una disminución notoria en la resistencia al desgaste por abrasión cuando las mezclas drenantes modificadas con GCR son fabricadas a 160° C y su temperatura de compactación es de 150 °C. Sin embargo, cuando se mezcla a 170 °C dicha resistencia incrementa, específicamente para una temperatura de compactación de 160 °C comparados con las mezclas convencionales sin aditivo y un porcentaje de CA del 4,5%.
- La resistencia bajo carga monotónica y la rigidez bajo carga cíclica de la mezcla drenante incrementa significativamente cuando se modifica con GCR.
- El mejor comportamiento de la mezcla analizada se alcanzó cuando se empleó un contenido de asfalto CA=4,5 % en peso, GCR/CA=17 % en peso, temperatura de mezcla entre el asfalto

y el GCR por vía húmeda de 170 °C y temperatura de mezcla entre el asfalto modificado y el agregado pétreo de 170° C, con una temperatura de compactación de 160°C.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, A.E.; Martín, A.E. y Estakhri, C. (2011). A review of mix design and evaluation research for permeable friction course mixtures. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1159–1166.
- Anderson, K.W.; Pierce, L.M.; Uhlmeier, J.S. y Weston, J. (2008). *Evaluation of long-term pavement performance and noise characteristics of open-graded friction courses*. Post Construction and Performance Report, Experimental Feature WA 05-06, Contract 7134, WA-RD 683.1. Washington.
- Bahia, H.U. y Davies, R. (1994). Effect of crumb rubber modifiers CRM on performance-related properties of asphalt binders. *J. Assoc. Asph. Paving Technol.*, 63, 414–449.
- Botero, J.H.; Valentín, M.O.; Suárez, O.M.; Santos, J.; Acosta, F.J.; Cáceres, A. y Pando, M.A. (2005). Gomas trituradas: estado del arte, situación actual y posibles usos como materia prima en Puerto Rico. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 5(1), 69-86.
- Cao, W. (2007). Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process. *Construction and Building Materials*, 21, 1011-1015.
- Cao, W.D.; Yao, Z.Y.; Shang, Q.S.; Li, Y.Y. y Yang, Y.S. (2011). Performance evaluation of large stone porous asphalt-rubber mixture. *Advanced Materials Research*, 150-151, 1184–1190.
- Carlson, D.D. y Zhu, H. (1999). *Asphalt-Rubber—An anchor to crumb rubber markets*. Third Joint UNCTAD/IRSG Workshop on Rubber and the Environment. Veracruz, México: International Rubber Forum.
- Cetin, A. (2013). Effects of crumb rubber size and concentration on performance of porous asphalt mixtures. *International Journal of Polymer Science*, ID789612, 1-10.

- Choubane, B.; Sholar, G.A.; Musselman, J.A. y Page, G.C. (1999). Ten-year performance evaluation of asphalt-rubber surface mixes. *Transportation Research Record*, 1681, 10-18.
- Cooper, S.B. Jr.; Mohammad, L.N. y Abadie, C. (2007). *Evaluation of field projects using crumb rubber modified asphaltic concrete*. Report No. FHWA/LA.04/393, LTRC. Louisiana: Louisiana State University.
- Dong, Y. y Tan, Y. (2011). Mix design and performance of crumb rubber modified asphalt SMA. *Geotechnical Special Publication*, 212, ASCE, 78-86.
- Hsu, T.; Chen, S. y Hung, K. (2011). Performance evaluation of asphalt rubber in porous asphalt-concrete mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(3), 342-349.
- Hsu, T.W. y Tseng, K.H. (1996). Effect of rest periods on fatigue response of asphalt concrete mixtures. *Journal of Transportation Engineering*, 122(4), 316-322.
- Huang, S.C. (2008). Rubber concentrations on rheology of aged asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(3), 221-229.
- Huang, Y.; Bird, R.N. y Heidrich, O. (2007). A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(1), 58-73.
- Ibrahim, M.R.; Katman, H.Y.; Karim, M.R.; Koting, S. y Mashaan, N.S. (2014). The effect of crumb rubber particle size to the optimum binder content for open graded friction course. *The Scientific World Journal*, ID 240786, 1-8.
- Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) (2011). *Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público para Bogotá D.C.* Bogotá D.C.
- Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y Universidad de los Andes (septiembre de 2002). *Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas*. Informe Final. Bogotá D.C.
- Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y Universidad de los Andes (2005). *Segunda fase del estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas – Pista de prueba*. Reporte Final, Contrato IDU – 306 – 003.
- Instituto Nacional de Vías (Invías) (2013). *Especificaciones generales para construcción de carreteras*. Bogotá D.C.
- Katman, H.Y.; Karim, M.R.; Mahrez, A. e Ibrahim, M.R. (2005). Performance of wet mix rubberised porous asphalt. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5, 695-708.
- Khodary, M.H.F. (2010). *Evaluation of fatigue resistance for modified asphalt concrete mixtures based on dissipated energy concept*. Darmstadt: Technische Universität.
- Kumar, P.; Mehndiratta, H.C. y Singh, K. (2010). Comparative study of rheological behavior of modified binders for high-temperature areas. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(10), 978-984.
- Lee, S.J.; Amirhanian, S.N.; Putman, B.J. y Kim, K.W. (2007). Laboratory study on the effects of compaction on the volumetric and rutting properties of CRM asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(12), 1079-1089.
- Lu, Q. y Harvey, J. (2011). Laboratory evaluation of open-graded asphalt mixes with small aggregates and various binders and additives. *Transportation Research Record*, 2209, 61–69.
- Magalhães, J.H. y Soares, J.B. (diciembre de 2003). The effect of crumb rubber gradation and binder-rubber interaction time on the mechanical properties of asphalt-rubber mixtures (dry process). En: *Asphalt Rubber Conference Papers*. Brasilia, Brasil.
- Nelson, P.M. y Abbott, P.G. (1990). Acoustical performance of previous Macadam surfaces for high-speed roads. *Transportation Research Record*, 1265, 25–33.
- Neto, S.A.D.; Farias, M.M.; Pais, J.C.; Pereira, P. y Picado Santos, L. (diciembre de 2003). Properties of asphalt-rubber binders related to characteristics of the incorporated crumb rubber. En: *Asphalt Rubber Conference* (pp. 1-13). Brasilia, Brasil.
- Othman, A. (2006). Fracture resistance of rubber-modified asphaltic mixtures exposed to high-temperature cyclic aging. *Journal of Elastomers and Plastics*, 38, 19-30.
- Partl, M.N.; Pasquini, E.; Canestrari, F. y Virgili, A. (2010). Analysis of water and thermal sensitivity of

- open graded asphalt rubber mixtures. *Construction and Building Materials*, 24(3), 283–291.
- Peralta, J.; Silva, H.M.R.D.; Machado, A.V.; Pais, J.; Pereira, P.A.A. y Sousa, J.B. (2010). Changes in rubber due to its interaction with bitumen when producing asphalt rubber. *Road Materials and Pavement Design*, 11(4), 1009–1031.
- Punith, V.S.; Xiao, F. y Amirkhanian, S.N. (2011). Effects of moist aggregates on the performance of warm mix asphalt mixtures containing non-foaming additives. *Journal of Testing and Evaluation*, 39(5), 1-11.
- Punith, V.S.; Suresha S.N.; Sridhar, R.; Sunil, B. y Veeraragavan, A. (2012). Laboratory investigation of open-graded friction course mixtures containing polymers and cellulose fibers. *Journal of Transportation Engineering*, 138(1), 67-74.
- Punith, V.S.; Xiao, F. y Amirkhanian, S.N. (2011). Effects of moist aggregates on the performance of warm mix asphalt mixtures containing non-foaming additives. *Journal of Testing and Evaluation*, 39(5), 1-11.
- Putman, B.J. (2005). *Qualification of the effects of crumb rubber in CRM binder*. Ph.D. Disertación. Carolina del Sur, EE.UU.: Clemson University.
- Rondón, H.A. y Reyes, F.A. (2015). *Pavimentos – Materiales, Construcción y Diseño*. Bogotá: Editorial ECOE.
- Rondón, H.A. y Fernández, W. (2014). Mechanical resistance of a chemically-modified warm mix asphalt. *Revista Tecnura, Special Edition Doctorate*, 18, 97-108.
- Rondón, H.A.; Sánchez, E.H. y Castaño, J.O. (2014). Resistencia bajo carga monotónica de mezclas de concreto asfáltico modificadas con gilsonita por vía seca. *Revista Tecnura, Edición especial*, 18, 31-37.
- Ruiz, A.; Alberola, R.; Perez, F. y Sánchez, B. (1990). Porous asphalt mixtures in Spain. *Transportation Research Record*, 1265, 87–94.
- Shen, J.; Amirkhanian, S.N. y Lee, S.J. (2007). HP-GPC characterization of rejuvenated aged CRM binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(6), 515-522.
- Singh, S.; Nimmo, W.; Gibbs, B.M. y Williams, P.T. (2009). Waste tyre rubber as a secondary fuel for power plants. *Fuel*, 88(12), 2473-2480.
- Tahmoressi, M. (2001). *Evaluation of asphalt rubber pavements in Texas*. Rubber Pavements Association Report. Tempe, Arizona.
- Wang, L.; Chang, C.Q.; Xing, Y. y Xing, Y.M. (2009). Viscoelastic mechanical properties of crumb rubber modified asphalt mixture. En: *ICCTP 2009: Critical Issues in Transportation Systems Planning, Development, and Management, ASCE*, 2153-2158.
- Wang, J.C. y Zeng, X. (2006). Influence of temperature and pressure on the dynamic properties of rubber-modified asphalt concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(1), 125-131.
- West, R.C.; Watson, D.E.; Turner, P.A. y Casola, J.R. (2010). *Mixing and compaction temperatures of asphalt binders in hot-mix asphalt*. NCHRP Report 648. Washington D.C: TRB.
- Xiao, F. y Amirkhanian, S.N. (2009). HP-GPC Approach to evaluating laboratory prepared long-term aged rubberized asphalt binders. En: *GeoHunan International Conference 2009, Geotechnical Special Publication*, 191, 42-48.
- Zhong, X.G.; Zeng, X. y Rose, J.G. (2002). Shear modulus and damping ratio of rubber-modified asphalt mixes and unsaturated subgrade soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(6), 496-502.
- Zoorob, S.E.; Castro, J.P. y Pereira, L.A. (2012). Assessing low shear viscosity as the new bitumen softening point test. *Construction and Building Materials*, 27(1), 357–367.

