

Influence of four non-conventional additives on the dynamic and rheological properties of asphalt 60/70

Influencia de cuatro aditivos no convencionales en las propiedades dinámicas y reológicas de un asfalto 60/70

M.G Delgado-Jojoa¹, J. A Sánchez-Gilede², H.A Rondón-Quintana³ and F. A Reyes-Lizcano⁴

ABSTRACT

The present work studies the influence of two polymers (GCR and PEBD), a natural bitumen (Gilsonite) and a chemical component (Husil) in the physical, rheological and dynamic properties of a conventional 60/70 asphaltic cement, which were modified by Via wet in an inclusion rate with respect to the total weight of each CA sample (1000 gr).

Different technologies have been studied in order to discover optimal materials for different loading and temperature conditions to which a pavement can be exposed, in order to reduce the probability of failure of said material; (DSR), Multi-Stress Repetitive Creep (MSCR), Linear Amplitudes Scanning (LAS), Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Thermogravimetric Analysis (TGA) To determine the response to phenomena-less fatigue and rutting as the main damage mechanisms of an asphalt pavement. After performing the above procedures and analyzing their results, it is possible to state that the viscoelastic properties of AC can be correlated with fatigue life and rutting of the asphalt mixtures, allowing us to state that the degree of operation at high temperatures improves in The Gilsonite, GCR and LDPE modified CAs reducing the possibility of rutting in pavement asphalt layers by increasing their stiffness levels; On the other hand the CAs modified with Husil and GCR improve their performance at intermediate temperatures, increasing their level of elasticity and therefore reducing the possibility of fatigue cracking; All of the above compared to the original CA.

Keywords: Fatigue, Runoff, wet road, recycled material, DSR, MSCR, LAS, TGA, DSC GCR, PEBD, Gilsonita, Husil, AC 60/70.

RESUMEN

El presente trabajo estudia la influencia de dos polímeros (GCR y PEBD), un bitumen natural (Gilsonita) y un componente químico (Husil) en las propiedades físicas, reológicas y dinámicas de un cemento asfáltico 60/70 convencional, los cuales se modificaron por vía húmeda en un porcentaje de inclusión con respecto al peso total de cada muestra de CA (1000 gr).

Diferentes tecnologías han sido estudiadas con el fin de descubrir materiales óptimos para diferentes condiciones de carga y temperatura a las que se puede exponer un pavimento, buscando disminuir la probabilidad de falla de dicho material; el presente trabajo implementa las técnicas del Reómetro de corte dinámico (DSR), prueba de Creep repetitivo Multi-Esfuerzo (MSCR), Barrido de amplitud lineal (LAS), Calorimetría diferencial de barrido (DSC) y el análisis termogravimétrico (TGA) para determinar la respuesta ante fenómenos de fatiga y ahuellamiento como principales mecanismos de daño de un pavimento asfáltico. Tras haber ejecutado los procedimientos expuestos y realizando un análisis de sus resultados es posible afirmar que las propiedades viscoelásticas de los CA pueden correlacionarse con la vida a la fatiga y ahuellamiento de las mezclas asfálticas, permitiéndonos afirmar que el grado de funcionamiento a altas temperaturas mejora en los CA modificados con Gilsonita, GCR y PEBD reduciendo la posibilidad de ahuellamiento en las capas asfálticas de pavimento al aumentar sus niveles de rigidez; por otro lado los CA modificados con Husil y GCR mejoran su desempeño a temperaturas intermedias, aumentando su nivel de elasticidad y por lo tanto disminuyendo la posibilidad de agrietamiento por fatiga; todo lo anterior comparado con respecto al CA original.

Palabras clave: Fatiga, Ahuellamiento, vía húmeda, material reciclado, DSR, MSCR, LAS, TGA, DSC, GCR, PEBD, Gilsonita, Husil, CA 60/70.

Recibido: Julio 17 de 2017

Aceptado: Julio 17 de 2017

¹ Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. E-mail: Miguel.delgado@javeriana.edu.co

² Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. E-mail: j.sanchezg@javeriana.edu.co

³ Ingeniero Civil, UFPs, Colombia. Master of science and Doctor in Engineering, Universidad de los Andes, Colombia. Affiliation: Full Professor, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. E-mail: harondong@udistrital.edu.co

⁴ Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Master of Science and Doctor in Engineering, Ecole Nationale Supérieure de Mécanique, France. Affiliation: Full professor, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. E-mail: fredy.reyes@javeriana.edu.co

Introducción

Según el Ministerio de Transporte de Colombia la red de carreteras se compone de 164 mil kilómetros, en donde 16.776 kilómetros de red primaria están a cargo de la nación, 13.296 kilómetros están a cargo del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y 3.380 kilómetros se encuentran concesionados [1]. Sin embargo, según el registro del 2014 correspondiente al estado de la red nacional vial a cargo del Instituto Nacional de vías, aproximadamente el 44% se encuentra en muy mal estado, dejando un 56% en regular y en buen estado. Así las cosas, a nivel nacional la vida útil de los pavimentos con asfalto se encuentra condicionada a cambios climáticos, deficiencia en la calidad de los materiales y diferentes condiciones de carga, dando como resultado el envejecimiento diario de este, cuantificado en un 65% el mal estado de las vías en el país. Por esta razón, la fabricación de mezcla asfáltica ha generado un interés particular en la implementación de asfaltos modificados, con el fin de evidenciar una mejora en las características físicas y reológicas del mismo, para poder prever el deterioro de las vías terrestres y en algunos casos posibilitar una vida útil más larga para un pavimento y/o permitir un espesor más delgado del mismo [2].

Ahora bien, la afectación producida por el elevado volumen de tráfico que ha aumentado exponencialmente en los últimos años, los gases tóxicos producidos por mezclas asfálticas convencionales (mezclas sin ningún aditivo) y la necesidad de mejorar las propiedades de dichas mezclas, han dejado a la imaginación la implementación de nuevas tecnologías para poder reducir satisfactoriamente por ejemplo las temperaturas de mezclado de puesta en obra y compactación de la mezcla. Adicionalmente, las nuevas tecnologías en las mezclas asfálticas han demostrado que reutilizando material reciclado como polímeros, se evidencian mejores resultados en las propiedades físicas, reológicas y térmicas. En consecuencia, en el presente trabajo pretende estudiar cuatro aditivos no convencionales mezclados con cemento asfáltico 60/70 (60/70 explica una penetración de 60 a 70 décimas de mm respectivamente, INVIAS E-706-07). El cemento asfáltico 60/70 fue elegido debido a que es el mayormente implementado en Colombia. Los cuatro aditivos no convencionales son: dos polímeros (1) Grano de caucho reciclado (GCR) y (2) Polietileno de baja densidad (PEBD), un asfalto natural (3) Gilsonita y un aditivo químico (4) Husil.

Implementando GCR se han evidenciado mezclas más durables, económicas a largo plazo y disminución en el impacto negativo que generan las llantas cuando se entierran en rellenos sanitarios, adicionalmente, algunas de las ventajas de inclusión son el aumento en: la resistencia al envejecimiento, oxidación del ligante asfáltico, la resistencia al agrietamiento de las mezclas, la rigidez y la resistencia a la humedad, y una menor susceptibilidad a los cambios de temperatura, sin embargo, algunas de las desventajas son: mayor energía de fabricación de la mezcla debido a las elevadas temperaturas en las que se realiza la modificación y que la captación de aceites del asfalto puede llegar a afectar la adherencia y la cohesión de las mezclas [2]. Por otro lado, para el PEBD se han encontrado mejoras en la resistencia mecánica de las mezclas, debido a que por ser un polímero termoplástico (plastómero) rigidiza el cemento asfáltico (CA), y a su vez según los análisis reportados de calorimetría TGA (Termogavimetría) y DSC (Calorimetría diferencial de barrido), se puede llegar a concluir que el CA modificado con PEBD podría ser un CA menos susceptible a problemas de oxidación y envejecimiento por aumento de temperatura [3]. Sin embargo, la implementación de este aditivo, ha reportado disminución en la resistencia a fatiga entre

el 12 a 32% para temperatura de 16°C [4]. Por esta razón, la implementación de aditivos no convencionales, ha influido significativamente en la pavimentación de vías terrestres a nivel mundial; a nivel nacional se ha contemplado la conformación de especificaciones técnicas [5] con el fin de mejorar el desempeño de las mezclas en el periodo de diseño y la durabilidad de la misma. Así pues, algunas instituciones de educación superior han llevado a cabo caracterizaciones fisicoquímicas y morfológicas de asfaltos modificados con material reciclado para poder contribuir a la conceptualización del uso de éstas [6].

Otro de los materiales a implementar en el presente trabajo es el HUSIL (en proceso de patente), un aditivo químico que reduce las temperaturas de mezclado en 30°C, contribuyendo a una mejor trabajabilidad, composición volumétrica, mayor resistencia bajo carga monotónica y mayor resistencia a daños por humedad [7]. Con respecto al proceso de mezclado se ha demostrado que este aditivo espuma al asfalto a temperaturas mayores a 80°C dificultando su homogeneización a temperaturas superiores a esta [8], por lo que se llegaría a suponer que el Husil no podría tener muy buen comportamiento por problemas de oxidación en climas con altas temperaturas.

No obstante, no solo a nivel nacional se ha venido investigando acerca de modificar el CA con aditivos no convencionales que mejoren sus propiedades. A nivel internacional se presentan grandes hallazgos, los cuales presentan el último aditivo a implementar en el presente trabajo, la Gilsonita. Estudios en países como Irán presentan reportes de los efectos de este asfalto natural o asfaltita conocida como "Gilsonita" en dos tipos de ligantes asfálticos producidos en este país, con grados de rendimiento PG58-22 y PG64-22. Para el trabajo se implementaron dosis de inclusión de 4%, 8% y 12% de gilsonita, evidenciando una mejora en el rendimiento a alta temperatura pero ningún impacto positivo a bajas temperaturas para inclusiones mayores a 8% del modificador [9]. Por consiguiente, una gran cantidad de organizaciones a nivel mundial realizan un constante análisis de asfaltos mediante técnicas sofisticadas, como es el ejemplo del estudio al envejecimiento a la intemperie de tres (03) asfaltos modificados con caucho, caracterizando y determinando las propiedades reológicas, antes y después del envejecimiento con ensayos como el reómetro de corte dinámico (DSR) [10].

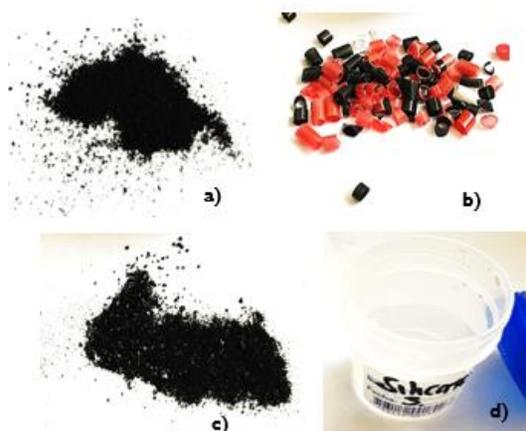
Dando continuidad a la implementación de la Gilsonita como material modificador, investigaciones nacionales [11] han presentado los resultados experimentales de la evaluación a la resistencia mecánica bajo carga monotónica, módulo resiliente y la resistencia a la deformación permanente, evidenciando una disminución en la rigidez a la exposición al medio ambiente durante los primeros 5 meses de un total de 24 meses. Como se puede evidenciar, un gran número de investigadores de la mano de grandes organizaciones han realizado diferentes estudios en cuanto a la caracterización y evaluación de las propiedades de los cementos asfálticos (CA) modificados mediante la implementación de aditivos no convencionales; siguiendo esta misma línea de ideas, este trabajo permite evidenciar la caracterización de las propiedades físicas, reológicas y térmicas del asfalto convencional 60/70 mezclado con cuatro aditivos: GCR, PEBD, Husil y Gilsonita, mediante la implementación de las técnicas para caracterización física: penetración, punto de ablandamiento, punto de ignición, punto de llama, viscosidad y ductibilidad, caracterización reológica: grado de desempeño - PG, creep repetitivo multi-esfuerzo - MSCR y barrido de amplitud lineal - LAS, y caracterización calorimétrica: calorimetría diferencial de barrido -DSC y análisis termogravimétrico-TGA.

Materiales y Métodos

Caracterización de materiales

Para los cuatro aditivos no convencionales se tuvieron en cuenta las siguientes características: a) El grano de caucho (GCR) proveniente de llantas usadas se molió de tal manera que el tamaño de sus partículas fuera menor a 6.3mm. b) El polietileno de baja densidad (PEBD) fue obtenido del reciclaje de pitillos, los cuales fueron cortados de tal forma que sus dimensiones pasaran el tamiz No. 4 y fueran retenidos por el No. 10. c) El HUSIL fue proporcionado en base líquida y d) La gilsonita fue obtenida de una mina localizada en el departamento del Cesar en Colombia siguiendo las especificaciones de composición de INVIAS (1997), ver figura 1.

Figura 1. Aditivos a) GCR, b) PEBD, c) Gilsonita y d) Husil



Fuente: Propia de los Autores

Así mismo, el CA 60/70 fue elegido debido a que es el más usado en Colombia, específicamente en Bogotá. En la tabla 1 se puede apreciar la caracterización general del CA 60/70 según la normatividad aplicable vigente INVIAS 2013, donde se puede observar que los resultados de la caracterización física de este cumplen con la normatividad y por ende es aceptable para continuar con la inclusión de los aditivos no convencionales.

Tabla 1. Caracterización general CA 60/70

Ensayo	Unidad	CA 60/70	CA 60/70 (Valores válidos INVIAS 2013)	
			Mínimo	Máximo
Penetración (25°C, 100g, 5s)	%	64.22	60	70
Punto de Ablandamiento	54	54	48	54
Punto de Ignición	°C	296	230	-
Punto de Llama	°C	346	325	-
Viscosidad Absoluta (60°C)	Poises	1750	1500	-
Ductilidad (25°C, 5cm/min)	cm	>150	100	-

Fuente: Propia de los Autores

Dosificación de los aditivos

La metodología implementada en la inclusión de los aditivos, fue buscando un porcentaje óptimo con respecto a la revisión bibliográfica. Para el primer aditivo GCR, los porcentajes recomendados de inclusión son entre el 10-20% de inclusión según la Reso-

lución 3841 de 2011, pues bien, dentro de la literatura el porcentaje de inclusión para casi todos los experimentos oscila entre el 13-15%; para el presente trabajo se escoge un promedio de estos, 14%, como porcentaje más implementado en la literatura y con mejores resultados de acuerdo a las ventajas presentadas anteriormente. Para el segundo aditivo PEBD el porcentaje de inclusión fue del 5% debido a que reportó el mejor comportamiento en una mezcla de concreto asfáltica, con un incremento en la rigidez y el aumento en el grado de funcionamiento del asfalto a altas temperaturas [3]. Para el tercer aditivo Gilsonita, el porcentaje de inclusión fue del 10%, debido a la disminución en la deformación permanente para porcentajes mayores al 3% [12]. Para el cuarto aditivo Husil, el porcentaje escogido fue del 1% debido a que con valores superiores o inferiores a este presenta disminución en la rigidez de la muestra evidenciada en aumento en la penetración y una disminución en el punto de ablandamiento [7].

Así las cosas, todas las temperaturas de mezclado fueron del orden de $155 \pm 5^\circ\text{C}$ debido a que por encima de esta se experimentan procesos de envejecimiento por pérdida de componentes químicos (Rondón et al, 2014), y por debajo de estas temperaturas se dificulta el mezclado. No obstante, en el caso del HUSIL, se implementó una temperatura de 80°C , ya que por encima de esta el CA se espuma (Rondón et al, 2014). Finalmente, los aditivos no convencionales se mezclaron por vía húmeda lo cual se consigna en la tabla 2.

Tabla 2. Dosificación de los Aditivos

Tipo CA	Unidades	Temperatura de mezclado	Unidades	Tiempo de mezclado	Fuente
60-70 + 5% PEBD	°C	150	min	40	(Rondon, Fernández, Castro, 2010)
60-70 + 14% GCR	°C	160	min	70	(Rondon, Reyes, 2012)
60-70 + 10% GILSONITA	°C	160	min	20	(Rondon, 2011)
60-70 + 1% HUSIL	°C	80	min	5	(Rondon, Fernández, 2014)

Fuente: Propia de los Autores

Muestras

Luego de realizar los ensayos para el CA 60/70 sin modificar, y de escoger los porcentajes óptimos de inclusión de los aditivos se fabricaron un total de 15 muestras (3 muestras por cada CA 60/70 modificado y 3 muestras para el CA sin modificar) para los ensayos de caracterización física, 40 muestras (8 muestras por cada CA 60/70 modificado y 3 muestras para el CA sin modificar) para los ensayos de caracterización reológica y 10 muestras (2 muestras cada CA 60/70 modificado y 3 muestras para el CA sin modificar) para los ensayos de calorimetría.

Fase Experimental

Los ensayos de caracterización física se realizaron siguiendo los lineamientos establecidos en la normatividad vigente INVIAS 2013. De este modo, las condiciones de trabajo fueron las siguientes: a) Penetración: Es la distancia hasta la cual la aguja con masa de 100 g penetra la muestra durante 5 s a una temperatura de 25°C en el penetrómetro, b) Ductilidad: Es la distancia máxima en cm que se estira la probeta hasta el instante de rotura a una temperatura de 25°C a una velocidad de 5cm/min en el Ductilómetro, c) Punto de ablandamiento: Es el valor promedio de las temperaturas a las cuales dos muestras se ablandan para

permitir que dos bolas metálicas soportadas sobre dicha muestra caigan desde una distancia de 25 mm, temperatura de inicio de ensayo $5 \pm 1^\circ\text{C}$ con una velocidad de calentamiento $5^\circ\text{C}/\text{min}$ en el aparato anillo y bola , d) Punto de ignición y llama: El punto de ignición es la temperatura más baja a la cual la aplicación de la llama en dos direcciones genera chispa durante $1 \pm 0.1\text{s}$ en la copa abierta clevenland, posterior a este, se deja calentar la muestra con un incremento de $2^\circ\text{C}/\text{min}$ hasta que el espécimen se encienda y siga generando llama durante 5 s, esta temperatura es considerada como el punto de llama , f) Viscosidad Absoluta (60°C): Es el tiempo de flujo necesario para incluir por medio del vacío un volumen fijo de líquido teniendo en cuenta la calibración del equipo. Luego, se sometieron las muestras al envejecimiento en horno de película delgada (RTFO) simulando la extensión y compactación de la capa asfáltica en obra (tiempo de ensayo: 85 min. – temperatura: 63°C), y finalmente luego de obtener las muestras envejecidas en RTFO se sometieron en la cámara de envejecimiento a presión (PAV) simulando una vida de servicio de 7 a 10 años (tiempo de ensayo: 20 horas – temperatura: 100°C - presión constante: 2.1 MPa). Lo anteriormente mencionado se relaciono bajo la normatividad vigente INVIAS (2013).

Posteriormente, se realizaron los ensayos de caracterización reológica implementando el Reómetro de corte dinámico (DSR), establecidos en la normatividad INVIAS E-750-13. El primer paso fue encontrar el Grado de desempeño (PG) de los diferentes CA, para ello se implementó el equipo AR2000 ex de TA instruments. Para muestras no envejecidas y envejecidas en RTFO se implementaron geometrías de 25 mm y para muestras envejecidas en RTFO+PAV se emplearon geometrías de 8 mm. Es importante aclarar que para encontrar el grado de desempeño de la muestra únicamente se buscó obtener temperaturas de servicio altas e intermedias, debido a que en Colombia no se registran temperaturas inferiores a 0°C por congelamiento. Así mismo, se aplicó una carga oscilatoria sinusoidal a una frecuencia constante. En este sentido, el ensayo de reología con DSR es utilizado para evaluar el comportamiento visco-elástico que experimenta el CA a altas e intermedias temperaturas; fundamentalmente los parámetros a medir son: el modulo complejo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ), el primero puede considerarse la resistencia a la deformación por esfuerzos repetitivos, y el segundo la tendencia del CA a ser un material elástico $\delta=0^\circ$ o viscoso $\delta=90^\circ$.

El Segundo paso fue el análisis de Creep repetitivo Multi-Esfuerzo (MSCR) establecidos en la normatividad AASHTO D7450-10a debido a que en Colombia no existe normatividad vigente para este análisis realizado en la máquina de DSR (equipo AR2000 ex de TA instruments), para ello se implementaron geometrías de 25 mm para muestras únicamente envejecidas por RTFO. Las condiciones de este ensayo consisten en someter a la muestra a una carga constante en un tiempo determinado y posteriormente liberar la muestra de la carga para someterla a una etapa de recuperación del material dando como resultado la deformación permanente resultante al aplicar una unidad de esfuerzo, o en otras palabras, el parámetro J_{nr} , que entre menor sea, menor será la deformación permanente del asfalto.

El tercer paso fue la estimación de la tolerancia de daño usando el Barrido de Amplitud Lineal (LAS), debido a que en Colombia no existe normatividad vigente se procede a realizar un análisis basado en AASHTO-TP-101, para ello se implementan muestras de 8 mm provenientes de bitúmenes envejecidos en RTFO+PAV, esto con el fin de determinar el comportamiento a fatiga después de 7 a 10 años de servicio. Pues bien, este ensayo consistió en

evaluar la capacidad de un asfalto para resistir el daño debido a la carga cíclica de cizallamiento a amplitudes crecientes. El procedimiento del ensayo consta de dos etapas, la primera a) *Barrido de frecuencia*: utilizado para determinar las propiedades reológicas, mediante la aplicación del esfuerzo sobre un rango de frecuencia y (b) *Barrido de amplitud*: utilizado para determinar la cantidad esperada de tráfico, mediante la aplicación incremental lineal de carga una frecuencia. La temperatura de realización de los ensayos fue la intermedia registrada en la obtención del grado de desempeño (PG) para cada muestra.

Finalmente, el cuarto paso fue realizar los análisis de calorimetría, compuestos por el TGA y DSC bajo la normatividad vigente ASTM C 351 y ASTM E 914 respectivamente; realizados en la termobalanza. La termogravimetría (TGA) se basa en registrar el porcentaje de variación de la masa respecto a la variación de la temperatura en función del tiempo y obteniendo temperaturas hasta de 1000°C . Mediante este, se pueden evidenciar procesos como oxidación del material, reacciones de vaporización, descomposición debido al aumento progresivo de la temperatura; por otro lado, la calorimetría diferencial de barrido (DSC) es una técnica dinámica, que permite evidenciar las transiciones vítreas que se pueden llegar a presentar debido al cambio de trabajo del material de una fase frágil a una dúctil , y que puede ser de gran importancia para ver entalpías de transición (como procesos de cristalización y puntos de fusión, considerada como el área bajo la curva de los picos más resaltados representados gráficamente) y determinar la temperatura de trabajo de los aditivos a implementar.

Resultados y Análisis

Caracterización Física

En la tabla 3 se presentan los valores obtenidos en los diferentes ensayos de caracterización física: penetración, ductilidad, punto de ablandamiento, punto de llama y punto de ignición. Comparando los resultados de la tabla 3, se pueden observar tendencias, en donde disminuye la penetración y aumenta el punto de ablandamiento con respecto al CA sin modificar en todos los casos. En cuanto a ductilidad, se evidenció una disminución en los CA modificados con aditivo GCR, PEBD y Husil de casi el 90%, 87% y 15% respectivamente en comparación al CA sin modificar. Por último, se evidencia una disminución del punto de llama en todos los cementos asfálticos modificados y un comportamiento muy diferente para el punto de ignición debido a que el PEBD y GCR disminuyen a un 5% y 6% respectivamente con respecto al CA sin modificar mientras que la Gilsonita y el Husil aumentan este a un 5% y 4% respectivamente.

Tabla 3. Caracterización física

Tipo	Método (INVIAS 2013)	Unidades	CA 60/0	CA 60-70 + 5% PEBD	CA6 0-70 + 14% GCR	CA 60-70 + 10% Gilsonita	CA 60-70 + 1% Husil
Penetración	INVIAS 706	0.1 mm	64	27	43.4	27.17	51.39
Ductilidad	INVIAS 702	cm	>150	15	19.4	>150	127.5
Punto de ablandamiento	INVIAS 712	$^\circ\text{C}$	54	69	57.5	70	56
Punto de Llama	INVIAS 709	$^\circ\text{C}$	346	325	316	330	340
Punto de ignición	INVIAS 709	$^\circ\text{C}$	296	280	278	310	307

Fuente: Propia de los Autores

Caracterización Reológica

Grado de Desempeño (PG): Como se expuso en la metodología, en la primera etapa se determinó el grado de desempeño de cada muestra, a partir de la técnica de Reómetro de corte dinámico (DSR). En esta técnica se determinan parámetros asociados al comportamiento elástico, viscoelástico y viscoso que pueda llegar a tener el material, el primer parámetro es el módulo complejo (G^*) una medida de la resistencia de un material a deformarse por esfuerzos repetitivos de corte, compuesto por un parámetro viscoso: G'' (módulo de pérdidas) y un parámetro elástico: G' (módulo de almacenamiento). El segundo parámetro es el ángulo de fase δ , en donde a medida que este se acerca a 90° el material tiende a comportarse más viscoso con una respuesta lenta y a medida que este se acerca a 0° tiene un comportamiento elástico con una respuesta inmediata, en este sentido, un material viscoelástico tendría un δ entre 0° y 90° .

Después de obtener estos parámetros, las muestras sin envejecer y envejecidas en RTFO se someten a temperaturas altas, iniciando en 58°C e incrementando esta con un gradiente de 6°C , para escoger de esta manera una temperatura de desempeño que cumpla que $G^*/\text{Sen}(\delta) > 1$ kPa para muestras sin envejecer y por otro lado que para muestras envejecidas en RTFO, $G^*/\text{Sen}(\delta) > 2.2$ Kpa. Para muestras envejecidas en RTFO+PAV la temperatura inicial cambia a 22°C , disminuyendo esta con un gradiente 3°C , hasta que se cumpla que $G^*\text{Sen}(\delta) < 5000$ Kpa. En este sentido, el grado de desempeño a altas temperaturas, será la menor temperatura en la que $G^*/\text{Sen}(\delta)$ es > 1 Kpa y $G^*/\text{Sen}(\delta) > 2.2$ Kpa, debido a que se considera que al aumentar estas relaciones por encima de 1 y 2.2 Kpa se obtienen muestras menos susceptibles a problemas por ahuellamiento.

Por otro lado, el grado de desempeño a temperaturas intermedias será la temperatura a la cual se cumple que $G^*\text{Sen}(\delta) < 5000$ Kpa para muestras envejecidas en RTFO+PAV, debido a que se considera que en menores valores que 5000 Kpa las muestras son menos susceptibles a problemas por fatiga; a todo lo anterior que el resultado final sea tener un grado de desempeño para cada muestra de la siguiente manera "PG T altas (T intermedias)". En las tablas 4-8 se presentan los resultados obtenidos de la prueba de reómetro de corte dinámico, con los cuales se determino el grado de desempeño para cada muestra. En la tabla 4, CA original, se observa una temperatura máxima resistente de 64°C y temperatura intermedia de 22°C , obteniendo un PG 64 (22), característico de un CA 60/70 sin modificar.

Tabla 4. Caracterización reológica of AC 60/70.

Temperatura (°C)	δ (°)	G^* (Pa)	$ G^* /\text{sen}\delta$ (KPa)	$ G^* * \text{sen}\delta$ (KPa)
CA 60/70, Not aged				
58.0	86	2830	2.84	2.82
64.0	87	1216	1.22	1.21
70.0	88	560	0.56	0.56
CA 60/70, Aged in RTFO				
58.0	83	5445	5.48	5.41
64.0	85	2329	2.34	2.32
70.0	87	1043	1.04	1.04
CA 60/70, Aged in RTFO + PAV				
16.0	40	10909000	16957.0	7017.3
19.0	43	7363600	10813.0	5014.0
22.0	46	4742700	6579.3	3418.7

Fuente: Propia de los Autores

Para la tabla 5 y 6, se evidencia un PG 70(16) y PG 70(19) respectivamente, que en comparación con el CA original, se observa un aumento en el rendimiento a altas temperaturas en un grado PG, lo cual es indicador de un CA más resistente a fenómenos como el ahuellamiento en climas cálidos. Adicionalmente, un aumento considerable en dos grados PG por encima (22°C a 16°C para el GCR y 22°C a 19°C para el PEBD), lo cual indica un CA más resistente ante mecanismos de falla por agrietamiento cuando dichos materiales son implementados en climas fríos.

Tabla 5. Caracterización reológica of AC 60/70 + 14% GCR.

Temperature a (°C)	δ (°)	G^* (Pa)	$ G^* /\text{sen}\delta$ (KPa)	$ G^* * \text{sen}\delta$ (KPa)
AC 60/70 + 14% GCR, Not aged				
58	77	5967.1	6.1236	5.8144
64	80	2873.4	2.9224	2.8255
70	82	1411.2	1.4251	1.3974
CA 60/70 +14% GCR, Aged in RTFO				
64	70	4944.2	5.2663	4.6421
70	72	2624.1	2.7534	2.5011
76	75	1430.1	1.4811	1.3813
CA 60/70 + 14% GCR, Aged in RTFO + PAV				
16.02	39	7700700	12126	4890.6
19	42	5245700	7885	3490
22	44	3528600	5077.9	2452

Fuente: Propia de los Autores

Tabla 6. Caracterización reológica of AC 60/70 + 5% PEBD.

Temperature a (°C)	δ (°)	G^* (Pa)	$ G^* /\text{sen}\delta$ (KPa)	$ G^* * \text{sen}\delta$ (KPa)
AC 60/70 + 5% PEBD, Not aged				
64	49	30413	1.5	7.3
76	43	15122	0.9	6.3
82	35	10616	0.7	3.0
AC 60/70 + 5% PEBD, Aged in RTFO				
64	78	8554	8.8	8.4
70	79	3945	4.0	3.9
76	80	1907	1.9	1.9
AC 60/70 + 5% PEBD, Aged in RTFO + PAV				
19	36	9110500	15397	5392
22	38	6328000	10193	3930
25	40	4695600	7360	2996

Fuente: Propia de los Autores

En la tabla 7, se evidencia un PG 64 (16) con un aumento de 2 grados PG por encima del original en el rendimiento a temperaturas intermedias, lo cual es indicador de un CA mucho más resistente a fenómenos de agrietamiento cuando el material es sometido a climas fríos.

Tabla 7. Caracterización reológica of AC 60/70 + 1% Husil.

Temperatura (°C)	δ (°)	G* (Pa)	G* /senδ (KPa)	G* * senδ (KPa)
AC 60/70 + 1% Husil, Not aged				
64	87	1428	1.4	1.4
70	88	661	0.7	0.7
76	88	327	0.3	0.3
AC 60/70 + 1% Husil, Aged in RTFO				
58	83	5969	6.0	5.9
64	85	2563	2.6	2.6
70	86	1142	1.1	1.1
AC 60/70 + 1% Husil, Aged in RTFO + PAV				
16	42	9004200	13328	6083
19	46	6052100	8475	4322
22	48	4123200	5547	3065

Fuente: Propia de los Autores

Finalmente, para la Tabla 8, en comparación a todos los CA modificados y al CA sin modificar se evidencia un PG 76 (19) con un aumento considerable de 2 grados PG por encima del original en el rendimiento a altas temperaturas, lo cual es indicador de un CA mucho más resistente ante mecanismos de daño por ahueamiento en climas cálidos.

Tabla 8. Caracterización reológica of AC 60/70 + 10% Gilsonita.

Temperature a (°C)	δ (°)	G* (Pa)	G* /senδ (KPa)	G* * senδ (KPa)
AC 60/70 + 10% Gilsonita, Not aged				
58	77	1787.9	8.33	7.93
64	84	665.1	4.13	4.02
70	71	13337.0	0.86	39.67
AC 60/70 + 10% Gilsonita, Aged in RTFO				
69	80	3581.5	3.64	3.52
72	81	2913.0	2.95	2.87
78	83	1409.3	1.42	1.40
AC 60/70 + 10% Gilsonita, Aged in RTFO + PAV				
13	32	30344000	57943	15892
16	34	21900000	39377	12178
19	36	15325000	25920	9060

Fuente: Propia de los Autores

En la tabla 9 se resume lo anteriormente obtenido para cada tipo de CA modificado y el CA sin modificar.

Tabla 9. Grado de desempeño

Tipo AC	Unidades	PG
60-70	°C	64(22)
60-70 + 5% PEBD	°C	70(19)
60-70 + 14% GCR	°C	70(16)
60-70 + 10% GILSONITA	°C	76(19)
60-70 + 1% HUSIL	°C	64(16)

Fuente: Propia de los Autores

Creep repetitivo Multi-Esfuerzo (MSCR): En la segunda etapa de los resultados de reología, se evaluaron las muestras envejecidas en RTFO a las temperaturas máximas resistentes obtenidas en el grado de desempeño (tabla 9). Para este numeral se obtuvo el comportamiento del asfalto a diferentes esfuerzos, evaluando la memoria elástica que llega a alcanzar, o las deformaciones acumuladas que puede llegar a resistir después de 20 ciclos de carga y descarga (procesos asociados con creep) obteniendo como resultado el parámetro Jnr, el cual se define como la relación entre la deformación no recuperada y el esfuerzo aplicado, entre menor sea este, mayor será la condición de tráfico esperado para soportar.

Seguindo los lineamientos de la AASHTO-D7405-10^a (debido a que en Colombia no se tiene la normatividad INVIAS para estos procesos) lo primero es hallar el valor de la deformación inicial ε₁, teniendo en cuenta el valor máximo y mínimo obtenido en deformación para el ciclo de creep ε₀ y ε_c después de 1 s de carga.

$$\epsilon_1 = \epsilon_c - \epsilon_0 \quad (1)$$

De esta manera, se halla la deformación no recuperada ε₁₀, teniendo en cuenta el valor mínimo para el ciclo de recuperación ε_r y el valor inicial ε₀ para el ciclo de creep.

$$\epsilon_{10} = \epsilon_r - \epsilon_0 \quad (2)$$

La relación entre la deformación recuperada (ε₁ - ε₁₀) y la deformación inicial ε₁ es el total de deformación recuperada en porcentaje para cada ciclo de carga.

Para cada ciclo N (N= 1 a 10) de carga de 0.1 kpa o 100 pa:

$$R_{(100, N)} = \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_{10}) * 100}{\epsilon_1} \quad (3)$$

Para cada ciclo N (N= 1 a 10) de carga de 3.2 kpa o 3200 pa:

$$R_{(3200, N)} = \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_{10}) * 100}{\epsilon_1} \quad (4)$$

Luego, se hallan los promedios de recuperación recuperada para cada carga.

Para carga de 0.1 kpa o 100 pa:

$$R_{100} = \text{SUM}(\epsilon_r(100, N)) / 10 \quad (5)$$

Para carga de 3.2 kpa o 3200 pa:

$$R_{3200} = \text{SUM}(\epsilon_r(3200, N)) / 10 \quad (6)$$

Posteriormente, se calcula la diferencia en porcentaje de cada promedio anteriormente calculado.

$$Rdiff = \frac{(R_{100} - R_{3200}) * 100}{R_{100}} \quad (7)$$

Finalmente, se calcula el parámetro Jnr obtenido de la relación de la deformación no recuperada y el esfuerzo aplicado.

Para carga de 0.1 kpa o 100 pa:

$$Jnr(100, N) = \frac{\epsilon_{10}}{100} \quad (8)$$

Para carga de 3.2 kpa o 3200 pa:

$$Jnr(3200, N) = \frac{\epsilon_{10}}{3200} \quad (9)$$

Seguidamente, se hallan los promedios del parámetro Jnr

$$Jnr_{100} = \text{SUM}(Jnr(100, N)) / 10 \quad (10)$$

$$Jnr_{3200} = \text{SUM}(Jnr(3200, N)) / 10 \quad (11)$$

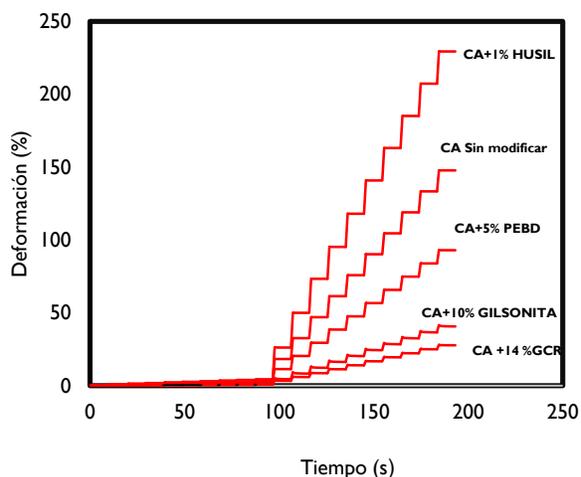
Y se calcula la diferencia en porcentaje de los parámetros anteriormente calculados.

$$Jnr_{diff} = \frac{(Jnr_{100} - Jnr_{3200}) \cdot 100}{Jnr_{100}} \quad (12)$$

El valor de Jnr a escoger es el promedio del ciclo de carga de 3.2 Kpa debido a que las deformaciones acumuladas por el material son mucho mayores para los 10 ciclos con carga de 3.2 Kpa a diferencia de los 10 ciclos con carga de 0.1 Kpa que no presentan deformaciones acumuladas superiores al 4% del porcentaje de deformación.

En la figura 2 se puede observar el porcentaje de deformación acumulado contra la acumulación del tiempo mediante la técnica MSCR en donde después de 20 ciclos de carga y descarga, el ligante que mayor respuesta tiene a las deformaciones acumuladas es el CA+GCR, lo cual nos indica que seguiría trabajando en el rango elástico y el CA+HUSIL presenta un comportamiento con mayores deformaciones acumuladas.

Figura 2. MSCR



Fuente: Propia de los Autores

En este sentido, se puede obtener la condición de tráfico a la que el CA modificado y sin modificar, podrá llegar a soportar en algún momento de su vida útil de servicio. Según la tabla 10, los CA que no cumplen los parámetros para un cálculo de intensidad de tráfico en número de ejes equivalentes es el CA+HUSIL y el CA 60/70 sin modificar debido a que se excede con un valor de Jnr de 4; el CA que presenta la condición más favorable es el CA+GILSONITA, CA+GCR y el CA + PEBD.

Tabla 10. Parámetro Jnr

Tipo CA	Jnr, 3.2 kpa	Intensidad de tráfico	Condición
60-70 + 1% HUSIL	7.035	NO CUMPLE	
60-70	4.492	NO CUMPLE	
60-70 + 5% PEBD	2.830	ESTÁNDAR	<3 Millones
60-70 + 14% GCR	1.250	PESADO	>3<10 Millones
60-70 + 10% GILSONITA	0.845	MUY PESADO	>10<30 Millones

Fuente: Propia de los Autores

Barrido de Amplitud lineal (LAS): La tabla 11 muestra la información de la primera etapa (a) del ensayo *Barrido de Frecuencia* para los diferentes CA (original y modificado), a la temperatura media obtenida a partir del grado de desempeño PG, este siguiendo los lineamientos de AASHTO-TP-101.

Tabla 11. Resultados LAS - Barrido de Frecuencia

Tipo CA	PG	Temp. (°C)	Frec. (Hz)	δ (°)	G* (Pa)
CA 60/70	64 (22)	22	5.8	43.26	1.08.E+07
CA 60/70 + 5% PEBD	70 (19)	19	5.8	39.09	1.65.E+07
CA 60/70 + 14% GCR	70 (16)	16	5.8	37.99	1.42.E+07
CA 60/70 + 10% GILSONITA	76 (19)	19	5.8	30.59	4.94.E+06
CA 60/70 + 1% HUSIL	64 (16)	16	5.8	33.46	2.54.E+07

Fuente: Propia de los Autores

La tabla 11 presenta la media muestral correspondiente a las series de datos obtenidas para cada material a medida que la frecuencia aumenta en un rango de 0,2 a 30 Hz en un tiempo de 4,6 minutos de ensayo; dichas series corresponden a los resultados de una modelación predictiva, los cuales se pueden asociar a los niveles de rigidez y elasticidad de cada bitumen.

De este modo se puede apreciar en la tabla 11 que el CA 60/70 modificado con Husil cuenta con altos niveles de rigidez y elasticidad, debido a que en concordancia con las especificaciones del ensayo AASHTO-TP-101, el módulo dinámico |G*| representa la resistencia que tiene el CA a deformarse por esfuerzos de corte repetidos, y el ángulo de fase δ el comportamiento elástico (δ=0° comportamiento totalmente elástico y δ=90° puramente viscoso como se menciono anteriormente) [13].

Siguiendo los lineamientos de las especificación del ensayo “barrido de frecuencia”, este es usado para determinar el parámetro “alpha” (α) en el análisis de daño; en primer lugar los datos del módulo dinámico y ángulo de fase (|G*| y δ) son convertidos en módulo de almacenamiento $G'_{(w)} = |G^*|_{(w)} \times \cos \delta_{(w)}$, para el cual una línea recta con el mejor ajuste se aplica en un gráfico con $\log w$ en el eje horizontal y $\log G'_{(w)}$ en el eje vertical utilizando la forma $\log G'_{(w)} = m \log w + b$; el valor de m se registra y el valor del parametro α se obtiene realizando la transformación: $1 / \alpha$; la tabla 12 presenta los datos obtenidos del parámetro α para cada uno de los bitúmenes de asfalto.

Tabla 12. Parámetros m y α

Tipo CA	m	α = 1/m
AC 60/70	0.5249	1.91
AC 60/70 + 5% PEBD	0.4679	2.14
AC 60/70 + 14% GCR	0.4458	2.24
AC 60/70 + 10% GILSONITA	0.3509	2.85
AC 60/70 + 1% HUSIL	0.3933	2.54

Fuente: Propia de los Autores

El parámetro α indicado en la tabla anterior representa las propiedades del material no dañado, a lo que es posible afirmar

entonces que el CA 60/70 modificado con Gilsonita presenta un mejor comportamiento tras los diferentes niveles de carga aplicados.

Al culminar la etapa (a) del Linear Amplitudes Sweep análisis, obteniendo el parámetro “alpha” (α) se procede con el ensayo de *Barrido de Amplitud* que corresponde a la etapa (b); esto con el fin de determinar la tasa de acumulación de daño y en correlación a este el nivel esperado de tráfico antes de que se presente falla por fatiga.

La acumulación del daño en el espécimen es calculado utilizando la siguiente sumatoria:

$$D_{(t)} \cong \sum_{i=1}^N [\pi * \gamma_0^2 (C_{i-1} - C_1)]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (13)$$

Donde $C_{(t)} = \frac{|G^*|.Sen \delta_{(t)}}{|G^*|.Sen \delta_{(inicial)}}$ el cual es $|G^*|.Sen \delta$ en el tiempo t dividido entre el valor inicial de “No daño” $|G^*|.Sen \delta_{(inicial)}$, γ_0 corresponde al porcentaje de esfuerzo aplicado en tiempo t y “ t ” es el tiempo de ensayo en segundos.

$C_0 = 1$, que corresponde al valor inicial de C , C_1 y C_2 son los coeficientes de ajuste de la curva, derivados a través de la linealización de la ley de potencia en la forma mostrada a continuación como sugiere AASHTO-TP-101.

$$\log(C_0 - C_{(t)}) = \log(C_1) + C_2 \cdot \log(D_{(t)}) \quad \text{BN (14)}$$

Usando la ecuación anterior, C_1 se calcula como el antilogaritmo de la intercepción, y C_2 se calcula como la pendiente de la línea formada como $\log(C_0 - C_{(t)})$ versus $\log(D_{(t)})$. Para el cálculo de estos dos parámetros los datos de daño menores a 10% son ignorados (AASHTO-TP-101).

El valor de $D_{(t)}$ en la falla, llamado D_f , la AASHTO-TP-101 lo define como el $D_{(t)}$ que corresponde al 35 % de reducción en $|G^*|.Sen \delta$ ($(C_0 - C_{(t)})=0.35$), como se muestra a continuación:

$$D_f = \left(\frac{0.35}{C_1}\right)^{\frac{1}{C_2}} \quad (15)$$

Los siguientes parámetros A_{35} y B implementados para el modelo de rendimiento de fatiga del bitumen de asfalto pueden determinarse de la siguiente manera:

$$A_{35} = \frac{f \cdot (D_f)^k}{k(\pi C_1 C_2)^\alpha} \quad \text{Y} \quad B=2 \cdot \alpha \quad (16)$$

Donde f corresponde a la frecuencia de carga (10Hz) y $k = 1 + (1 - C_2)\alpha$.

El parámetro de rendimiento de fatiga N_f del bitumen se calcula de la siguiente manera:

$$N_f = A_{35}(\gamma_{max})^{-B} \quad (17)$$

Donde γ_{max} es el esfuerzo máximo esperado para una estructura de pavimento.

Siguiendo los lineamientos de la norma AASHTO esta metodología de pruebas incorporan la teoría de daño continuo viscoelástico (VECD), de esta manera el parámetro A_{35} representa las propiedades del material contra el daño acumulado y B la sensibilidad

del material frente a cualquier cambio en las cargas aplicadas; estos parámetros se pueden apreciar en la tabla 13 para cada uno de los asfaltos.

Tabla 13. Parámetros A_{35} y B

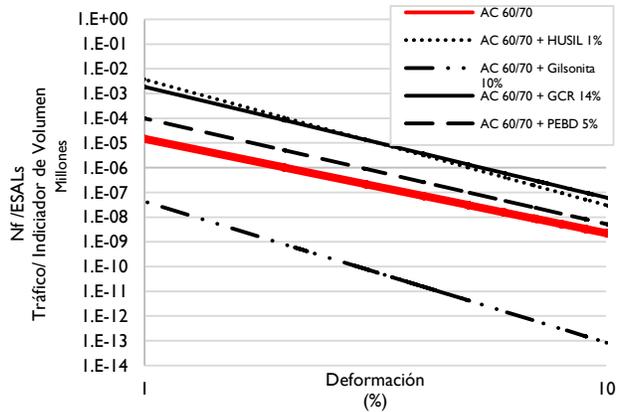
Tipo CA	A_{35}	B
AC 60/70	14.490.641,00	3.81
AC 60/70 + 5% PEBD	99.645.672,00	4.27
AC 60/70 + 14% GCR	1.890.532.252,00	4.49
AC 60/70 + 10% GILSONITA	42.585,00	5.70
AC 60/70 + 1% HUSIL	3.730.501.846,00	5.09

Fuente: Propia de los Autores

Como se mencionó anteriormente el parámetro “ A_{35} ” es la vida de fatiga del CA bajo una carga de cizallamiento del 1% (100 micro strain) y el parámetro “ B ” es la pendiente de la recta resultante, la cual representa la tasa de cambio de la vida de fatiga del material; de acuerdo con lo anterior los CA modificados con Husil y GCR presentan los más altos niveles de resistencia ante cargas repetitivas de cizallamiento del 1%.

En la figura 3 se presentan los valores correspondientes al parámetro N_f normalizado para 1 millón de ejes equivalentes para diferentes niveles de deformación, implementado las ecuaciones anteriormente mostradas.

Figura 3. Resultados LAS – Resistencia a la Fatiga (N_f)



Fuente: Propia de los Autores

El gráfico log-log anterior representa la vida a la fatiga de los materiales frente a la deformación por cizallamiento a temperaturas intermedias, para lo cual es claro que el CA + Husil y el CA + GCR presentan el mejor rendimiento ante este tipo de mecanismos de daño al contar con altos niveles de elasticidad, mientras que el CA + Gilsonita al ser un material rígido y por ende con un comportamiento frágil en temperaturas intermedias no presenta buenos resultados ante cargas repetitivas.

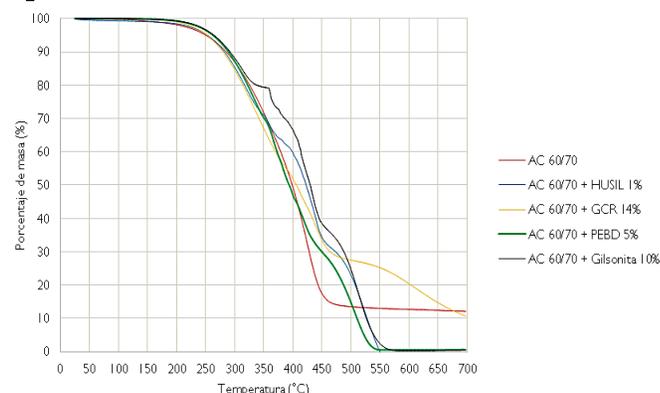
Los valores obtenidos para este ensayo no fueron consecuentes con los órdenes de magnitud obtenidos por otros investigadores [14], por lo cual se realizaron los ensayos 3 veces para cada material para los dos casos (barrido lineal y barrido de amplitud) obteniendo los mismos resultados, lo cual se puede deber a las diferentes condiciones de los ensayos y que las muestras implementadas tienen diferentes especificaciones.

Caracterización Calorimétrica

Análisis termogravimétrico (TGA): Para la caracterización calorimétrica se realizaron dos tipos de análisis. El primero fue la termogravimetría (TGA), la cual se basa en registrar el porcentaje de variación de la masa respecto a la variación de la temperatura en función del tiempo desde 25°C hasta temperaturas entre 600 a 2400°C, en la termobalanza. Mediante este, se obtiene el porcentaje de la pérdida de masa (en una atmósfera controlada) a través del aumento creciente de la temperatura, con el fin de evidenciar procesos tales como: descomposición, oxidación, vaporización, sublimación y desorción; lo anterior permite tener control de calidad en efectos como aditivos, estabilidad térmica del material, degradación térmica de polímeros e identificación de los materiales de una muestra determinada.

En la figura 4 se observa el termograma de los cinco CA evaluados, evidenciado un porcentaje (%) de pérdida de masa entre las temperaturas de 25°C (temperatura ambiente promedio) y 165°C (temperatura promedio en planta) de: a) 1.5% para el CA 60/70 sin modificar, b) Despreciable antes de 200°C para el CA 60/70 + 14% GCR c) Despreciable antes de 180°C para el CA 60/70 + 5% PEBD, d) Despreciable antes de 150°C para el CA 60/70 + 10% Gilsonita y e) 2% para el CA 60/70 + 1% Husil. No obstante, se obtuvo una pérdida de masa en porcentaje (%) entre 165°C y 360°C (temperaturas mayores a las tratadas en planta y menores al punto de llama de cada muestra) de: a) 34% para el CA 60/70 sin modificar, b) 18% para el CA 60/70 + 1% Husil, c) 20% para el CA 60/70 + 14% GCR, d) 19.203% para el CA 60/70 + 5% PEBD y e) 19.5% para el CA 60/70 + 10% Gilsonita.

Figura 4. Resultados TGA



Fuente: Propia de los Autores

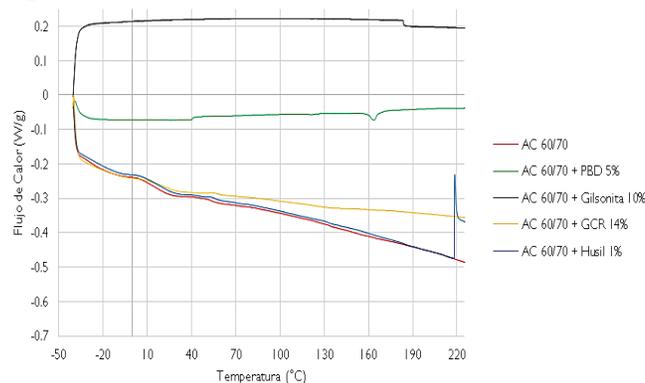
Lo anterior, evidencia que el CA sin modificar y modificado con los primeros 3 aditivos no convencionales (GCR, Gilsonita y PEBD) presentan una pérdida de masa de 1.5%, 0%, 0% y 0% lo cual indica que el CA 60/70 modificado es más estable en el rango de temperaturas de 25 – 165°C en comparación al CA 60/70 sin modificar que si presenta pérdida de masa en estos rangos. Pues bien, los aditivos anteriormente mencionados podrían aportar al CA 60/70 menor susceptibilidad a procesos de oxidación por exposición al medio ambiente y a largo plazo menor envejecimiento. Sin embargo, el proceso del HUSIL es diferente. Este, experimenta la mayor pérdida de masa antes de alcanzar la temperatura de mezclado generalizada en la normatividad vigente, lo cual se debe, a que a temperaturas mayores a

80°C este espuma al CA siendo consecuente con los resultados reportados en el análisis termogravimétrico, pues es más susceptible a pérdidas de las propiedades del material al estar expuesto a temperaturas mayores a esta, y por ende más desfavorable para la fabricación en planta.

Calorimetría diferencial de barrido (DSC): El segundo análisis implementado fue la calorimetría diferencial de barrido (DSC), la cual es una técnica dinámica cuantitativa, que permite evidenciar la cantidad de calor que absorbe o libera la muestra, determinando procesos de variación entálpica en donde ocurren cambios físicos o químicos (evaporación, sublimación, descomposición), puntos de cristalización (exotérmicos y endotérmicos), puntos de fusión (de las diferentes fases o tamaño de los cristales) y finalmente transiciones vítreas. Entalpías en las temperaturas de transición vítrea del material (Tg), temperaturas de fusión (Tm), procesos de cristalización y degradación. La transición vítrea se experimenta cuando el material deja de comportarse de forma frágil a dúctil y el cambio en la pendiente es un indicador de este comportamiento, para la temperatura de fusión se pueden evidenciar picos en la gráfica, para procesos de cristalización hundimientos y para procesos de degradación cambios en las pendientes con tendencias constantes entre estos. Lo anterior, es fundamental para ver entalpías de transición (se puede relacionar con el área bajo la curva) y determinar la temperatura de trabajo de los aditivos a implementar para inclusive industriales como los polímeros.

En la figura 5, se pueden evidenciar todos los procesos anteriormente mencionados, en donde: a) el CA 60/70 presenta transición vítrea (Tg) en 15.46°C, donde el material pasa de sólido a líquido. Esta temperatura se asocia a el cambio de pendiente descendente y continua, b) el CA 60/70 + 5% PEBD presenta un Tg= 37.5°C, adicionalmente presenta un punto de fusión (Tm) a 162.5°C relacionado con el pico cóncavo hacia abajo, y finalmente una temperatura de cristalización (Tc) de 262.5°C en condiciones exotérmicas (flujo de calor < 0), c) el CA 60/70 + 10% Gilsonita no presenta Tg, Tc ni Tm; pero presenta un proceso de absorción de calor de hasta 0.225 W/g seguida de un proceso de liberación de calor hasta llegar a la temperatura de descomposición de material de 175°C. d) el CA 60/70 + 14% GCR presenta un Tg= 31.25°C y una temperatura de punto de descomposición de Grano de caucho a 250°C seguido de un aumento en la absorción de calor y d) el CA 60/70 + 1% Husil presenta un Tg= 25°C seguido de un Tc= 212.5°C endotérmico relacionado con el pico lineal y posterior a este un comportamiento muy similar al CA 60/70 sin modificar.

Figura 5. Resultados DSC



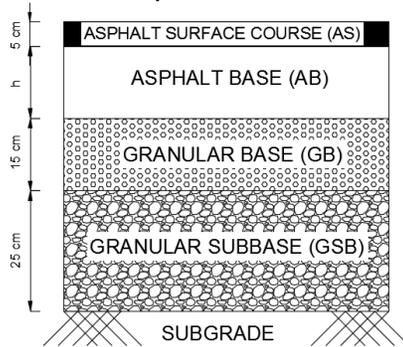
Fuente: Propia de los Autores

Estos resultados evidencian un comportamiento frágil para el CA 60/70 a temperaturas menores a la temperatura de transición vítrea (15.46°C) y un desplazamiento de esta para la inclusión de PEBD de 37.5°C, GCR 31.25°C y Husil 25°C. Es decir, con estos inclusores el comportamiento de frágil a ductil se desplaza, hacia mayores temperaturas, haciendo que el CA 60/70 modificado presente un comportamiento frágil a temperaturas por debajo de 37.5°C para el PEBD, 31.25°C para el GCR y 25°C para el Husil. Por otro lado, los resultados de la inclusión de Gilsonita arrojaron un proceso de absorción de energía bastante alto en comparación a los demás, y que no presenta puntos como tg, tc y tm, debido a que no es un polímero capaz de formar una estructura cristalina generando estabilidad y dureza, sino es completamente amorfo y no exhibirá puntos de cristalización ni de fusión ni de transición. Por último, se puede afirmar que los CA 60/70 que se implementan en su mayoría en ciudades como Bogotá D.C, se encuentran trabajando a fatiga debido a obtener transiciones vítreas en 15.46°C.

Costos

Diseño racional de pavimento flexible : Para realizar un análisis costo-beneficio entre los diferentes tipos de mezclas asfálticas indicadas en la tabla 14, se fijaron espesores de capas de Subbase (GSB), base (GB) y carpeta asfáltica de rodadura (AS) como se muestra en la figura 6, las cuales corresponden a una estructura de pavimento flexible, esto con el fin de obtener mediante el diseño racional de pavimentos [15] los espesores de base asfáltica (BA) para que la estructura pueda resistir las condiciones de tráfico y demás variables de diseño para una vía en la ciudad de Bogotá.

Figura 6. Sección transversal pavimento flexible



Los parámetros mecánicos, módulo resiliente (M_r) y coeficiente de Poisson (ν) de los materiales que componen la estructura de la imagen anterior son $M_r(AS) = 5400MPa$, $M_r(GB) = 200MPa$, $M_r(GSB) = 50MPa$ [15] y $M_r(SG) = 20MPa$, este último correspondiente a un suelo de soporte típico en la ciudad de Bogotá, por otro lado $\nu=0.3$ para las capas AS y AB, $\nu=0.35$ para las capas GB y GSB, y $\nu=0.4$ para la Subrasante.

Los módulos resilientes de las carpetas de base asfáltica $M_r(AB)$ creadas con CA 60/70 y sus modificados, se obtuvieron a partir de trabajos anteriores [16-17-18-19], estos valores se pueden apreciar en la tabla 14 para una temperatura media anual promedio (TMAP) de 15°C para cada tipo de mezcla asfáltica (AM).

Para el presente análisis se fijó un $NE_{13TON} = 1x10^6$; este tráfico es considerado como tipo T2 [15], de esta manera se procedió a determinar la deformación vertical acumulada ϵ_z mediante la

implementación de la siguiente ecuación aplicada para este tipo de tráfico:

$$\epsilon_z = 0.016(NE)^{-0.222}, \text{ para T1 - T2 (18)}$$

Como se explicó anteriormente ϵ_z corresponde a la deformación vertical admisible en la capa de soporte o Subrasante, este parámetro es calculado con el fin de controlar el ahuecamiento, la tabla 15 presenta los valores de este parámetro de comprobación para los 5 tipos estructuras de pavimento flexible.

Por otro lado para controlar el agrietamiento por fatiga es necesaria la determinación de la deformación por tracción máxima ϵ_t en la fibra inferior de la capa ligada, así:

$$\epsilon_t = \epsilon_6 * \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b * K_c * K_t * K_r * K_s \text{ (19)}$$

Donde ϵ_6 es la amplitud de deformación para que el material falle al millón (10^6) de ciclos de carga, b corresponde a la pendiente de la ley de fatiga, k_c es un parámetro que tiene en cuenta que el comportamiento que experimenta el material en laboratorio es diferente al de in-situ, k_s tiene en cuenta la resistencia a fatiga de la capa ligada, este parámetro depende de la rigidez de la capa de soporte (Subrasante), K_t concierne al factor de corrección por temperatura. $K_t = 1$ Si la temperatura del ensayo es igual a la del sitio, de otra manera [24]:

$$K_t = \sqrt{\frac{Mr(T)}{Mr(TMAP)}} \text{ (20)}$$

Donde T corresponde a la temperatura del ensayo en laboratorio, $TMAP$ es la temperatura media anual promedio del sitio donde se construirá el pavimento, $Mr(T)$ y $Mr(TMAP)$ son los módulos resilientes medidos a una temperatura T y $TMAP$ respectivamente, y K_r introduce el factor de seguridad al diseño, el cual se calcula mediante la siguiente ecuación [15]:

$$K_r = 10^{-u * b * \delta} \text{ (21)}$$

$$\delta = \sqrt{S_N^2 + S_H^2 \left(\frac{0.02}{b}\right)^2}$$

U es el fractil de la ley normal centrada, b es nuevamente la pendiente de la ley de fatiga del material, y δ es la desviación estándar. S_N es la desviación estándar de la ley de fatiga del material, expresada en logaritmo decimal del número de ciclos y S_H la desviación estándar de los espesores del material colocados in-situ [20].

La tabla 14 muestra los factores implementados para el cálculo de la deformación por tracción ϵ_t y la tabla 15 indica los resultados obtenidos para este parámetro de comprobación.

Tabla 14. Propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas (MA)

MA Tipo	AC	E (MPa) (10° C - 10 Hz)	E (MPa) (15° C - 10 Hz)	ε ₆ (10° C - 2,5Hz)	b	Kc	Ks	Kt	Kr
MA.SF	AC Sourface	7200	5400	1.00E-04	-0.2	-	-	-	-
MA.OR	AC 60/70	7200	5000	1.00E-04	-0.25	1.1	1	1.2	0.869
MA.PEBD	AC 60/70 + 5% PEBD	12100	8800	1.00E-04	-0.15	1	1	1.17	0.901
MA.GCR	AC 60/70 + 14% GCR	14800	12372	1.00E-04	-0.3	1	1	1.09	0.852
MA.GIL	AC 60/70 + 10% Gilsonita	12400	10100	1.00E-04	-0.3	1	1	1.11	0.852
MA.HUSIL	AC 60/70 + 1% Husil	8600	6200	1.00E-04	-0.15	1	1	1.18	0.901

Tras la obtención de las admisibilidades de los diferentes tipos de estructura de pavimento flexible, se procede a determinar las deformaciones ϵ_t y ϵ_z reales mediante iteraciones con diferentes espesores de la capa de base asfáltica (AB) usando el programa CEDEM, en el cual se utiliza un eje de referencia de 13 toneladas que distribuye dicha carga en cuatro llantas (dos llantas en cada esquina). La distancia entre ejes de llantas se supone igual a 37.5 cm. Cada llanta transmite al pavimento 3.5 toneladas, las cuales a su vez las distribuyen sobre la capa de rodadura suponiendo un área de contacto circular de 25cm de diámetro, generando una presión de contacto aproximada de 622 KPa [20]. La tabla 15 muestra los resultados obtenidos como deformaciones reales para los diferentes tipos de estructuras.

Tabla 15. Resultados del diseño racional

MA Tipo	ADMISIBLES		CEDEM		
	ε _z ADM	ε _t ADM (Mpa)	h AB (cm)	ε _z	ε _t
MA.OR	744.94.E-06	114.77.E-06	25	644.00.E-06	189.00.E-06
MA.PEBD	744.94.E-06	105.64.E-06	20	556.00.E-06	139.00.E-06
MA.GCR	744.94.E-06	093.22.E-06	18	398.00.E-06	093.10.E-06
MA.GIL	744.94.E-06	094.44.E-06	19	373.00.E-06	093.70.E-06
MA.HUSIL	744.94.E-06	106.10.E-06	24	351.00.E-06	102.00.E-06

De acuerdo con la tabla anterior la capa más delgada de la base AB se logra mediante la implementación de AC 60/70+GCR en la mezcla asfáltica, de esta manera se puede apreciar una reducción aproximada del 28% del espesor con respecto al necesario mediante la implementación de CA 60/70 original en la mezcla; es claro también que todos los CA 60/70 modificados mejoran las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas como se aprecia en la tabla 14, es por esto entonces que las solicitudes de espesores disminuyen para las variables de diseño expuestas.

Presupuesto : Finalmente, para el numeral presupuesto, se obtuvieron los espesores del diseño de pavimento flexible evidenciado en la Tabla 16, los cuales se evidencian que la iteración se realiza únicamente en la base asfáltica. Así mismo, en la tabla 17 se exponen las cantidades en volumen para cada diseño, teniendo en cuenta un ancho de carril sencillo de 3.5 adicionando una berma total de 1 m para 1 km de vía.

Tabla 16. Espesores

Capa/Tipo	Espesores (cm)				
	MA.OR(*)	MA.GCR(*)	MA.PEBD(*)	MA.HUSIL(*)	MA.GIL(*)
CA	5	5	5	5	5
BA(*)	25	18	20	24	19
BG	15	15	15	15	15
SBG	25	25	25	25	25

(*) La estructura anteriormente mencionada hace referencia únicamente a la base asfáltica.

Tabla 17. Cantidades

ELEMEN-TO	UNI-DAD	CANTIDADES (para 1 km de vía en carril sencillo)				
		CA 60/70 Sin modificar	CA 60/70 + GCR 14%	CA 60/70 + PEBD 5%	CA 60/70 + HUSIL 1%	CA 60/70 + Gilsonita 10%
CA	m3	225.00	225.00	225.00	225.00	225.00
BA	m3	1125.00	900.00	900.00	1080.00	855.00
BG	m3	675.00	675.00	675.00	675.00	675.00
SBG	m3	1125.00	1125.00	1125.00	1125.00	1125.00

En la Tabla 18 se exponen los valores unitarios obtenidos de la recopilación propia de los autores, teniendo en cuenta bases de datos actualizadas a septiembre de 2016 para valores IDU generalizados.

Tabla 18. Unitarios

TIPO CAPA	\$ UNITARIO (2017)				
	CA 60/70 Sin modificar	CA 60/70 + GCR 14%	CA 60/70 + PEBD 5%	CA 60/70 + HUSIL 1%	CA 60/70 + Gilsonita 10%
CA	\$ 695,213	\$ 695,213	\$ 695,213	\$ 695,213	\$ 695,213
BA	\$ 638,992	\$ 799,405	\$ 866,692	\$ 665,992	\$ 955,000
BG	\$ 124,535	\$ 124,535	\$ 124,535	\$ 124,535	\$ 124,535
SBG	\$ 103,535	\$ 103,535	\$ 103,535	\$ 103,535	\$ 103,535

Por último, se expone el valor total de construcción para los pavimentos flexibles, ver Tabla 19.

Tabla 19. Costo total para 1 km de vía en carril sencillo, ancho 3,5m

COSTO TOTAL	
CA 60/70 Sin modificar	\$ 1,075,826,925
CA 60/70 + GCR 14%	\$ 1,076,425,425
CA 60/70 + PEBD 5%	\$ 1,136,983,725
CA 60/70 + HUSIL 1%	\$ 1,076,232,285
CA 60/70 + Gilsonita 10%	\$ 1,173,485,925

De acuerdo a lo anteriormente presentando, el valor más económico viene siendo implementar un diseño con CA sin modificar, GCR, Husil, PEBD y por último Gilsonita. Sin embargo, a pesar de que el más económico es el CA sin modificar, definitivamente no se va a contemplar como solución debido a que el objetivo del presente caso de estudio es proponer un inductor para el CA sin modificar. Siguiendo esta misma línea de ideas, de acuerdo a todos los resultados obtenidos, se pretende proponer un CA con inductor que haga más durable el diseño de pavimento flexible en comparación al CA 60/70 sin modificar.

En este sentido, se puede decir que el CA 60/70 + 1% de Husil, Es el CA que en los termogramas presenta un fenómeno de oxidación al inicio de las temperaturas (30°C hasta 80°C) de aproximadamente 4%, es decir, al inicio de esta etapa el Husil es más susceptible a tener un proceso de envejecimiento, pero, no obstante, al elevar las temperaturas esto ya no ocurre y pierde menor porcentaje de masa en comparación a todos los asfaltos implementados, por lo cual podría llegar a decir que esta implementación sería más adecuada para la durabilidad de un pavimento flexible.

Discusión de los resultados

De acuerdo con los resultados de los ensayos de caracterización física el CA 60/70 implementado para las diferentes actividades del presente trabajo cumple con las especificaciones técnicas según INVIAS 2012; la disminución en la penetración y el aumento en el punto de ablandamiento que se presento en todos los CA modificados en comparación con los resultados del CA original, se puede considerar como un índice de aumento en la rigidez del material, sin que la muestra presente niveles de envejecimiento ni de oxidación. En cuanto a la ductilidad, se presento una disminución en los CA modificados con GCR, PEBD y Husil, debido a la rigidización obtenida, incrementando la posibilidad de la generación de microfisuras a bajas temperaturas, y por ende el decaimiento de la resistencia de las mezclas. Lo anterior es tal como ha sido reportado por otros investigadores que han realizado la caracterización física de este tipo de asfaltos [9; 21; 5; 6; 22; 23; 8; 7; 4].

El mejor grado de desempeño PG se obtuvo para el CA modificado con GCR con una temperatura máxima resistente de 70°C y mínima de 16°C (PG 70(16)), lo que nos lleva a pensar que este bitumen presenta menor susceptibilidad ante fenómenos de ahueamiento en climas calidos y una menor susceptibilidad ante fisu-

raciones por fatiga en temperaturas intermedias, confirmando de esta manera lo expuesto en la literatura [24] con respecto a la temperatura máxima resistente pero defiriendo en la temperatura intermedia debido a que estos investigadores presentan un grado PG 70(22) para este tipo de CA. Por otro lado cabe afirmar que los grados de desempeño mejoran para todos los asfaltos modificados, obteniendo la máxima temperatura resistente en el CA modificado con Gilsonita, lo cual se puede atribuir a la compatibilidad entre el aditivo y el bitumen al ser un asfalto natural con propiedades químicas similares que rigidizan el material.

Por otro lado, tras llevar a cabo los ensayos de MSCR con el fin evaluar la memoria elástica que llega a alcanzar CA y sus modificadores, se obtuvo que el CA original y el modificado con Husil incumplen los parámetros para un cálculo de intensidad de tráfico en número de ejes equivalentes (AASHTO D7405-10a), esto se debe a que son materiales con menor memoria elástica y no presentan una recuperación a la deformación para varios ciclos de carga tan rápida; sin embargo, los CA que presentan condiciones favorables son CA+GILSONITA, CA+GCR y el CA + PEBD, esto se debe a que son materiales con aditivos como el PEBD el cual es un polímero, termoplástico, plastómero con mejores propiedades elásticas y de recuperación a procesos de deformación permanente; a su vez, el GCR es un polímero, termoplástico, elastómero con mucha más capacidad a la recuperación inmediata luego de ser sometido a procesos de carga constante controlada por el tiempo, y finalmente la Gilsonita siendo esta la más favorable para condiciones como el ahueamiento, en la cual podría llegar a ser menos susceptible y más dúctil antes de presentarse la rotura del material y presentando una deformación recuperada mayor al 40% (R >40%).

Con respecto a los ensayos realizados para el análisis de la resistencia a la fatiga mediante la implementación de las técnicas de Lineal Amplitude Sweep (LAS), se puede afirmar de la primera etapa (a) *Barrido de frecuencia*, utilizada para la determinación de las propiedades reológicas, que, el CA modificado con Gilsonita presenta un menor nivel de daño tras la aplicación de 0,1% del esfuerzo sobre un rango de frecuencia de 0,2 a 30,0 Hz, esto debido a que la Gilsonita aumenta los niveles de rigidez del material, pero, en la etapa (b) *Barrido de amplitud*, utilizada para determinar la cantidad esperada de trafico, mediante la aplicación incremental lineal de carga de cizallamiento en el transcurso de 31 ciclos, se pudo observar que el mejor comportamiento lo obtuvieron el CA+Husil y el CA+GCR, lo cual nos permite confirmar lo presentado en la literatura [20; 22; 8; 7], donde se afirma que estos materiales presentan altos niveles de elasticidad, mientras que el CA + Gilsonita al ser un material rígido y por ende con un comportamiento frágil ante deformaciones aplicadas en temperaturas intermedias no presenta buenos resultados ante cargas repetitivas [23; 4 y 14].

Evidenciado en la técnica de TGA, el proceso de oxidación que presenta el CA + Husil es menor con respecto al tiempo que todos los CA implementados, esto aseguraría una mayor durabilidad de los diseños de pavimento flexible con este aditivo a lo largo del tiempo y a temperaturas mayores. Es decir, no presenta mayor pérdida de masa a través del tiempo y en aumento a la temperatura.

Por último, para los resultados obtenidos en el DSC, podemos evidenciar que los resultados reportados para el CA 60/70, los cuales son implementados en Colombia en mayores proporciones que cualquier otro CA; estos, estarían trabajando a fatiga

debido a que presentan Temperaturas de transición vítrea de 15.46° para el presente caso de estudio, y para otros reportados en la bibliografía temperaturas de hasta 12.75°C [11]. Lo anterior, es un indicador de que el CA 60/70 sin modificar tiene un comportamiento frágil. Así las cosas, para el presente caso de estudio, y gracias a la inclusión de los aditivos desarrollados a lo largo del artículo, estas temperaturas de transición vítrea aumentan considerablemente, dando un comportamiento más dúctil elevando la Tg inicial de 12.75°C a 37.5°C para PEBD, 31.25°C para GCR y 25°C para el Husil.

Conclusiones

Los aditivos aumentan el grado de desempeño PG a temperaturas intermedias de servicio. Lo anterior es un indicador de un asfalto más resistente a experimentar agrietamientos por fatiga asociados a envejecimiento prematuro y a cambios de comportamiento dúctil a frágil en el asfalto.

Para altas temperaturas de servicio, el PG incrementa cuando se emplean GCR, PEBD y Gilsonita. Adicionalmente con estos aditivos, la respuesta en el ensayo MSCR fue aumentar la resistencia a las deformaciones permanentes, lo que induce a pensar en su empleo en climas donde la mezcla asfáltica necesite resistir fenómenos asociados a ahuellamiento bajo carga cíclica.

El aditivo que generó la mayor rigidización del asfalto, y por ende, la mayor resistencia al fenómeno de deformaciones permanentes fue la Gilsonita. Sin embargo, con base en los resultados reportados en el ensayo LAS este material puede presentar un comportamiento frágil a temperaturas intermedias y bajas ($T < 19^{\circ}\text{C}$), que pudiesen inducir agrietamientos.

Con base en los resultados del ensayo LAS y realizando su análisis respectivo se puede denotar, que al modificar el asfalto con Husil, GCR y PEBD se puede incrementar la resistencia a la fatiga del asfalto, disminuyendo la posibilidad de generación de microfisuras en las capas de mezclas asfálticas implementadas en pavimentos en zonas con temperaturas intermedias.

Evidenciado en la técnica de TGA, el proceso de oxidación que presenta el CA + Husil es menor con respecto al tiempo que todos los CA implementados, esto aseguraría una mayor durabilidad de los diseños de pavimento flexible con este aditivo a lo largo del tiempo y a temperaturas mayores. Es decir, no presenta mayor pérdida de masa a través del tiempo y en aumento a la temperatura.

Según los resultados reportados del DSC, la implementación de cualquier aditivo haría que el CA 60/70 presentara un comportamiento menos frágil a temperaturas menores a un promedio de 31.25°C y no a 15.46°C como un CA 60/70 convencional; lo anterior podría afirmar que los CA 60/70 implementados en Bogotá D.C, trabajan a fatiga y con los aditivos propuestos en el presente trabajo aumentaría la temperatura de trabajo y no tendría un comportamiento frágil.

Referencias

- [1] Ministerio de transporte. Grupo de planificación sectorial. (2008)
- [2] Rondon, Hugo. "Mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho de llanata (Gcr): Estado del conocimiento y análisis de utilización en Colombia" VI Jornadas de pavimentos y Mantenimiento vial. (2011)
- [3] Castro, Lopez W.; Rondón, Quintana H.; y Barrero, Calixto J.,"Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD." Ingeniería. Volumen 21 No. 1, (Octubre 2015):7-18.
- [4] Rondon, Hugo; Fernandez, Wilmar; y Castro William; "Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con un desecho de polietileno de baja densidad PEBD" "Ingeniería de Construcción" Volumen 25 (2010); No. 1.
- [5] Especificaciones Técnicas IDU, Sección 560-11. Disponible en: <https://www.idu.gov.co/>
- [6] Figueroa, Infante A.; Fonseca, Santanilla E.; y Reyes, Lizcano F.,"Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado." Nombre revista. Volumen 13(1), (Enero 2009):45-70.
- [7] Rondón, Hugo; y Fernández, Wilmar; "Resistencia mecánica de una mezcla asfáltica modificada con aditivo químico." Tecnura. Volumen 18 (2014):97-108.
- [8] Rondon Quintana; Hugo.; Fernandez Gómez; Dario.; y Zafra Mejía; Carlos.," Comportamiento de una mezcla asfáltica fibrosa usando un aditivo químico para espumar el asfalto." Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia. Volumen 78, (2016):129-138.
- [9] Ameri, M.; Mansourian, A.; Ashani, S.; y Yadollahi, G.; "Technical study on the Iranian Gilsonite as an additive for modification of asphalt binders used in pavement construction." Construction and Building Materials. Volumen 25, (2011): 1379-1387.
- [10] Wang, Qiang.; Li, Shuo.; Wub, Xiaoyu.; Wang, Shifeng.; y Ouyang, Chunfa.; "Weather aging resistance of different rubber modified asphalt." Construction and Building Materials. Volumen 106, (2016):443-448.
- [11] Rondon, Hugo; y Reyes, Fredy; "Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con Gilsonita" Ingeniería. Volumen 36 (2012): 12-19.
- [12] Fernández, Gómez W.; Rondón, Quintana H.; Enrique, Daza C.; y Reyes, Lizcano F.," The effects of environmental aging on Colombian asphalts." The Science and Technology of Fuel and Energy. Volumen 115, (Enero 2014):321-328.
- [13] AASHTO TP 101 -12-UL. Estimating damage tolerance of asphalt Binders Using the linear Amplitudes Sweep.
- [14] Mahmoud, Ameri; Shams, Nowbakht; Mohammad, Mollayem; y Mohammad H., Mirabimoghaddam; "A study of fatigue modelling of hot mix asphalt mixtures based on the viscoelastic continuum damage properties of asphalt binder". (2016)
- [15] Reyes, L. F. A. "Diseño Racional de Pavimentos" 1ª. Ed - Bogotá: CEJA, 2003. 548p.: il.
- [16] Rondon, Hugo; Quintana, Jesus; y Urazan, Carlos." Behavior of gilsonite -modified hot mix asphalt by wet and dry processes" Universidad Nacional Autónoma de México. (2015).
- [17] Rondón, Hugo; y Fernández, Wilmar; "Resistencia mecánica de una mezcla asfáltica modificada con aditivo químico." Tecnura. Volumen 18 (2014):97-108.
- [18] Rondon, Hugo; Fernandez, Wilmar; y Castro William; "Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con un desecho de polietileno de baja densidad PEBD" "Ingeniería de Construcción" Volumen 25 (2010); No. 1.
- [19] Universidad de los Andes. "Segunda Fase Del Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas-Pista de prueba". (2005)
- [20] H. A. Rondon y F. A. Reyes. "Pavimentos- Materiales, construcción y diseño" Bogotá D.C: Ed. ECOE, 2015. 608p,

- [21]Aponte, María; y Beltrán, Paola; "Caracterización física y reológica de un ligante asfáltico 60-70 modificado para mezclas asfálticas tibias." (2013).
- [22]Ocampo, Manuel.; caicedo, B. y González, D. Mezclas asfálticas mejoradas con caucho molido proveniente de llantas. Revista de Ingeniería. 2002, núm. 16: 175-80
- [23]Rondon, Hugo; Quintana, Jesus; y Urazan, Carlos." Behavior of gilsonita -modified hot mix asphalt by wet and dry processes" Universidad Nacional Autónoma de México. (2015).
- [24]Castro, William; Rondon, Hugo y Barrero, Carlos; "Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD" Ingeniería Universidad Distrital" Volumen 21 (2015): No. 1.
- [25]Gama, D.; Rosa, Junio J.; Alves, de melo T.; y Guedes, Rodrigues J.; "Rheological studies of asphalt modified with elastomeric polymer." Construction and Building Materials. Volumen 106, (2016):290-295.