

Comportamiento de una mezcla asfáltica tibia fabricada en una planta de asfalto

Behavior of a warm mix asphalt made in an asphalt plant

Hugo Alexander Rondón Quintana*
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Oswaldo Ignacio León Vergara**
CONCRESCOL S. A.

Wilmar Darío Fernández Gómez***
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

* Doctor en Ingeniería. Profesor asociado Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. harondonq@udistrital.edu.co.

** Ingeniero civil. Director técnico, CONCRESCOL S.A. oleon@concrecol.com.

*** Doctor en Ingeniería. Profesor asociado Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. wfernandez@udistrital.edu.co.

Correspondencia: Hugo Alexander Rondón Quintana. Carrera 8a n° 153-51, torre 3, apartamento 1202. Bogotá, D.C., Colombia. Tel. (57) 1 3540643. Tel. móvil: 310 8687715.

Resumen

Este artículo presenta los resultados de una fase experimental diseñada para evaluar y comparar la resistencia mecánica que experimenta una mezcla asfáltica tibia con una en caliente cuando ambas son fabricadas a escala real en una planta de asfalto de bacheo. Para tal fin fueron realizados ensayos de resistencia bajo carga monotónica (Marshall y tracción indirecta) y cíclica (módulo resiliente, deformación permanente y resistencia a fatiga). Para la fabricación de la mezcla tibia se empleó un aditivo químico que espuma el asfalto a aproximadamente 80 °C. Como ligante, para la fabricación de las mezclas se utilizó cemento asfáltico CA 60-70. La granulometría de control utilizada fue la de una mezcla densa en caliente MDC-19 [1]. Esta mezcla de control se fabricó y compactó a temperaturas de 150 y 140 °C, respectivamente. Para el caso de la mezcla tibia, estas temperaturas fueron de 120 y 110 °C, respectivamente. Como conclusión general se reporta que la resistencia mecánica de la mezcla asfáltica tibia fabricada en planta de asfalto es superior a la de control en caliente, a pesar de que la primera fue fabricada y compactada a 30 °C menos.

Palabras clave: aditivo químico, mezcla asfáltica modificada, mezcla asfáltica tibia, planta de asfalto.

Abstract

A relatively recent development in asphalt pavement technology, warm mix asphalt (WMA) offers a number of benefits. We present a comparison of some mechanical properties of warm mix asphalt (WMA) made in an asphalt plant batch with a traditional Hot Mix Asphalt (HMA). WMA mixture was made with asphalt cement CA 60-70 and a chemical additive that foams the asphalt at 80 °C. WAM was mixed and compacted at 120 °C and 110 °C, respectively. The control mixture (HMA) was a Dense Graded Mixture MDC-19 proposed by [1], was made with the same materials and mixed and compacted at 150 and 140 °C. Mechanical properties were evaluated under two loading modes: monotonic load (Marshall and indirect tensile test) and dynamic loads (resilient modulus, permanent deformation and fatigue). Results showed that mechanical properties of Warm Mixed Asphalts are better than control mixture.

Keywords: asphalt plant, chemical additive, hot mix asphalt, and warm mix asphalt.

Fecha de recepción: 15 de enero de 2016
Fecha de aceptación: 1 de septiembre de 2016

INTRODUCCIÓN

En Colombia, a la fecha de elaboración de este artículo no existe especificación sobre mezclas asfálticas tibias. Internacionalmente son conocidas como mezclas WMA (por sus siglas en inglés).

Con base en la temperatura empleada para fabricar mezclas asfálticas en plantas especializadas de asfalto se han establecido las siguientes cuatro denominaciones: mezclas en frío - CMA (temperatura inferior a 60 °C), mezclas semitibias - HWMA (temperatura entre 60 y 100 °C), mezclas tibias - WMA (temperatura entre 100 y 140 °C) y mezclas en caliente - HMA (temperatura entre 140 y 190 °C).

Se denomina mezcla asfáltica tibia (WMA) a aquella que mediante el uso de diferentes técnicas logra reducir las temperaturas de mezclado y compactación de una mezcla asfáltica caliente sin alterar demasiado la calidad de la mezcla asfáltica resultante.

De acuerdo con [2], la disminución mínima de la temperatura de fabricación de mezcla en la planta de asfaltos debe ser de 28 °C para denominarse WMA. Sin embargo, investigadores como [3] mencionan que dicha disminución debe alcanzar los 40 °C.

La reducción de las temperaturas de mezclado y compactación trae consigo una disminución en la energía requerida para la elaboración de la mezcla y de las emisiones a la atmósfera [2] - [8].

Según [9], [10], mezclas WMA generan menores emisiones contaminantes durante su proceso de fabricación y construcción en comparación con mezclas HMA, y el ahorro de energía es de aproximadamente 30%. De acuerdo con [11], la reducción de CO₂, SO₂, compuestos orgánicos volátiles, CO, NOx y cenizas es de 30 - 40 %, 35, 50, 10 - 30 %, 60 - 70 % y 20 - 25 %, respectivamente, en comparación con mezclas HMA. Adicionalmente, reportan un ahorro en costo de combustibles superior al 40 %, y dicho ahorro es mayor cuanto más costoso sea el combustible en el país donde se desarrolle la tecnología WMA.

Desde el punto de vista técnico se reporta, por lo general, menor oxidación y envejecimiento a corto plazo del ligante asfáltico en mezclas WMA. Lo

anterior debido a las menores temperaturas que se generan durante los procesos de fabricación, extensión y compactación de este tipo de mezcla. Esto incide en un aumento en la resistencia a fatiga por carga, al agrietamiento por bajas temperaturas y por oxidación del tipo *Top-Down* TDC [12] - [17].

Existen diferentes evidencias *in situ* y de laboratorio que demuestran que mezclas WMA pueden experimentar propiedades comparables e incluso superiores a las HMA [14], [18] - [23]. Sin embargo, en algunos casos, las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas WMA son menores en comparación con las de mezclas HMA, principalmente en la resistencia al ahuellamiento y al daño por humedad [24] - [27]. Las menores temperaturas de fabricación pueden generar un secado insuficiente del agregado pétreo en las plantas de asfalto, lo cual produce pérdida de adherencia entre el agregado pétreo y el ligante asfáltico [25], [28] - [35]. Lo anterior produce mezclas más susceptibles al daño por humedad y al fenómeno de *stripping*.

Existen tres metodologías generales de fabricación de mezclas tipo WMA: modificar el asfalto con aditivos orgánicos, con aditivos químicos y espumar el asfalto. Entre los aditivos químicos se pueden encontrar el Cecabase®, el RTEvotherm®, el HyperTherm®, el Rediset WMX®, el Qualitherm® y el SonneWarmmix®, y entre los orgánicos se encuentran el Sasobit®, el Thio-pave®, el TLA-X®, el REVIX™ y el Asphaltan-B, entre otros. Estos aditivos suelen mezclarse con el asfalto antes de entrar al tambor mezclador en la planta de asfalto (vía húmeda).

La técnica de espumar el asfalto se ha utilizado durante más de 50 años para producir mezclas asfálticas en frío. Algunas metodologías utilizan zeolitas sintéticas o materiales químicos que se introducen al agregado pétreo para espumar el asfalto, disminuir su viscosidad y mejorar así el recubrimiento de los agregados pétreos y la trabajabilidad de la mezcla durante su proceso de fabricación. Algunas zeolitas naturales son piedras que al ser calentadas producen gran cantidad de vapor de agua. Este vapor de agua liberado, al entrar en contacto con el asfalto, lo espuman. De acuerdo con [2], las zeolitas son minerales que tienen aproximadamente 20 % en peso de agua atrapada en su estructura porosa. Por calentamiento a aproximadamente 85 °C, el agua se libera, y cuando esto se hace en presencia del asfalto en caliente, este se espuma.

Dos zeolitas muy utilizadas en el mundo son la Aspha-Min® y la Advera® (desarrolladas por Hubbard Group y PQ Corporation). Otros aditivos utilizados para espumar asfaltos son AccuShear, Aquablack foam, AquaFoam, Double Barrel Green/Green Pac, ECOFOAM-II, Low Emission Asphalt (LEA), Meeker Warm Mix foam, Terex foam, Tri-Mix foam, Ultrafoam GX, WAM-Foam y LT Asphalt.

Otra técnica para espumar asfalto consiste en combinar el ligante asfáltico en caliente con chorros a presión de agua (también denominada de asfaltos celulares). Es una tecnología utilizada principalmente para estabilización de materiales granulares no tratados o para la fabricación de mezclas en frío y recicladas. Consiste en adicionar agua fría (1 a 2 % del peso del asfalto) y aire a presión, en una “cámara de expansión”, a un cemento asfáltico que se encuentra a alta temperatura (160-180 °C) con el fin de espumarlo, incrementar su volumen rápidamente (alrededor de 15 veces), reducir la viscosidad del ligante e incrementar la adherencia entre el asfalto y el agregado pétreo.

Espumar el asfalto reduce su viscosidad considerablemente y aumenta sus propiedades adherentes y de trabajabilidad [36] en el corto plazo, lo cual lo hace apto para mezclar con agregados fríos y húmedos. A pesar de lo anterior, esta metodología tiene como principal desventaja que el ligante espumado en algunas ocasiones experimenta baja resistencia al daño por humedad, y en este caso existe la necesidad de usar aditivos mejoradores de adherencia y *anti-stripping*.

Otra técnica de espumar asfalto consiste en introducir agregados pétreos húmedos a la mezcla. Se denomina Low-Energy Asphalt® (LEA) y fue desarrollada por Fairco de Zozay, Francia [4].

El proceso consiste en mezclar el cemento asfáltico (por lo general modificado) (entre 135 a 180 °C) con agregados pétreos gruesos en caliente (145 °C), para después incorporar parte de los agregados pétreos finos húmedos a temperatura ambiente. La humedad en los agregados finos (entre el 3 y el 4 %), en combinación con el calor, genera que el asfalto espume. Para el uso de esta tecnología se hace necesario implementar diversas modificaciones a las plantas de asfalto convencionales.

La técnica WAM-Foam®, desarrollada por Shell International Petroleum Company Ltda. y Kolo-Veidekke, consiste en un sistema aglutinante de dos componentes: un cemento asfáltico blando con uno rígido espumado. El asfalto blando se mezcla con el agregado en la primera etapa de producción de la mezcla entre 100 y 120 °C. En una segunda etapa, un cemento asfáltico rígido se espuma a alta temperatura mediante la adición de agua fría (entre 1 a 5 %) y se adiciona dicha espuma a la mezcla obtenida en la primera etapa. La compactación de la mezcla se realiza entre 80 y 110 °C. El cemento asfáltico blando representa en masa entre el 20 y el 30 % del total del asfalto.

A través de la modificación por vía húmeda de un cemento asfáltico tipo CA 60-70 (fabricado por la Empresa Colombiana de Petróleos S. A. - Ecopetrol) con un aditivo denominado HUSIL (el cual es desconocido por los productores de asfaltos), se modificaron las características de viscosidad y trabajabilidad del material base (cemento asfáltico) al espumarlo. Lo anterior con el fin de poder mezclarlo en las plantas de asfaltos con el agregado pétreo a temperaturas más bajas, y así producir una mezcla asfáltica que disminuya las emisiones contaminantes a la atmósfera y el uso de energía durante los procesos de fabricación (mezcla tibia).

El CA 60-70 fue escogido debido a que es el más utilizado en la fabricación de mezclas asfálticas en Colombia. Como mezcla de referencia o de control se utilizó la MDC-19 [1], ya que es la más utilizada en la construcción de capas de rodadura en proyectos de pavimentación vial.

El proyecto evaluó el comportamiento que experimentó la mezcla desarrollada cuando fue sometida a cargas monotónicas (Marshall y tracción indirecta), dinámicas (módulo resiliente, resistencia a la deformación permanente y fatiga) y al daño por humedad. Adicionalmente se evaluó la respuesta reológica que experimenta el asfalto cuando se modifica con el aditivo. Las mezclas asfálticas ensayadas fueron fabricadas a escala real en una planta de asfalto. El nombre técnico-comercial del aditivo y las características químicas no se darán a conocer porque se prevé un posible desarrollo tecnológico o secreto industrial.

El aditivo espuma los asfaltos colombianos a aproximadamente 80 °C, lo cual lo hace ideal para disminuir la temperatura de fabricación, al facilitar el recubrimiento del asfalto con los agregados pétreos.

METODOLOGÍA

Fase experimental en laboratorio

Caracterización del agregado pétreo y el asfalto

En las tablas 1 y 2 se presentan los valores obtenidos de los ensayos de caracterización ejecutados al agregado pétreo y al asfalto CA 60-70, respectivamente. Se observa en las tablas que ambos materiales cumplen los requisitos mínimos de calidad exigidos para la fabricación de mezclas asfálticas.

Tabla 1. Caracterización del agregado pétreo

Ensayo	Método	Requisito	Resultado
Equivalente de arena	AASHTO T 176 – 02	50 % mínimo	76 %
Caras fracturadas a una cara	ASTM D 5821-01	75 % mínimo	87 %
Límites líquido y plástico	ASTM D 4318-00	0 %	0 %
Índice de alargamiento	NLT 354-91	10 % máximo	9.5 %
Índice de aplanamiento	NLT 354-91	10 % máximo	9.5 %
Ataque en sulfato de magnesio	ASTM C 88-99a	18 % máximo	12.9 %
Micro-Deval	AASHTO T327-05	25 % máximo	22.3 %
10 % de finos (resistencia en seco)	DNER-ME 096-98	90 kN mínimo	115 kN
10 % de finos (relación húmedo/seco)		75 % mínimo	83 %
Resistencia en Máquina de los Ángeles	AASHTO T 96 - 02	35 % máximo	24.6 %

Tabla 2. Características generales del CA 60 - 70

Ensayo	Método	Unidad	Requisito		Valor
			Mínimo	Máximo	
Ensayos sobre el CA original					
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0.1 mm	60	60	62.5
Índice de penetración	NLT 181/88	-	-1.2	+0.6	-0.7
Punto de ablandamiento	ASTM D-36-95	° C	48	54	52.5
Viscosidad absoluta (60 °C)	ASTM D-4402	Poises	1500	-	1750
Gravedad específica	AASHTO T 228-04	-	-	-	1.012
Viscosidad a 135° C	AASHTO T-316	Pa-s	-	-	0.36
Ductilidad (25 °C, 5cm/min)	ASTM D-113	cm	100	-	>105

Ensayo	Método	Unidad	Requisito		Valor
			Mínimo	Máximo	
Ensayos sobre el residuo del CA luego del RTFOT					
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	-	0.8	0.47
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s), en porcentaje de la penetración original	ASTM D-5	%	50	-	72
Incremento en el punto de ablandamiento	ASTM D-36-95	° C	-	9	5

Caracterización del asfalto modificado

El aditivo químico líquido empleado (HUSIL) actúa como una zeolita sintética, es un material inorgánico que no inflama, y no es considerado peligroso o material contaminante por el "Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals" [37]. Adicionalmente es un material que presenta valores de pH entre 10 y 12, y no es considerado cancerígeno o teratogénico. El aditivo inicialmente se agregó al asfalto en proporciones de 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 2.5, 5.0, 7.5 y 10.0 % con respecto a su masa (HUSIL/CA=0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 2.5, 5.0, 7.5 y 10.0 %). La mezcla entre el asfalto y el aditivo se realizó a una temperatura de 80 °C durante 1 minuto. Esta temperatura y tiempo de mezcla fueron escogidos teniendo en cuenta que el aditivo espuma el asfalto aproximadamente a 80 °C y no se quería perder el efecto del espumado sometiéndolo a tiempos de mezcla elevados. Sobre el asfalto modificado se ejecutaron ensayos de peso específico (AASHTO T 228-04), penetración (ASTM D-5), punto de ablandamiento (ASTM D-36-95), ductilidad (ASTM D-113) y punto de inflamación (AASHTO T79). Adicionalmente fueron ejecutados ensayos de caracterización reológica a temperaturas altas e intermedias de servicio empleando un reómetro dinámico de corte (AASHTO T 315-05). Para el análisis reológico fue utilizado el asfalto modificado en una proporción de HUSIL/CA=1%. Este porcentaje fue escogido con base en los resultados reportados por el grupo de investigación en un estudio similar ejecutado en laboratorio [38] - [40].

Con el fin de ejecutar una fase de caracterización química del asfalto modificado, se realizó un ensayo de espectroscopia infrarroja, siguiendo la metodología recomendada por la especificación ASTM D7418-12 y empleando un equipo Nicolet iS50 FT-IR. En la figura 1 se presentan los

resultados del ensayo. Se observa que el efecto del envejecimiento a corto plazo (ocurrido durante los procesos de fabricación de mezcla en planta de asfalto, y extensión y compactación de la misma en obra) es casi nula sobre el asfalto modificado. Los números de onda relacionados a la oxidación fueron de 1030 y 1700 cm^{-1} . Estas magnitudes describen grupos Sulfóxido ($\text{S}=\text{O}$) y Carbonilo ($\text{C}=\text{O}$), respectivamente, los cuales se forman durante el envejecimiento. Adicionalmente se observa que los asfaltos modificados con HUSIL no reportan en el espectro ningún pico, lo cual significa que el oxígeno no se une con azufres o átomos de carbono y, por lo tanto, la oxidación es baja o inexistente.

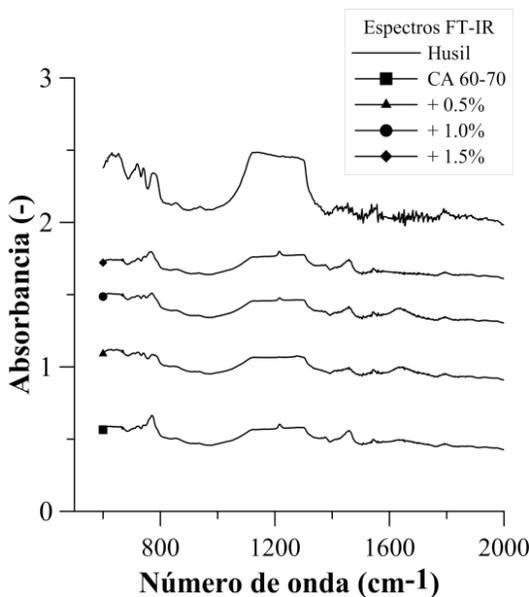


Figura 1. Espectro FT-IR del aditivo HUSIL, del CA 60-70 y del asfalto modificado

Mezcla asfáltica tibia fabricada en planta de asfalto

Durante la ejecución del estudio era importante conocer si el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica tibia era posible de realizar a escala real en una planta de asfalto. Ya en estudios anteriores [38] - [40] la mezcla había sido analizada a nivel de laboratorio, y demostró buen comportamiento mecánico y durabilidad. Por tal motivo se gestionó la producción en una planta de bacheo de un metro cúbico de mezcla en caliente convencional

tipo MDC-19 mezclando los materiales (asfalto y agregado pétreo) a 150 °C, y otro metro cúbico mezclando los mismos materiales más el aditivo HUSIL a 120 °C (WMA-19).

La planta donde se fabricó la mezcla fue escogida debido a que el asfalto y los agregados pétreos que se utilizaron en la fase de laboratorio provenían de dicha planta.

El aditivo se agregó al asfalto y al agregado pétreo en el preciso momento en que estos dos materiales se mezclaban a 120 °C.

Para fabricar la mezcla tibia empleando el aditivo no hubo necesidad de cambiar o modificar la planta de asfalto o alguno de los procesos de producción.

El contenido de asfalto utilizado fue 5.5 %, ya que este es el que la planta de asfalto utiliza normalmente para producir mezclas tipo MDC-19 con base en el diseño que ellos han establecido durante sus años de servicio fabricando mezclas de este tipo. El contenido de aditivo HUSIL agregado al metro cúbico de mezcla WMA-19 fue de 1 % con respecto a la masa del asfalto ($HUSIL/CA=1\%$). Como ya se mencionó con anterioridad, este porcentaje fue escogido con base en los resultados reportados por el grupo de investigación en un estudio similar ejecutado en laboratorio [38] - [40].

Con el fin de evaluar las propiedades mecánicas de las mezclas MDC-19 y WMA-19 fabricadas en la planta, se manufacturaron 90 briquetas Marshall (45 para mezcla MDC-19 y 45 para WMA-19), siguiendo los lineamientos establecidos en [41]. Con estas muestras se ejecutaron los siguientes ensayos:

1. Marshall (INV. E-748-13). 10 briquetas por tipo de mezcla fueron ensayadas. Las briquetas fueron compactadas a 75 golpes por cara. La temperatura de compactación - TC y de mezcla - TM fueron de 140 y 150 °C para la mezcla de control en caliente (MDC-19) y de 120 y 110 °C para la mezcla WMA-19, respectivamente.
2. Marshall (INV. E-748-13). Sobre muestras sumergidas en agua durante 6 meses, 5 briquetas por tipo de mezcla fueron ensayadas. Estas briquetas fueron compactadas a 50 golpes por cara con el fin de

aumentar su porosidad y facilitar la evaluación del efecto del agua sobre la resistencia bajo carga monotónica en el ensayo Marshall. El agua utilizada provino del acueducto de la ciudad de Bogotá, D.C. Cada tres días durante los seis meses, el agua era cambiada con el fin de no permitir la acumulación de material contaminante en las muestras.

3. Módulo resiliente (ASTM D 4123-82). Sobre la mezcla asfáltica en caliente MDC-19 de referencia (HUSIL/CA = 0%, TM=150 °C) y la tibia WMA-19 (HUSIL/CA = 1%, TM=120 °C) fueron ejecutados ensayos de módulo resiliente (ASTM D 4123 - 82) bajo tres temperaturas (5, 15 y 40 °C) y frecuencias de carga (2.5, 5.0 y 10.0 Hz) utilizando un equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT). Cada ensayo de módulo resiliente fue realizado sobre 9 muestras (3 por cada temperatura). Las briquetas fueron compactadas a 75 golpes por cara, siguiendo los lineamientos establecidos en INV. 748-13.
4. Deformación permanente (UNE-EN 12697-25:2006; CEN, 2005). Cinco briquetas por tipo de mezcla fueron ensayadas. La deformación permanente bajo carga repetida fue medida bajo un esfuerzo de 100 kPa y a 3600 ciclos de carga, utilizando un equipo NAT. Las briquetas fueron compactadas a 75 golpes por cara, siguiendo los lineamientos establecidos en INV. 748-13.
5. Resistencia a fatiga (UNE-EN 12697-24:2012 ANEXO E). Doce briquetas por tipo de mezcla fueron ensayadas. El modo de carga del ensayo fue el de esfuerzo controlado. La temperatura y frecuencia de carga utilizadas en el ensayo fueron 20 °C y 10 Hz, respectivamente. Las briquetas fueron compactadas a 75 golpes por cara, siguiendo los lineamientos establecidos en INV. 748-13.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Asfalto modificado

En la tabla 3 se presentan los resultados de los ensayos realizados sobre el CA 60-70 modificado con HUSIL.

Tabla 3. Caracterización del CA 60-70 modificado con HUSIL

HUSIL/CA [%]	Peso específico [-]	Penetración [mm/10]	Punto de ablandamiento [°C]	Ductilidad [cm]	Punto de Inflamación [°C]
0.0	1.012	62.5	52.5	142.5	326
0.5	1.023	48.8	53.3	87.5	333
1.0	1.030	41.3	52.5	49.0	343
2.5	1.032	43.2	49.0	46.5	354
5.0	1.034	48.3	48.3	65.5	384
7.5	1.036	50.1	47.7	68.5	390
10.0	1.045	52.3	47.4	80.0	404

En la tabla 3 se observa que i) el aditivo incrementa la gravedad específica de la mezcla asfalto-aditivo a medida que incrementa el contenido de HUSIL. Lo anterior es debido principalmente a que el aditivo presenta una mayor gravedad específica (1.32 g/cm^3) que el asfalto CA 60-70 sin modificar (1.012 g/cm^3); ii) el asfalto modificado con el aditivo incrementa su resistencia a inflammar a altas temperaturas; iii) el aditivo tiende a rigidizar notablemente el asfalto, y las mayores rigideces se presentan cuando el aditivo se agrega en proporciones de HUSIL/CA= 0.75 % y 1.0 % (incrementa el punto de ablandamiento y disminuye la penetración); iv) la ductilidad disminuye de manera lógica, ya que el aditivo se rigidiza cuando ocurre el enfriamiento del asfalto modificado, luego de que este ha espumado.

Los resultados de penetración y punto de ablandamiento del asfalto modificado con el aditivo son coherentes con los obtenidos en los ensayos de caracterización reológica a temperaturas altas de servicio. Las tablas 4 y 5 muestran los resultados de caracterización reológica del asfalto de referencia (sin aditivo, HUSIL/CA=0 %) y modificado con HUSIL/CA=1 %, 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 $58 \text{ }^\circ\text{C}$ ($|G^*|/\sin\delta > 1.0 \text{ kPa}$ para asfalto sin envejecer y $|G^*|/\sin\delta > 2.2 \text{ kPa}$ para asfalto envejecido en RTFOT) y $22 \text{ }^\circ\text{C}$ ($|G^*| \times \sin\delta > 5000 \text{ kPa}$ para asfalto envejecido en RTFOT + PAV), respectivamente. G^* , d , RTFOT y PAV 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 HUSIL/CA=1 % 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. Adicionalmente, a temperaturas intermedias, el grado de desempeño mejoró (disminuyó de 22 a 19 °C), debido tal vez a que el aditivo aumenta la resistencia del asfalto al envejecimiento. No se ejecutaron ensayos de caracterización reológica a bajas temperaturas de servicio porque el objeto de estudio fue para países tropicales como Colombia.

Tabla 4. Caracterización reológica del asfalto CA 60-70

Temperatura [°C]	Frecuencia [rad/s]	δ [°]	G^* [Pa]	$ G^* /\sin\delta$ [kPa]	$ G^* \cdot \sin\delta$ [kPa]
CA 60-70 no envejecido					
58	10	87	2470	2.473	2.467
64	10	88	1002	1.00	1.00
70	10	89	453	0.453	0.453
CA 60-70 envejecido en RTFOT					
52	10	83	11062	11.15	10.98
58	10	85	4276	4.29	4.26
64	10	87	1701	1.70	1.70
CA 60-70 envejecido en RTFOT + PAV					
16	10	44	14266000	20537	9910
19	10	45	10193000	14415	7208
22	10	47	6659000	9105	4870

Tabla 5. Caracterización reológica del asfalto modificado (HUSIL/CA=1 %)

Temperatura [°C]	Frecuencia [rad/s]	δ [°]	G^* [Pa]	$ G^* /\sin\delta$ [kPa]	$ G^* \cdot \sin\delta$ [kPa]
CA 60-70 modificado con HUSIL/CA=1%. no envejecido					
64	10	66.5	2358.3	2.57	2.16
70	10	69	1280.5	1.37	1.20
76	10	70	888.2	0.95	0.83
CA 60-70 modificado con HUSIL/CA=1%. envejecido en RTFOT					
64	10	72.4	8685	9.11	8.28
70	10	76.3	4072	4.19	3.96

Temperatura	Frecuencia	δ	G^*	$ G^* /\sin\delta$	$ G^* \cdot \sin\delta$
[°C]	[rad/s]	[°]	[Pa]	[kPa]	[kPa]
76	10	79.8	1899	1.93	1.87
CA 60-70 modificado con HUSIL/CA=1%. envejecido en RTFOT + PAV					
16	10	31.5	11700000	22392	6113
19	10	32.6	8570000	15907	4617
22	10	33.9	6150000	11027	3430

Ensayos ejecutados sobre WMA-19 y MDC-19 fabricada en planta de asfalto

Ensayos Marshall

La tabla 6 presenta el resumen de resultados del ensayo Marshall ejecutado sobre la mezcla en caliente tipo MDC-19 ($T_M=150\text{ °C}$, HUSIL/CA=0%) y la tibia WMA-19 ($T_M=120\text{ °C}$, HUSIL/CA=1 %). Se observa en la tabla que la mezcla WMA-19 presenta un contenido de vacíos similar al de la mezcla MDC-19 (indicador de composición volumétrica similar), a pesar de que la primera fue fabricada a una temperatura de 30 °C menos. Lo anterior es un indicador de que el aditivo mejora el proceso de trabajabilidad y compactibilidad de la mezcla al espumar el asfalto. La rigidez bajo carga monotónica en el ensayo Marshall, evaluada a través de la relación entre la estabilidad y el flujo (E/F), es mayor en la mezcla WMA-19. Adicionalmente se reporta una pérdida de 46.4 % en dicha rigidez cuando las mezclas convencionales MDC-19 son sumergidas en agua durante 6 meses, y de 41.3 % para el caso de las mezclas WMA-19. En síntesis, para el caso del ensayo Marshall, la mezcla tibia WMA-19 experimenta mayor rigidez bajo carga monotónica y resistencia al daño por humedad en comparación con la mezcla de control MDC-19.

Tabla 6. Resumen del ensayo Marshall ejecutado sobre las mezclas MDC-19 y WMA-19

Mezcla	TM [° C]	HUSIL/CA	Estabilidad	Flujo	E/F	Vacíos en la mezcla [%]
		[%]	[N]	[mm]	[kN/mm]	
Sin sumergir						
MDC-19	150	0	12243	3.70	3.31	3.3
WMA-19	120	1	11891	3.52	3.38	3.2
Sumergidas en agua durante 6 meses						
MDC-19	150	0	7464	4.19	1.78	3.3
WMA-19	120	1	8840	4.49	1.97	3.2

Módulo resiliente y deformación permanente

En la figura 2 se presentan los resultados del ensayo de módulo resiliente. Se observa que la mezcla WMA-19 presenta mayor rigidez bajo carga cíclica que la mezcla MDC-19, a pesar de que la primera fue fabricada a una temperatura de mezcla de 30 °C menor que la segunda. Bajo temperatura de ensayo de 5 °C, la mezcla WMA-19 desarrolló en promedio un módulo 1.25 veces superior con respecto al de la mezcla MDC-19, y para 15 °C experimentó entre 1.7 y 1.95 veces mayor módulo. Para 40 °C no es posible hacer este tipo de comparación, ya que las muestras de mezcla MDC-19 se desmoronaron a dicha temperatura y no fue posible ejecutar el ensayo. Por lo anterior, en la figura 2 se reporta para esta mezcla un módulo resiliente igual a 0. Es importante resaltar que, por el contrario, las mezclas WMA-19 desarrollaron módulos resilientes entre 764 y 1743 MPa bajo temperaturas de ensayo de 40 °C. Lo anterior es un indicador de mayor resistencia a la deformación permanente en clima de alta temperatura por parte de la mezcla WMA-19. Estos resultados son coherentes con los presentados en la figura 3, en la que se observa que la mezcla WMA-19 experimenta mayor resistencia a la deformación permanente que la MDC-19.

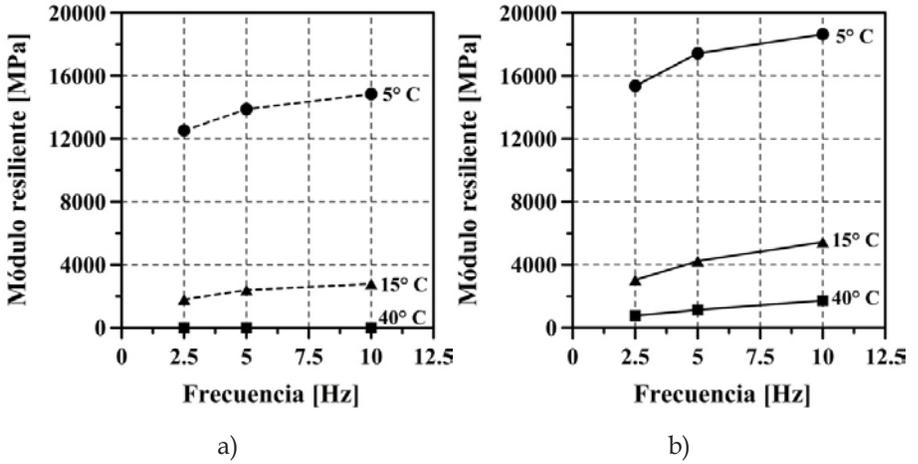


Figura 2. Módulo resiliente. a) MDC-19, b) WMA-19

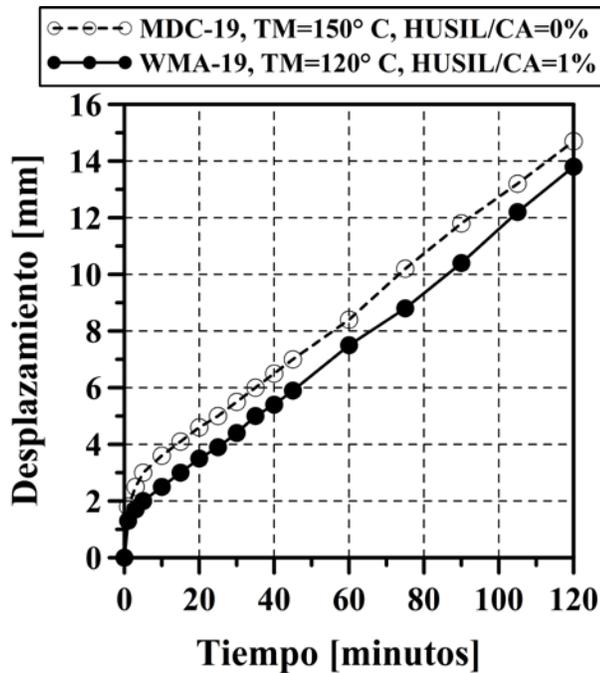


Figura 3. Deformación permanente

Resistencia a fatiga

En la figura 4 se presenta la evolución de la vida a fatiga (número de ciclos de falla) de las mezclas MDC-19 y WMA-19. Se observa que bajo el modo de carga de esfuerzo controlado, la mezcla WMA-19 experimenta mayor resistencia a fatiga en comparación con la de referencia MDC-19, ya que la magnitud del esfuerzo necesario para hacer fallar las mezclas MDC-19 y WMA-19 al millón de ciclos de carga (σ_6) es de 84 kPa y 170 kPa, respectivamente. Asimismo, las pendientes de las leyes de fatigas de las curvas reportadas para las mezclas MDC-19 y WMA-19 son -0.298 y -0.218, respectivamente. Para una magnitud de esfuerzo aplicado de 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 400 kPa, 500 kPa y 600 kPa, la vida a fatiga de la mezcla WMA-19 es de 20.8, 8.8, 5.4, 3.8, 2.9 y 2.3 veces superior en comparación con la mezcla MDC-19. Estos resultados son coherentes con lo enunciado ampliamente en la literatura de referencia, la cual reporta mayor vida y resistencia al fenómeno de fatiga por carga cuanto mayor sea la rigidez de la mezcla. Caso contrario sucede cuando el modo de carga es el de deformación controlada, en la que las mezclas asfálticas experimentan su mayor vida a fatiga generalmente cuando su rigidez es menor [42]-[44].

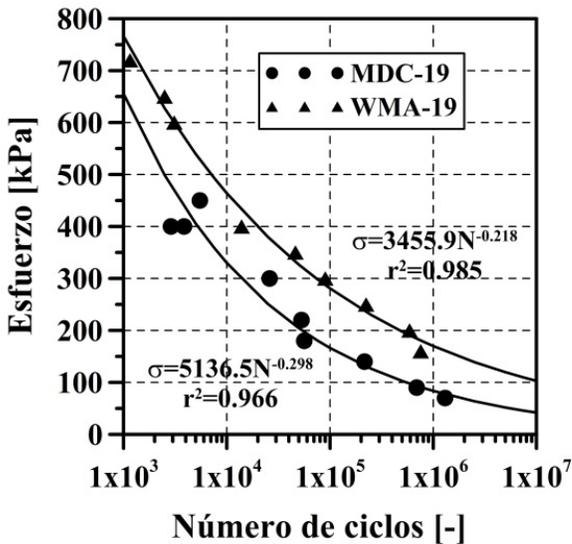


Figura 4. Resistencia a fatiga

CONCLUSIONES

Este estudio midió la resistencia bajo carga monotónica y cíclica que experimenta una mezcla asfáltica tibia fabricada en una planta de asfalto usando un aditivo químico que espuma el bitumen. Con el fin de evaluar dicha resistencia fueron ejecutados ensayos Marshall, módulo resiliente, deformación permanente y resistencia a fatiga. Con base en los resultados obtenidos se concluye: i) aunque el contenido de aditivo agregado a la mezcla es bajo (1 % con respecto a la masa del asfalto), se reportan cambios significativos en las propiedades del asfalto modificado (incremento de la rigidez y mejoramiento del grado de funcionamiento del asfalto a temperaturas altas e intermedias de servicio); ii) el aditivo HUSIL permite reducir la temperatura de la mezcla en 30 °C, logrando propiedades volumétricas similares, y ligeramente mayor resistencia bajo carga monotónica en el ensayo Marshall con respecto a la mezcla en caliente de referencia MDC-19 fabricada a 150 °C; iii) la mezcla tibia experimenta mayor resistencia al daño por humedad en comparación con la de referencia fabricada a 150 °C; iv) la mezcla asfáltica tibia experimenta mayor rigidez bajo carga cíclica, resistencia a la deformación permanente y a fatiga (este último bajo el modo de carga de esfuerzo controlado) en comparación con la mezcla en caliente de control, lo cual induce a pensar en su empleo en vías que se construyan donde el clima sea de alta temperatura y en capas asfálticas gruesas; v) la mezcla asfáltica tibia al ser fabricada a 30 °C por debajo de la mezcla en caliente debe generar menores emisiones a la atmósfera y reducir el uso de combustibles en las plantas, lo cual redundará en menor contaminación al medio ambiente; vi) la mezcla asfáltica tibia objeto de este estudio puede ser fabricada a escala real en una planta de asfalto convencional sin necesidad de modificar dicha planta o de adquirir equipamiento adicional; vii) la mezcla asfáltica tibia fabricada en planta de asfalto desarrolló las mismas ventajas de aquellas fabricadas en laboratorio: mayor resistencia bajo carga monotónica y cíclica y mayor resistencia al daño por humedad en comparación con la mezcla en caliente de control.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Nacional de Vías (INVIAS), "Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras". Bogotá, D.C., Colombia, 2013.

- [2] R. Bonaquist, "Mix design practices for warm mix asphalt", National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), final Report 691. Washington, D.C.: TRB.
- [3] H. M. Silva, R. M. Oliveira, J. Peralta, and S. E. Zoorob, "Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents", *Constr. Buil. Mater.*, vol. 24, n° 9, pp. 1621-1631, 2010. Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2010.02.030.
- [4] A. Romier, M. Audeon, J. David, Y. Martineau, and F. Olard, "Low-energy asphalt with performance of hot-mix asphalt", *Transp. Res. Rec.*, n° 1962, pp. 101-112, 2006. Doi: 10.3141/1962-12.
- [5] O. Kristjansdottir, S. Muench, L. Michael, and G. Burke, "Assessing potential for warm-mix asphalt technology adoption", *Transp. Res. Rec.*, n° 2040, pp. 91-99, 2007. Doi: 10.3141/2040-10.
- [6] N. Wasiuddin, S. Selvamohan, M. Zaman, and M. Guegan, "Comparative laboratory study of Sasobit and Aspha-Min additives in warm-mix asphalt", *Transp. Res. Rec.*, n° 1998, pp. 82-88, 2007. Doi: 10.3141/1998-10.
- [7] Z. Tao, W. Huang, Q. Du, and J. Yan, "Warm mix asphalt technology applied at low air temperature in China", *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 10, n° S1, pp. 337-347, 2009. Doi: 10.1080/14680629.2009.9690250.
- [8] S. Sargand, M. D. Nazzal, A. Al-Rawashdeh, and D. Powers, "Field evaluation of warm-mix asphalt technologies", *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 24, n° 11, pp. 1343-1349, 2012. Doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000434.
- [9] APAO, "Warm Mix Asphalt Shows Promise for Cost Reduction, Environmental Benefit", Centerline, Asphalt Pavement Association of Oregon, Salem, Oregon, Fall 2003, 2013.
- [10] Z. You and S. W. Goh, "Laboratory evaluation of warm mix asphalt: a preliminary study", *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 1, n° 1, pp. 34-40, 2008.
- [11] C. K. Estakhri, R. Cao, A. Alvarez, and J. W. Button, "Production, placement and performance evaluation of warm mix asphalt in Texas". Presented at the GeoHunan International Conference 2009, ASCE, pp. 1-8, 2009. Doi: 10.1061/41045(352)1.
- [12] T. Gandhi, C. Akisetty, and S. Amirghanian, "A comparison of warm asphalt binder aging with laboratory aging procedures", *J. Test Eval.*, vol. 38, n° 1, pp. 1-8, 2010. Doi: 10.1520/JTE101934.
- [13] T. Gandhi, W. Rogers, and S. Amirghanian, "Laboratory evaluation of warm mix asphalt ageing characteristics", *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 11, n° 2, pp. 133-142, 2010. Doi: 10.1080/10298430903033339.

- [14] W. Zhao, F. Xiao, S. N. Amirkhanian, and B. J. Putman, "Characterization of rutting performance of warm additive modified asphalt mixtures", *Constr. Buil. Mater.*, 31, pp. 265-272, 2012. Doi: 10.1016/J.Conbuildmat.2011.12.101.
- [15] S. W. Goh, M. R. Hasan, and Z. You, "Performances evaluation of Ceca-base® RT in warm mix asphalt technology", *Procedia Soc. Behav. Sci.*, vol. 96, pp. 2782-2790, 2013. Doi: 10.1016/J.Sbspro.2013.08.311.
- [16] Z. Hossain, and M. Zaman, "Behavior of selected warm mix asphalt additive modified binders and prediction of dynamic modulus of the mixes", *J. Test. Eval.*, vol. 41, n° 1, pp. 1-12, 2013. Doi: 10.1520/JTE104639.
- [17] R. Vidal, E. Moliner, G. Martínez, and M. C. Rubio, "Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement", *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 74, pp. 101-114, 2013. Doi: 10.1016/J.Resconrec.2013.02.018.
- [18] K. Su, R. Maekawa, and Y. Hachiya, "Laboratory evaluation of WMA mixture for use in airport pavement rehabilitation", *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, pp. 2709-2714, 2009. Doi: 10.1016/J.Conbuildmat.2008.12.011.
- [19] J. Wielinski, A. Hand, and D. Rausch, "Laboratory and field evaluations of foamed warm-mix asphalt projects", *Transp. Res. Rec.*, n° 2126, pp. 125-131, 2009. Doi: 10.3141/2126-15.
- [20] Y. Kim, J. Zhang, and H. Ban, "Moisture damage characterization of warm-mix asphalt mixtures based on laboratory-field evaluation", *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, pp. 204-211, 2012. Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2011.12.085.
- [21] Y. Tan, M. Guo, H. Xu, and R. Zhang, "Comparative study on laboratory performance of hot- and warm-mix asphalt mixtures", *J. Test. Eval.*, vol. 40, n° 5, pp. 1-9, 2012. Doi: 10.1520/JTE20120056.
- [22] A. Behl, G. Kumar, G. Sharma, and P. K. Jain, "Evaluation of field performance of warm-mix asphalt pavements in India", *Procedia Soc. Behav. Sci.*, vol. 104, pp. 158-167, 2013. Doi: 10.1016/J.Sbspro.2013.11.108.
- [23] A. Topal, B. Sengoz, B. V. Kok, M. Yilmaz, P. A. Dokandari, J. Oner, and D. Kaya, "Evaluation of mixture characteristics of warm mix asphalt involving natural and synthetic zeolite additives", *Constr. Build. Mater.*, vol. 57, pp. 38-44, 2014. Doi: 10.1016/J.Conbuildmat.2014.01.093.
- [24] A. Kavussi and L. Hashemian, "Laboratory evaluation of moisture damage and rutting potential of WMA foam mixes", *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 13, n° 5, pp. 415-423, 2012. Doi: 10.1080/10298436.2011.597859.
- [25] A. Ali, A. Abbas, M. Nazzal, A. Alhasan, A. Roy, and D. Powers, "Effect of temperature reduction, foaming water content, and aggregate moisture con-

- tent on performance of foamed warm mix asphalt”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, pp. 1058-1066, 2013. Doi: 10.1016/J.Conbuildmat.2013.07.081.
- [26] J. D. Doyle, and I. L. Howard, “Rutting and moisture damage resistance of high reclaimed asphalt pavement warm mixed asphalt: loaded wheel tracking vs. conventional methods”, *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 14, n° S2, pp. 148-172, 2013. Doi: 10.1080/14680629.2013.812841.
- [27] S. Kim, J. Park, S. Lee, and K. W. Kim, “Performance of modified WMA Mixtures prepared using the same class PG binders of HMA mixtures”, *J. Test. Eval.*, vol. 42, pp. 1-10, 2014. Doi: 10.1520/JTE20120367.
- [28] F. Xiao, V. S. Punith, S. N. Amirkhanian, and C. Thodesen, “Improved resistance of long-term aged warm-mix asphalt to moisture damage containing moist aggregates”, *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 25, n° 7, pp. 913-922, 2013. Doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000567.
- [29] F. Xiao, V. S. Punith, and B. Putman, “Effect of compaction temperature on rutting and moisture resistance of foamed warm-mix-asphalt mixtures”, *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 25, n° 9, pp. 1344-1352, 2013. Doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000664.
- [30] F. Xiao, V. S. Punith, B. Putman, and S. N. Amirkhanian, “Utilization of foaming technology in warm-mix-asphalt mixtures containing moist aggregates”, *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 23, n° 9, pp. 1328-1337, 2011. Doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000297.
- [31] F. Xiao, W. Zhao, T. Gandhi, and S. N. Amirkhanian, “Influence of antistripping additives on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures,” *J Mater Civ Eng.*, vol. 22, n° 10, pp. 1047-1055, 2010. Doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000111.
- [32] F. Xiao, W. Zhao, T. Gandhi, and S. N. Amirkhanian, “Laboratory investigation of moisture susceptibility of long-term saturated warm mix asphalt mixtures,” *Int J Pavement Eng.*, vol. 13, n° 5, pp. 401-414, 2012. Doi: 10.1080/10298436.2011.585649.
- [33] R. B. Mallick, M. Tao, B. Chen, K. O’Sullivan, and P. Cacciatore, “Practical method to understand the effect of aggregate drying on the moisture content of hot-mix asphalt”, *Transp. Res. Rec.*, n° 2208, pp. 90-96, 2011. Doi: 10.3141/2208-12.
- [34] K. Kanitpong, N. Charoentham, and S. Likitlersuang, “Investigation on the effects of gradation and aggregate type to moisture damage of warm mix asphalt modified with Sasobit”, *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 13, n° 5, pp. 451-458, 2012. Doi: 10.1080/10298436.2011.565058.

- [35] B. Sengöz, A. Topal, and C. Gorkem, "Evaluation of moisture characteristics of warm mix asphalt involving natural zeolite", *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 14, n° 4, pp. 933-945, 2013. Doi:10.1080/14680629.2013.817352.
- [36] A. Ali, A. Abbas, M. Nazzal, A. Alhasan, A. Roy, and D. Powers, "Workability evaluation of foamed warm mix asphalt", *J Mater Civ. Eng.*, vol. 26, n° 6, 04014011, 2014. Doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000904.
- [37] United Nations Economic Commissions for Europe (UNECE), *Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals - GHS*, 5th ed., July 2013.
- [38] H. A. Rondón and W. Fernandez, "Mechanical resistance of a chemically-modified warm mix asphalt", *Revista Tecnura, Special Edition Doctorate*, vol. 18, pp. 97-108, 2014.
- [39] H. A. Rondón, W. Fernandez, and C. Zafra, "Desarrollo de una mezcla asfáltica tibia bajo criterios técnicos y ambientales", Informe final, Proyecto de Investigación 014-2013, CIDC, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, D.C., Colombia, 2015.
- [40] H. A. Rondón, C. F. Urazán, S. B. Chavez, "Characterization of a warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavements", presented at Proceedings of Airfield and Highway Pavements 2015, ASCE, pp. 19-30, 7-10 June 2015. Doi: 10.1061/9780784479216.003.
- [41] Instituto Nacional de Vías (INVIAS), "Normas de Ensayos de Materiales", Bogotá, D.C., Colombia, 2013.
- [42] H. Di Benedetto and C. De la Roche, "State of the art on stiffness modulus and fatigue of bituminous mixtures". Presented at Report RILEM N° 17 Bituminous Binders and Mixes: State of the Art and Interlaboratory Test on Mechanical Behavior and Mix Design. L. Francken, Ed. Londres: E & FN Spon, pp. 97-123, 2005.
- [43] H. Di Benedetto, A. A. Soltani, and P. Chaverot, "Fatigue damage for bituminous mixtures: a pertinent approach", *Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 65, pp. 142-158, 1996.
- [44] H. Di Benedetto, C. De la Roche, H. Baaj, A. Pronk, and R. Lundstrom, "Fatigue of bituminous mixtures," *Material and Structures*, vol. 37, n° 3, pp. 202-216, 2004. Doi: 10.1007/BF02481620.