

INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL DEL EFECTO DEL CAUCHO RECICLADO Y
LA ASFALTITA

JAVIER EDUARDO MANTILLA FORERO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2017

INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL DEL EFECTO DEL CAUCHO RECICLADO Y
LA ASFALTITA

JAVIER EDUARDO MANTILLA FORERO

Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Civil

Director

EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN
Ingeniero Civil PhD. MSc.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2017

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	11
1 MARCO TEÓRICO	13
1.1 BITUMEN	13
1.2 CAUCHO MOLIDO	13
1.3 ASFALTITA	14
1.4 MÓDULO COMPLEJO.....	14
1.5 ÁNGULO DE FASE.....	14
2 MATERIALES Y METODOLOGÍA	16
2.1 MATERIALES	16
2.2 PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS	18
2.3 MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES VISOELÁSTICAS DEL MATERIAL..	19
3 EJECUCIÓN, RESULTADO Y ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO	20
3.1 EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS	20
3.2 RESULTADO DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN AXIAL	21
3.3 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	24
3.3.1 Análisis Reológico	24
3.3.2 Evaluación de Fatiga	27
3.3.3 Análisis Isócrono	29
3.3.4 Diagrama Cole-Cole	31
3.3.5 Diagrama del Espacio de Black	33

4	CONCLUSIONES	35
5	RECOMENDACIONES	37
6	REFERENCIAS.....	38
7	BIBLIOGRAFÍA	40

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Dispositivo dinámico METRAVIB DMA+1000	19
Figura 2. Emplazamiento de la briqueta.....	21
Figura 3. Ejemplo de la interfaz: resumen de resultados	22
Figura 4. Ejemplo de la interfaz: gráfica del módulo de elasticidad contra la frecuencia	23
Figura 5. Módulo Complejo a 22°C para todas las mezclas asfálticas modificadas	25
Figura 6. Ejemplo de la interfaz: gráfica del módulo de elasticidad contra la frecuencia	26
Figura 7. Valores de $E^* \text{Sen } \delta$ de los bitúmenes analizados a una frecuencia de referencia de 10Hz.....	28
Figura 8. Gráfica isócrona del Módulo Complejo a 1 Hz para todas las mezclas asfálticas modificadas.....	30
Figura 9. Representación de los resultados experimentales en el gráfico Cole-Cole	32
Figura 10. Representación de los resultados experimentales en el Espacio de Black.....	34

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades del cemento asfáltico	16
Tabla 2. Propiedades de la asphaltita	17

RESUMEN

TÍTULO: INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL DEL EFECTO DEL CAUCHO RECICLADO Y LA ASFALTITA *

AUTOR: JAVIER EDUARDO MANTILLA FORERO**

PALABRAS CLAVE: VISCOELÁSTICO; MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA; ASFALTITA; CAUCHO MOLIDO; MÓDULO COMPLEJO.

DESCRIPCIÓN:

En el presente trabajo se plasman los resultados obtenidos en la primera investigación experimental, a la fecha, que analiza los efectos que tiene la adición de caucho molido reciclado de llantas en desuso y asfalto natural (asfaltita), en simultánea, en el cemento asfáltico. La metodología implementada en la ejecución de las pruebas inicia con la búsqueda de información en la bibliografía mundial con el fin de determinar las proporciones adecuadas de los aditivos. Teniendo en cuenta que no existía una mezcla de las mismas características en los catálogos científicos, fue necesario reunir conceptos teóricos de diversas fuentes para establecer las posibles muestras a ensayar. Seguido a esto y tras haber obtenido los materiales requeridos para la elaboración de las briquetas de asfalto, se materializan las mezclas en el laboratorio de caracterización de materiales Álvaro Beltrán Pinzón de la Universidad Industrial de Santander. Finalmente, se realizan ensayos dinámicos de compresión axial en el dispositivo dinámico METRAVIB DMA+1000, ubicado dentro del laboratorio y se analizan los resultados obtenidos. Se concluye que el asfalto modificado con estos dos aditivos en simultánea muestra un incremento en la rigidez y la elasticidad, lo cual representa una mejora favorable, en estos aspectos, que puede llegar a optimizar el desempeño de las carpetas asfálticas. No obstante, es pertinente orientar futuras investigaciones hacia el estudio del comportamiento de la mezcla propuesta, por ejemplo, ante esfuerzos de corte. De esta manera será posible tener un concepto más amplio sobre el desempeño del compuesto.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzón, Ingeniero Civil PhD. MSc.

ABSTRACT

TITLE: INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL DEL EFECTO DEL CAUCHO RECICLADO Y LA ASFALTITA *

AUTHOR: JAVIER EDUARDO MANTILLA FORERO **

KEYWORDS: VISCOELASTIC; MODIFIED ASPHALT MIXTURE; ASPHALTITE; CRUMB RUBBER; COMPLEX MODULUS.

DESCRIPTION:

In the present work is shown the results obtained in the first experimental assessment, to date, which analyze the effect of the addition of recycled crumb rubber from discarded tires and natural asphalt (asphaltite), in simultaneous, on the asphalt cement. The methodology that has been implemented in the execution of the test begins with searching information in the world wide bibliography in order to determine the suitable proportions of additives. Taking into account there is no record of a mixture with the same characteristics in the scientific catalogues, it was necessary to gather theoretical concepts of various sources for the purpose of establish the samples to testing. Followed to this and after obtaining the required materials for the asphalt briquettes elaboration, the mixtures are made in the laboratory of materials characterization Álvaro Beltrán Pinzón of the Industrial University of Santander. Finally, the axial compression dynamic test are carried out in the dynamic machine METRAVIB DMA+1000, paced in the laboratory and the obtained results are analyzed. It is concluded that the asphalt modified with both additives shows an increment in stiffness and elasticity, which represents a positive enhancement, in these aspects, that can improve the behavior of asphalt binders. Notwithstanding, is appropriate to orientate future investigations towards the behavior analysis of the compound, for example, against shear stress. This way it will be possible to have a wider concept about the performance of the compound.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzón, Ingeniero Civil PhD. MSc.

INTRODUCCIÓN

El comportamiento de las carpetas asfálticas se ha visto afectado por el incremento de las cargas en el tráfico vehicular, acompañado por el aumento en la velocidad de viaje entre otros. En Colombia como en el mundo, el parque automotor ha aumentado considerablemente, tal como lo evidencian las cifras del Ministerio de Transportes de Colombia [1]. Este hecho genera la necesidad de crear estructuras más resistentes recurriendo a nuevos aditivos y tecnologías.

Diversas técnicas y materiales han sido empleadas con el objetivo de optimizar el comportamiento de las Mezclas Densas Calientes (M.D.C.). Es posible modificar ciertas características del asfalto en el proceso de refinación, sin embargo, estas variaciones no resultan suficientes en aspectos como el incremento en el rango de la temperatura de servicio del material [2]. Polímeros como el estireno-butadieno-estireno (S.B.S.), catalogado como uno de los mejores aditivos para la modificación del asfalto [3] o elastómeros como el Caucho Molido (C.M.), usado desde los años 60 y extraído de las llantas de automóviles que han cumplido el ciclo de vida útil, se han implementado y estudiado arrojando buenos resultados, contribuyendo a reducir los costos de las mezclas asfálticas al sustituir una parte de los agregados de los pavimentos tradicionales. Este último se presenta también como una solución al problema de disposición final de las llantas usadas. Igualmente asfaltos naturales, los cuales producen bitúmenes modificados con mejor desempeño a altas temperaturas y de mayor dureza [4] han sido utilizados con frecuencia.

Las investigaciones efectuadas en estudios anteriores a la fecha, aunque han arrojado excelentes resultados, no han evaluado las cualidades del C.M. y el asfalto natural en la misma mezcla y en las proporciones óptimas descritas en estudios previos. El propósito del presente trabajo es analizar la rigidez, bajo cargas de

compresión axial, de las mezclas asfálticas modificadas con asfaltita y C.M. proveniente de llantas recicladas incorporados mediante el proceso húmedo, proceso que genera en todos los casos mejores resultados [5], [6], variando las proporciones de los aditivos, las frecuencias de aplicación de la carga y la temperatura a la cual se realiza la prueba. El estudio se ejecuta por medio del dispositivo dinámico METRAVIB DMA+1000 a diferentes temperaturas y frecuencias y los resultados son representados principalmente en la gráfica Cole-Cole y el Espacio de Black.

1 MARCO TEÓRICO

1.1 BITUMEN

El *liquid petroleum asphalt*, también conocido como bitumen o cemento asfáltico (C.A.), es un compuesto viscoelástico que ha sido ampliamente utilizado en la industria para la pavimentación de vías, impermeabilización de cubiertas, construcción, entre otros [3]. Es un aglomerante que resulta de la destilación fraccionada del petróleo y está compuesto principalmente por carbono y átomos de hidrógeno. Presenta partes sólidas conocidas como asfaltenos que permiten la adhesión de los agregados del pavimento, y una matriz oleosa (maltenos) que brinda ductilidad a la mezcla [7]. Hoy en día se busca mejorar las cualidades de este compuesto por medio de mezclas con materiales que puedan incrementar el desempeño ante condiciones adversas, ya sean naturales (ej., temperatura, lluvia) o antrópicas.

1.2 CAUCHO MOLIDO

El caucho molido (C.M.) resultante de la trituración de llantas de vehículos en desuso es ampliamente utilizado como modificador del C.A. El procesamiento de las llantas en desuso se puede llevar a cabo mediante tecnologías de molienda criogénica o gracias al proceso de molienda ambiental, en el cual la llanta se procesa a temperatura ambiente o por encima de esta. En [8] se demuestra que el área superficial del C.M. resultante de la molienda ambiental es dos veces mayor que la obtenida por el método alterno, generando así, un mayor módulo complejo y un mayor ángulo de fase en los bitúmenes modificados, lo cual implica una mayor resistencia a las deformaciones y una menor recuperación elástica. El uso de materiales como el polvo de neumático reciclado, no solo representa una solución

a los problemas medioambientales sino que resulta una manera efectiva de mejorar el comportamiento del asfalto.

1.3 ASFALTITA

La asfaltita es bitumen natural comúnmente incorporado para modificar las M.D.C. en la industria, que se encuentra en estado sólido, son de color negro brillante, contiene hidrocarburos de alta pureza y presenta gran cantidad de asfaltenos, los cuales brindan rigidez a la carpeta asfáltica. Se ha comprobado que la asfaltita genera una disminución en la penetración del asfalto y de esta manera aumenta la rigidez y la resistencia a deformaciones permanentes [9]. Sin embargo, tras la incorporación del mineral aumenta la tendencia al agrietamiento, mostrando un comportamiento quebradizo a bajas temperaturas debido a que pierde elasticidad [5], [10].

1.4 MÓDULO COMPLEJO

El módulo complejo del asfalto es un número que puede expresarse como el valor absoluto de la raíz de la suma de los cuadrados de la respuesta viscoelástica del material, en donde E_1 es un número real que representa la respuesta elástica y E_2 es un número imaginario que corresponde a la respuesta viscosa del material que depende de la temperatura y la frecuencia de la aplicación de las cargas.

1.5 ÁNGULO DE FASE

El ángulo de fase es un número que refleja los retrasos entre el esfuerzo aplicado (*stress*) y la respuesta del compuesto (*strain*), típico de los materiales viscoelásticos [11]. Los materiales netamente elásticos se caracterizan por presentar un ángulo de fase de cero grados, mientras que los compuestos completamente viscosos tienen

un desfase de noventa grados entre la aplicación de la carga y la respuesta del material.

2 MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1 MATERIALES

Se utilizó cemento asfáltico (C.A.) 40-50 obtenido de la planta de asfaltos de Manufacturas y Procesos Industriales Ltda. ubicada en la ciudad de Barrancabermeja (Colombia). Este material, derivado del petróleo, junto al agregado natural de diversos tamaños, son los encargados de crear las M.D.C.: estructuras flexibles dispuestas para soportar el tráfico vehicular. El bitumen manejado presenta las características expuestas en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del cemento asfáltico

Prueba	Método	AC 40-50
Penetración (25°C, 100 gr, 5 s).	I.N.V. E-706	46 (0,1 mm)
Punto de ablandamiento	I.N.V. E-712	53,4 °C
Índice de penetración	I.N.V. E-724	-0,58
Viscosidad (60°C)	I.N.V. E-716	3608 P
Viscosidad de Brookfield (60°C)	I.N.V. E-717	3496 P
Loss by heating in thin film (163°C, 85 min)	I.N.V. E-720	0,32%
Ductilidad (25°C, 5 cm/min)	I.N.V. E-702	124,8 cm
Gravedad específica	I.N.V. E-707	1,016
Punto de inflamación	I.N.V. E-709	306 °C
Solubilidad en tricloroetileno	I.N.V. E-713	99,55%
Contenido de agua	I.N.V. E-704	0,00%
Penetración del residuo después de la pérdida por calentamiento en porcentaje de la penetración original	I.N.V. E-706	62,40%
Incremento en el punto de ablandamiento tras pérdida por	I.N.V. E-712	6,4 °C

calentamiento en película delgada

Tomado de: Manufacturas y procesos industriales Ltda

Igualmente se empleó asfaltita extraída de una mina del Cesar (Colombia) y fue triturado hasta obtener partículas las cuales pasan el tamiz N° 100. Las características que presenta son expuestas en la tabla 2.

Tabla 2. Propiedades de la asfaltita

Prueba	Método	Asfaltita
Penetración (15°C, 100 gr, 5 s).	I.N.V. E-706	0,3 (0,1 mm)
Penetración (25°C, 100 gr, 5 s).	I.N.V. E-706	0,7 (0,1 mm)
Penetración (40°C, 100 gr, 5 s).	I.N.V. E-706	2 (0,1 mm)
Punto de ablandamiento	I.N.V. E-712	183 °C
Ductilidad (25°C, 5 cm/min)	I.N.V. E-702	0 cm
Gravedad específica	I.N.V. E-707	1,054
Punto de inflamabilidad	I.N.V. E-709	194 °C
Solubilidad en tricloroetileno	I.N.V. E-713	98,30%

Tomado de: [12]

Por otro lado se manejó polvo de neumático reciclado proporcionado por la compañía Recyclair (Bogotá, Colombia) como modificador del C.A. En este caso el material fue molido ambientalmente hasta pasar por el tamiz N° 100. La cantidad incorporada para las modificaciones con caucho fue de 8%, determinada como la más óptima según los estudios [13].

Finalmente se dispuso de arena extraída del cañón del Chicamocha en Santander (Colombia), la cual fue obtenida por medio de la compañía Prevesa LTDA. Este material fue triturado finamente con el propósito de conseguir partículas retenidas

en el tamiz N° 200. Mediante la caracterización en el laboratorio, se obtuvo el peso específico y de esta manera se encontró la equivalencia volumétrica de la arena con el C.M. empleado en la mezcla. Esto con el fin de comparar el comportamiento de la mezcla al reemplazar una fracción de los agregados finos por el polímero reciclado.

2.2 PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS

Se elaboraron cuatro tipos de C.A. modificado en briquetas de 2 cm de alto por 1 cm de diámetro con el objetivo de ensayar, principalmente, el comportamiento de los especímenes a compresión axial a diferentes temperaturas y frecuencias, teniendo como referencia el asfalto limpio 40-50. Las dimensiones de las muestras fueron establecidas según los parámetros de máquina en donde se realizaron los experimentos.

En primer lugar se elaboraron briquetas de C.A. más asfaltita, añadiendo 5 y 10 % del mineral respecto a la masa total de asfalto e implementando el proceso de incorporación por vía húmeda a una temperatura de 160°C durante 20 minutos, esto con el fin de no alterar las propiedades iniciales de asfalto, ya que la exposición a una temperatura superior durante un periodo de tiempo mayor induce envejecimiento debido a la pérdida de componentes químicos por oxidación [14]. Subsiguiente, se elaboró la mezcla de C.A. con una adición de 8% de C.M. en relación a la masa de asfalto. En tercer lugar, se incorporó nuevamente a la mezcla 8% de C.M. en relación a la masa del asfalto más asfaltita (A/AC = 5 and 10%). Debido a que la asfaltita al ser calentada se integra en el asfalto, se mantuvieron las mismas condiciones de tiempo y temperatura mencionadas anteriormente para elaborar la mezcla. Finalmente se elaboraron briquetas de asfalto más asfaltita, esta vez, sustituyendo el volumen de caucho incorporado anteriormente por agregados finos, manteniendo las características de preparación i.e. 160°C por 20 minutos.

Es importante mantener las briquetas refrigerada con el fin de preservar las dimensiones iniciales antes de iniciar la prueba.

2.3 MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES VISOELÁSTICAS DEL MATERIAL

Mediante el dispositivo dinámico METRAVIB DMA+1000 se logró determinar las propiedades del asfalto tras efectuar pruebas de tracción-compresión con desplazamiento dinámico de $1E-5$ m, frecuencias de carga de 1, 3, 5, 7, 10 y 25 Hz y a diferentes temperaturas (0, 5, 10, 15, 20 y 30°C).

Con el propósito de poner en marcha las pruebas no destructivas, es necesario adquirir los conocimientos necesarios sobre la preparación y la puesta en marcha de la máquina. De igual manera es imprescindible contar con los materiales necesarios para que el dispositivo dinámico funcione correctamente i.e.: aire comprimido, electricidad, aire comprimido.

Figura 1. Dispositivo dinámico METRAVIB DMA+1000



3 EJECUCIÓN, RESULTADO Y ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

3.1 EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS

Se libera el flujo de aire comprimido hacia la máquina y se suministra energía al sistema para poner en marcha todo el mecanismo. Si se van a ejecutar las pruebas a temperaturas diferentes a la del ambiente, se debe conectar el tanque cargado de nitrógeno líquido y se debe abrir la válvula de flujo. Se crea un proyecto en el software destinado para el dispositivo y se estipulan los parámetros deseados.

Se debe emplazar la probeta entre las placas de confinamiento destinadas para la ejecución de las pruebas dinámicas de compresión axial y es necesario fijar la probeta a las misas con pegamento instantáneo.

Finalmente se corre el proyecto desde el computador encargado de controlar la máquina y se espera a que termine el procedimiento para poder obtener y analizar los resultados.

Figura 2. Emplazamiento de la briqueta



3.2 RESULTADO DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN AXIAL

Tras la terminación de las pruebas, la máquina emite una alerta y se habilita la posibilidad de acceder a los resultados. Conociendo la interface del programa, es posible generar tablas detalladas con los resultados y gráficas en donde se analiza el comportamiento del material viscoelástico en función de los parámetros elegidos.

Figura 3. Ejemplo de la interfaz: resumen de resultados

Dynatest - [Stabilized_compresion traccion asf40-50-caucho-asfaltita (100% Asfalto 1).dres:2]

File View System Test Results Tools Window Help

Test: Stabilized_compresion traccion asf40-50-caucho-asfaltita (100% Asfalto 1).dres
Specimen: Specimen

dyn D = 1.5e-5 (m) Freq = 1 (Hz)

T (°C)	Freq (Hz)	T (°C)	K (N/m)	δ (°)	E (Pa)	E' (Pa)	E'' (Pa)
-2.94E-02	1.	-2.94E-02	1.49E+06	3.33E+01	2.48E+08	2.07E+08	1.36E+08
5.03E+00	1.	5.03E+00	9.62E+05	3.74E+01	1.60E+08	1.28E+08	9.74E+07
1.02E+01	1.	1.02E+01	4.92E+05	4.35E+01	8.20E+07	5.95E+07	5.65E+07
1.50E+01	1.	1.50E+01	2.28E+05	5.01E+01	3.80E+07	2.44E+07	2.91E+07
2.00E+01	1.	2.00E+01	9.59E+04	5.67E+01	1.60E+07	8.78E+06	1.34E+07
3.00E+01	1.	3.00E+01	1.64E+04	6.75E+01	2.73E+06	1.04E+06	2.52E+06

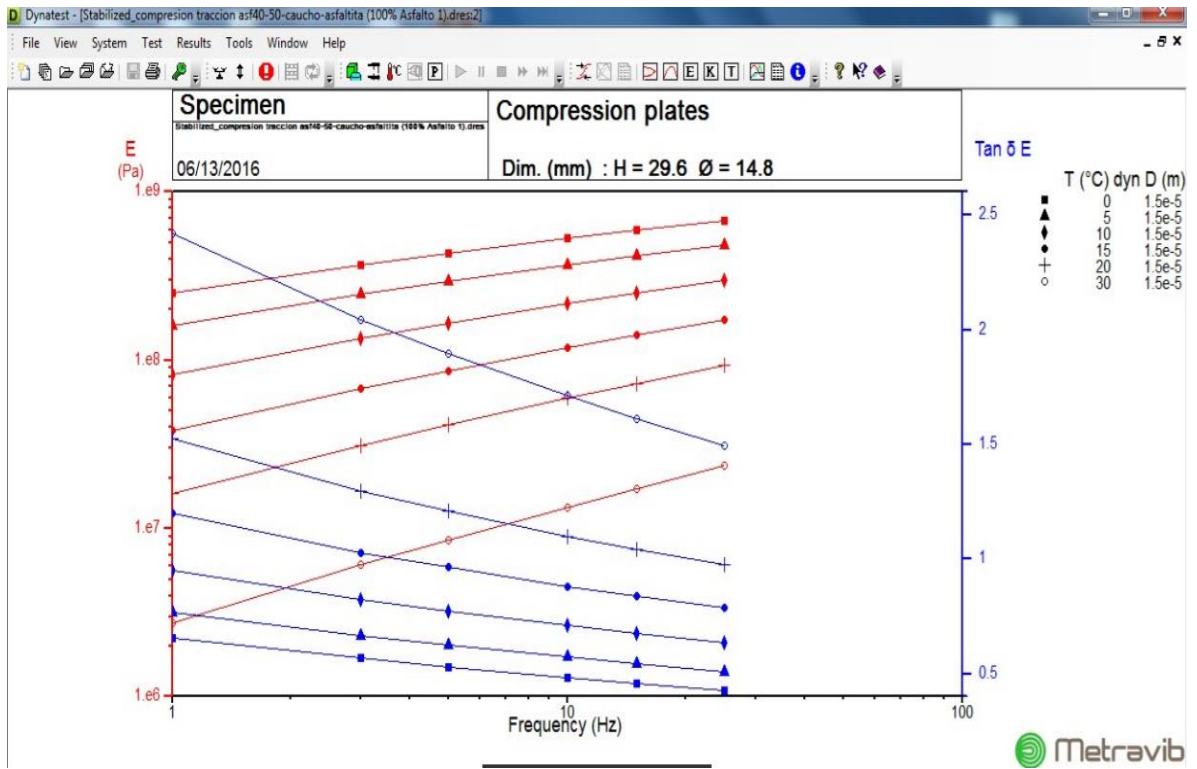
dyn D = 1.5e-5 (m) Freq = 3 (Hz)

T (°C)	Freq (Hz)	T (°C)	K (N/m)	δ (°)	E (Pa)	E' (Pa)	E'' (Pa)
-2.13E-02	3.	-2.13E-02	2.19E+06	2.95E+01	3.66E+08	3.18E+08	1.80E+08
5.01E+00	3.	5.01E+00	1.47E+06	3.36E+01	2.46E+08	2.05E+08	1.36E+08
1.01E+01	3.	1.01E+01	8.06E+05	3.94E+01	1.35E+08	1.04E+08	8.54E+07
1.50E+01	3.	1.50E+01	4.04E+05	4.58E+01	6.73E+07	4.70E+07	4.83E+07
1.99E+01	3.	1.99E+01	1.86E+05	5.24E+01	3.10E+07	1.89E+07	2.45E+07
3.00E+01	3.	3.00E+01	3.61E+04	6.39E+01	6.03E+06	2.65E+06	5.41E+06

dyn D = 1.5e-5 (m) Freq = 5 (Hz)

T (°C)	Freq (Hz)	T (°C)	K (N/m)	δ (°)	E (Pa)	E' (Pa)	E'' (Pa)
1.27E-02	5.	1.27E-02	2.58E+06	2.79E+01	4.30E+08	3.80E+08	2.01E+08
5.01E+00	5.	5.01E+00	1.76E+06	3.19E+01	2.93E+08	2.49E+08	1.55E+08
1.00E+01	5.	1.00E+01	9.93E+05	3.77E+01	1.66E+08	1.31E+08	1.01E+08
1.50E+01	5.	1.50E+01	5.14E+05	4.39E+01	8.57E+07	6.18E+07	5.94E+07
1.98E+01	5.	1.98E+01	2.46E+05	5.04E+01	4.10E+07	2.62E+07	3.16E+07
3.00E+01	5.	3.00E+01	5.08E+04	6.22E+01	8.48E+06	3.96E+06	7.50E+06

Figura 4. Ejemplo de la interfaz: gráfica del módulo de elasticidad contra la frecuencia



3.3 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

3.3.1 **Análisis Reológico** La reología es la rama de la física que estudia la manera como fluyen o se deforman los cuerpos ante la aplicación de cargas externas. Con las pruebas experimentales de carga axial ejecutadas, es posible graficar la relación entre la frecuencia de aplicación de la carga dinámica, con el módulo complejo que exhibe el material y el ángulo de fase resultado de la demora entre la aplicación de la fuerza y la respuesta del compuesto. Los resultados se presentan en las figuras 5 y 6 a una temperatura de referencia de 22°C. El Módulo complejo en la Figura 5 refleja un considerable aumento en la muestra de Asfalto + Asfaltita (10%) + Agregados (Vol. Equivalente.), superior a todas las otras mezclas, en especial a frecuencias elevadas. Las muestras de Asfalto Limpio y Asfalto + C.M. (8%) son las que presentan un menor $|E^*|$ lo cual indica que tienen una menor resistencia a la deformación. Los asfaltos en los cuales se adicionó asfalto natural y C.M. presentan un mejor módulo complejo que el asfalto limpio, indicando una mayor rigidez que se hace más evidente a medida que la frecuencia incrementa. El ángulo de fase en la Figura 6 presenta una disminución para todas las M.D.C. modificadas, en especial para la muestra modificada de Asfalto + Asfaltita (10%) + C.M. (8%). Esto permite vaticinar que una combinación entre estos dos materiales puede ser una buena alternativa a la hora de configurar una carpeta asfáltica. Sin embargo, es necesario analizar el desempeño de las mezclas detenidamente ya que el aumento de la rigidez puede generar un comportamiento quebradizo por fatiga del material.

Figura 5. Módulo Complejo a 22°C para todas las mezclas asfálticas modificadas

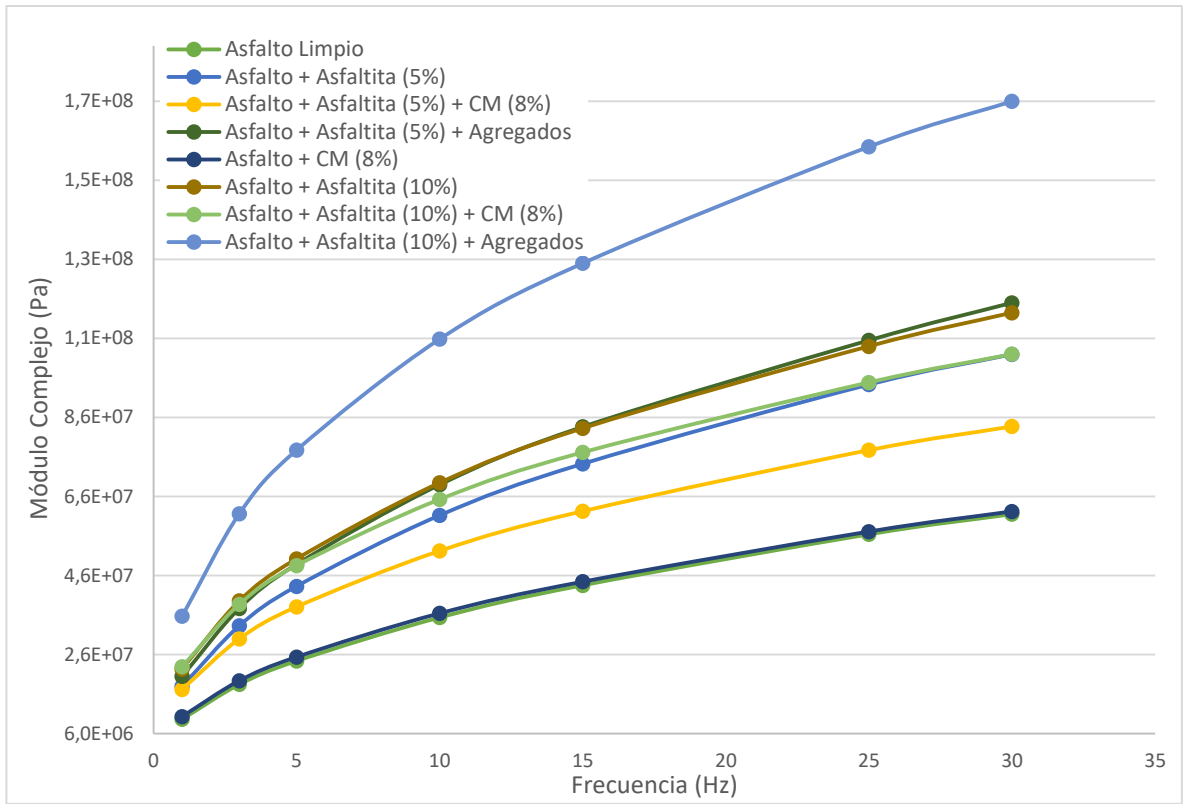
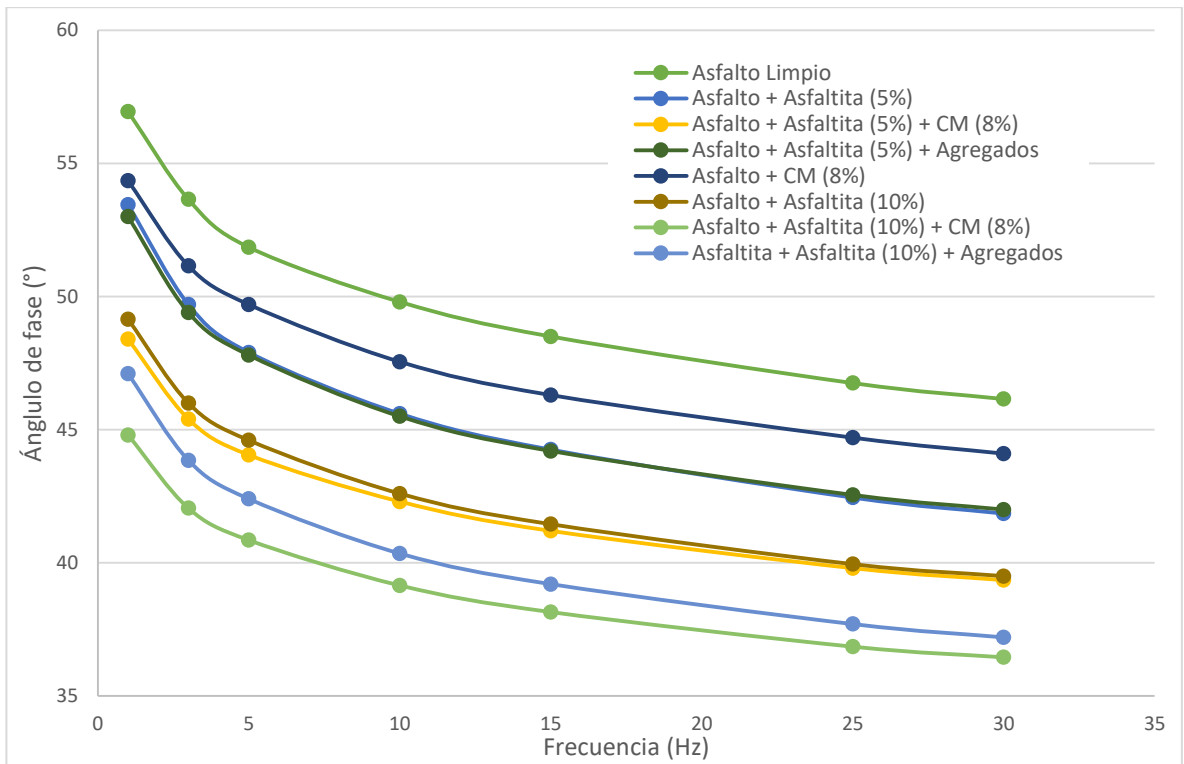
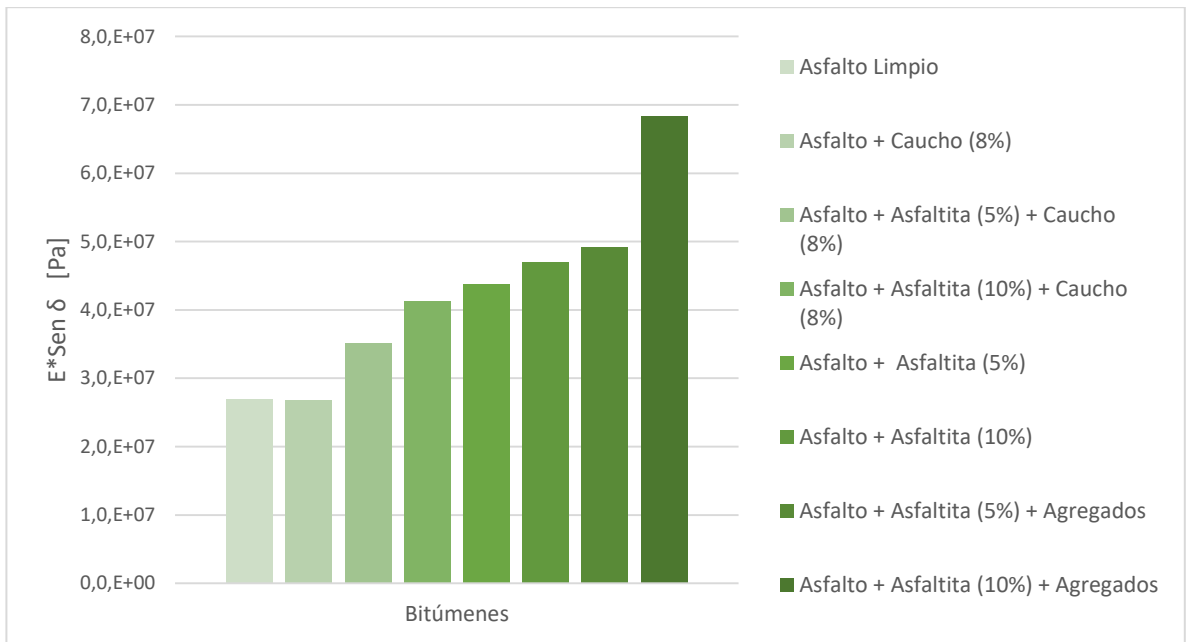


Figura 6. Ejemplo de la interfaz: gráfica del módulo de elasticidad contra la frecuencia



3.3.2 Evaluación de Fatiga Haciendo una analogía con el sistema de diseño Superpave creado en el *Strategic Highway Research Program* (SHRP), en donde el valor de $G^* \text{ sen } \delta$ es usado para medir el desempeño del asfalto teniendo en cuenta factores como el proceso de construcción, el envejecimiento del asfalto y la incidencia del clima, el valor de $E^* \text{ sen } \delta$ fue evaluado a una temperatura de referencia de 22°C con el fin de observar la predisposición de las mezclas asfálticas a la fractura por fatiga. El producto del módulo de cortante G^* y el seno del ángulo de fase δ es usado en el método Superpave para el diseño de las carpetas asfálticas con el objetivo de controlar la fatiga del material. Valores bajos resultantes del producto de $G^* \text{ sen } \delta$ son considerados óptimos en cuanto a la resistencia a la fractura por fatiga [15]. Partiendo de esta premisa y ante el notable incremento del módulo complejo en la mayoría de los bitúmenes estudiados, se decide hacer el análisis de las muestras presentado en la Figura 7. Se evidencia que el aumento del módulo complejo de los bitúmenes repercute directamente en un aumento de $E^* \text{ sen } \delta$, lo que significa que tiene un impacto negativo en la resistencia a la fractura por fatiga del material. La mezcla de Asfalto limpio + Asfaltita (5 y 10%) + Agregados mostró los mayores valores, mientras que la combinación de asfalto con C.M. no generó cambios significativos respecto al asfalto limpio. Es importante remarcar que, aunque hay un aumento en $E^* \text{ sen } \delta$ para las mezclas de asfalto, asfaltita y caucho, la unión de estos tres componentes en un mismo bitumen mejoran la resistencia a la fractura del pavimento con respecto a las mezclas en las cuales se agrega, al asfalto limpio, asfaltos naturales y agregados. De esta manera, al sustituir el agregado fino por caucho minimiza las posibilidades de fractura del material, las cuales aumentan a la hora de adicionar asfaltita.

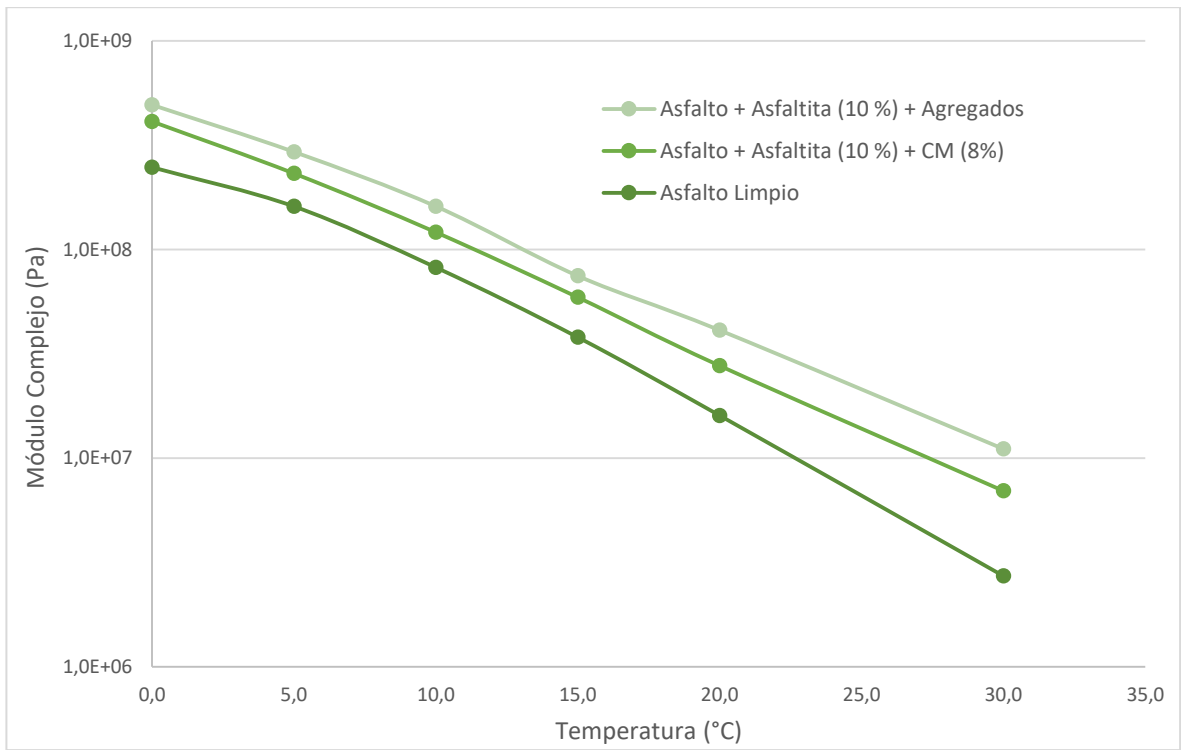
Figura 7. Valores de $E^* \text{Sen } \delta$ de los bitúmenes analizados a una frecuencia de referencia de 10Hz



3.3.3 Análisis Isócrono La gráfica isócrona representa el módulo complejo frente a la temperatura de análisis a una frecuencia de referencia de 1 Hz y es presentada en la Figura 8. Teniendo en cuenta que el principal objetivo de esta investigación es estudiar la variación de la rigidez en las combinaciones bituminosas propuestas con respecto al asfalto base 40-50 y determinar si la combinación propuesta puede mejorar el desempeño de los pavimentos en comparación con las mezclas tradicionales, se decide seleccionar las briquetas de: Asfalto Limpio, Asfalto + Asfaltita (10%) + C.M. (8%) y Asfalto + Asfaltita (10%) + Agregados debido a las características exhibidas en función de E^* . Esta última hace referencia a una mezcla de asfalto, asfaltos naturales más un volumen de agregados finos equivalente al volumen que ocupa el caucho molido en la segunda mezcla de referencia seleccionada.

El incremento de $|E^*|$ en todo el rango de temperaturas de las dos mezclas modificadas se mantiene uniforme y representa un aumento en la rigidez del asfalto, lo que traduce en una mejor resistencia ante la sollicitación de cargas externas. A pesar de que la adición de C.M. disminuye el módulo complejo en comparación a la tercer muestra modificada de referencia, no deja de ser mayor con respecto al asfalto limpio, hecho que remarca la hipótesis de que la incorporación de asfaltos naturales y caucho reciclado al asfalto limpio puede ser una manera de mejorar la rigidez del material.

Figura 8. Gráfica isócrona del Módulo Complejo a 1 Hz para todas las mezclas asfálticas modificadas

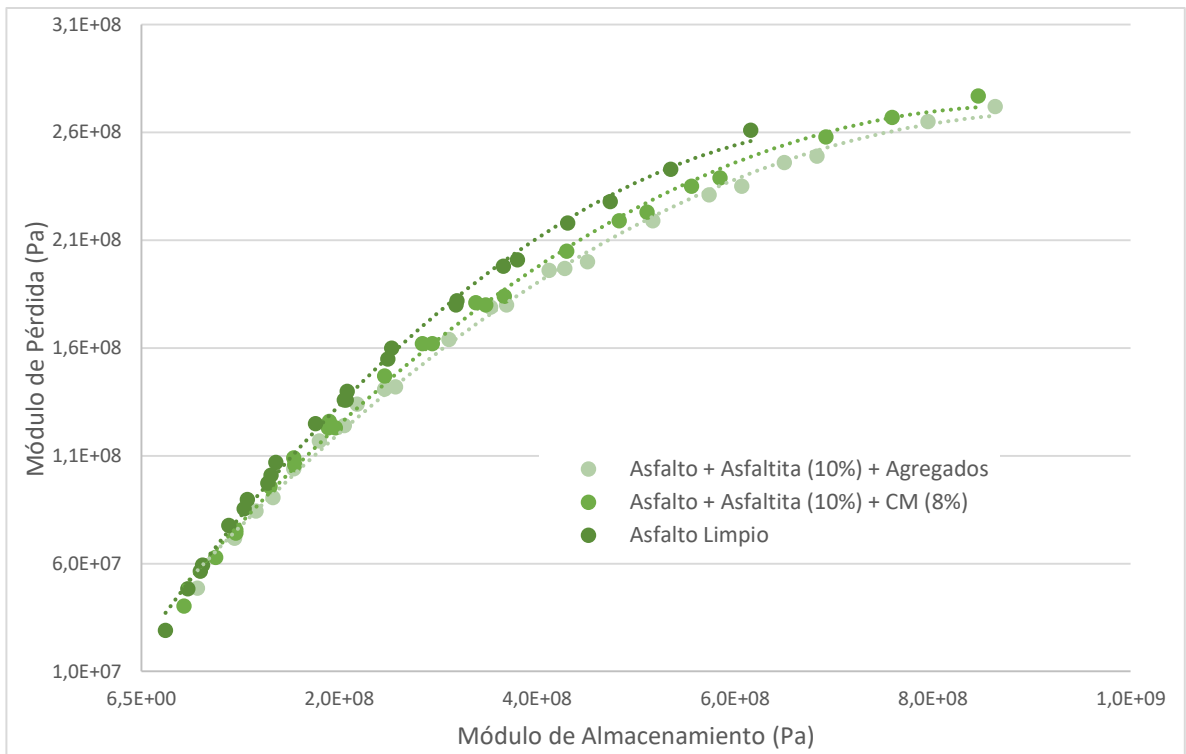


3.3.4 Diagrama Cole-Cole La gráfica Cole-Cole permite representar el comportamiento reológico del asfalto en un plano complejo en el cual interactúan una parte imaginaria (Módulo de Pérdida) y una parte real (Módulo de Almacenamiento) correspondientes respectivamente a la parte viscosa y elástica del módulo complejo del material [11].

Los puntos en la gráfica son isócronos e isoterms. No obstante, es posible representar los valores del módulo de almacenamiento y el módulo de pérdida a diferentes temperaturas y frecuencias en una misma gráfica, formando una única curva. Sin embargo, la gráfica Cole-Cole no puede ser usada para determinar las propiedades viscoelásticas del material a una frecuencia y temperatura diferente, lo cual resultaría necesario a la hora de analizar el desempeño de un pavimento con mayor detalle. Para ello es indicado construir Curvas Maestras [16].

El comportamiento del módulo complejo del asfalto en un plano complejo puede ser analizado en la Figura 9. A altas temperaturas las tres muestras presentan un comportamiento similar, con baja respuesta elástica y un bajo módulo de pérdida. Aunque se aprecia una menor elasticidad en el asfalto limpio. A medida que disminuye la temperatura, se aprecia una diferencia entre el asfalto limpio y las dos muestras de asfalto modificado. Las dos últimas mantienen un desempeño semejante, mostrando un importante aumento en la capacidad para almacenar energía mediante el incremento en el Módulo de Almacenamiento E' , que permite a la carpeta asfáltica una mayor resistencia al ahuellamiento, entre otros. Cabe resaltar que en la mezcla modificada que no contiene agregados, estos están siendo reemplazados por C.M. conservando la equivalencia volumétrica, brindando una alternativa económica y al mismo tiempo una solución medioambiental.

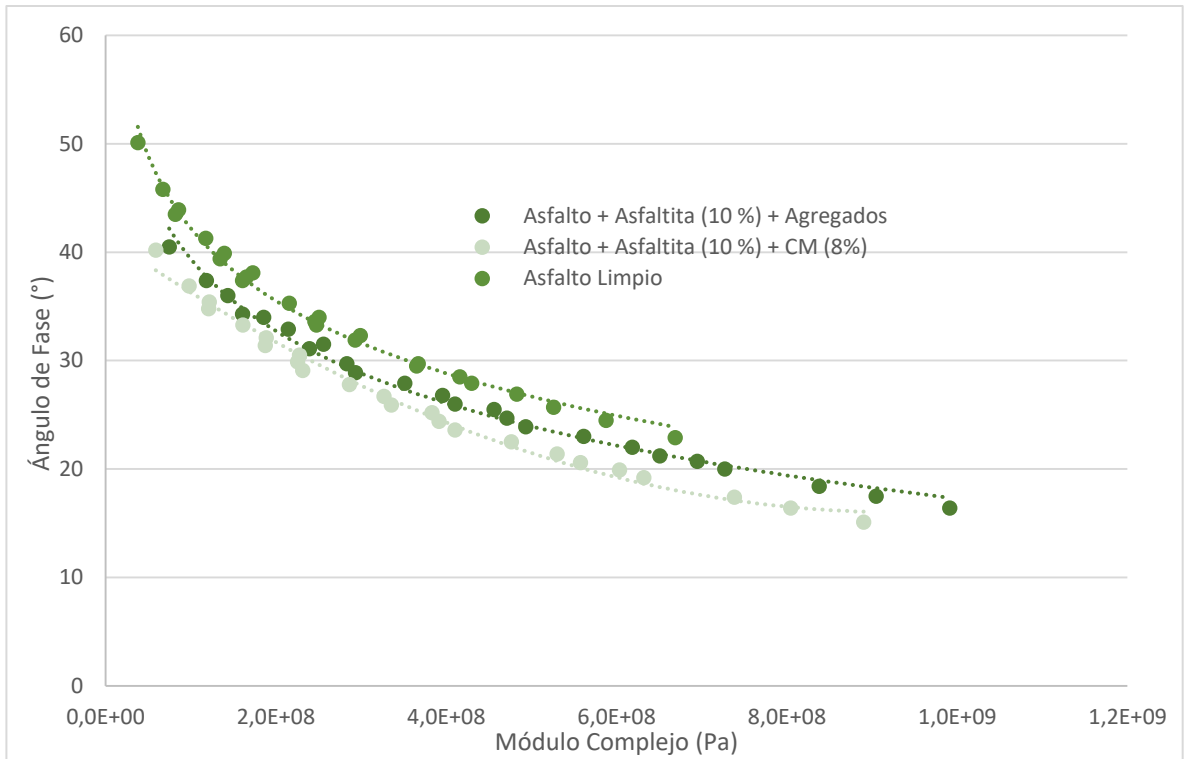
Figura 9. Representación de los resultados experimentales en el gráfico Cole-Cole



3.3.5 Diagrama del Espacio de Black El diagrama de Black muestra la interacción entre el módulo complejo y el ángulo de fase en un mismo instante y a una misma temperatura. Una curva suave es indicador de una equivalencia entre el tiempo y la temperatura mientras que una curva inconexa muestra un betún con gran cantidad de asfaltenos o un betún modificado con gran cantidad de polímeros [17].

La gráfica del diagrama de Black presentada en la Figura 10 muestra una tendencia hacia un menor ángulo de fase en el asfalto modificado con asfaltita y caucho, seguido de cerca por el asfalto modificado con asfaltita que tiene en cuenta la porción de agregado fino del pavimento. Esto indica una mejor respuesta elástica al mismo tiempo que se mejora la resistencia a la deformación con respecto al asfalto limpio. Se evidencia que la reducción del ángulo de fase de la mezcla que incluye el elastómero es mayor a las otras y se mantiene así con el cambio de la temperatura y la frecuencia de aplicación de la carga, demostrando la tendencia del polímero a formar una red elástica continua cuando se disuelve en el bitumen [18]. El asfalto modificado al que no se le incorporó C.M. alcanza un mayor módulo complejo, sin embargo, su ángulo de fase es mayor, combinación que genera un pavimento quebradizo como queda demostrado en la Figura 7.

Figura 10. Representación de los resultados experimentales en el Espacio de Black



4 CONCLUSIONES

En este estudio la rigidez del asfalto modificado con caucho molido y asfaltita fue evaluada a diferentes temperaturas y frecuencias de aplicación de carga con el fin de determinar si la combinación de estos dos aditivos puede representar mejoras mecánicas y económicas a una carpeta asfáltica así como una solución al problema medioambiental expuesto anteriormente.

Basándose en los resultados obtenidos se determinó que la combinación simultánea de estos dos materiales, en proporciones de 8% del polímero y 10% de asfaltita, otorga mejoras sustanciales al asfalto. Se demuestra un incremento de la resistencia a la deformación, evidenciado en la Figura 10, en donde se aprecia un claro aumento del módulo complejo, haciendo de la mezcla un compuesto capaz de soportar mayores cargas que el asfalto convencional, logrando una menor susceptibilidad térmica en todo el rango de temperaturas evaluadas y exhibiendo una disminución en el ángulo de fase del aglomerante propuesto, que sumado al incremento en el Módulo de Almacenamiento apreciado en la Figura 9, le permite al compuesto tener una mayor elasticidad y una mejor recuperación tras sufrir deformaciones, evitando posibles problemas en el pavimento ocasionados por la baja flexibilidad en la carpeta asfáltica. No obstante, el incremento en la rigidez de esta mezcla genera un mayor valor de $E^* \sin \delta$, lo que significa que tiene menor resistencia a la fractura por fatiga respecto al asfalto limpio.

Un análisis estadístico típico de los resultados obtenidos no es significativo debido a las pocas pruebas ejecutadas por cada probeta. Es posible estimar la diferencia entre las medias de la rigidez de cada muestra por medio de la distribución T Student desapareada. Sin embargo, esta prueba no es confiable debido a que solo se tienen dos datos a comparar por briqueta.

Futuros trabajos pueden orientar la investigación hacia el estudio del comportamiento de la mezcla propuesta ante esfuerzos de corte con el fin de analizar el Módulo Complejo de Corte G^* y el ángulo de fase δ y de esta manera definir la resistencia a la fatiga del material. Igualmente se sugiere un análisis reológico real del material modificado mediante reómetro dinámico de corte.

Finalmente, se puede establecer que la mezcla propuesta representa una alternativa viable a la hora de construir pavimentos más resistentes, a un menor costo y que contribuyan con el medio ambiente confiriendo un uso a las llantas de los automóviles que han cumplido el ciclo de vida útil.

5 RECOMENDACIONES

Se hace indispensable velar por el adecuado manejo y almacenamiento de los materiales, en especial del asfalto, ya que puede sufrir de cambios químicos que podrían inducir un envejecimiento prematuro, alterando los resultados obtenidos.

Se recomienda utilizar todas las medidas de seguridad a la hora de manipular los materiales. Sobre todo, se aconseja emplear la protección adecuada para las vías respiratorias en el momento del mezclado del asfalto debido a los gases y vapores que son expulsados. Igualmente se hace énfasis en la utilización de los dispositivos de seguridad básicos y obligatorios para el desempeño de las prácticas en el laboratorio y se hace un llamado de atención a los futuros investigadores para que, durante las pruebas y tras la realización de las mismas, ejecuten el procedimiento de disposición final de residuos de manera adecuada, evitando la posible contaminación de fuentes hídricas con los materiales empleados.

6 REFERENCIAS

- [1] G. de P. S. Oficina Asesora de Planeación, "Transporte en Cifras - Estadísticas 2014," Ministerio de Transporte de Colombia, 2014.
- [2] S. Aflaki, P. Hajikarimi, E. H. Fini, and B. Zada, "Comparing effects of biobinder with other asphalt modifiers on low-temperature characteristics of asphalt," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 26, no. 3, pp. 429–439, 2014.
- [3] D. J. Mundt, R. C. Adams, and K. M. Marano, "A historical review of additives and modifiers used in paving asphalt refining processes in the United States," *Journal of occupational and environmental hygiene*, vol. 6, no. 11, pp. 705–713, 2009.
- [4] M. Ameri, A. Mansourian, and H. Ziari, "Experimental investigation of the effect of Gilsonite on performance of hot-mix asphalt," *Transportation Research*, vol. 1, no. 1, p. 1, 2011.
- [5] B. V. Kök, M. Yilmaz, and M. Guler, "Evaluation of high temperature performance of SBS+ Gilsonite modified binder," *Fuel*, vol. 90, no. 10, pp. 3093–3099, 2011.
- [6] H. A. R. Quintana, J. A. H. Noguera, and C. F. U. Bonells, "Behavior of Gilsonite-Modified Hot Mix Asphalt by Wet and Dry Processes," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 28, no. 2, p. 04015114, 2015.
- [7] W. D. Fernández-Gómez, H. Rondón Quintana, and F. Reyes Lizcano, "A review of asphalt and asphalt mixture aging: Una revisión," *Ingeniería e investigación*, vol. 33, no. 1, pp. 5–12, 2013.
- [8] J. Shen, S. Amirkhanian, F. Xiao, and B. Tang, "Influence of surface area and size of crumb rubber on high temperature properties of crumb rubber modified binders," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 1, pp. 304–310, 2009.
- [9] H. A. Rondón-Quintana and F. A. Reyes, "Comportamiento de una mezcla densa en Caliente elaborada Con asfaltos modificados Con asfaltita," *Tecnológicas*, no. 22, pp. 141–161, 2009.
- [10] D. Anderson, D. Maurer, T. Ramirez, D. Christensen, M. Marasteanu, and Y. Mehta, "Field performance of modified asphalt binders evaluated with superpave test methods: I-80 test project," *Journal of the Transportation Research Board*, 1999.
- [11] N. Larcher, M. Takarli, N. Angellier, C. Petit, and H. Sebbah, "Towards a viscoelastic mechanical characterization of asphalt materials by ultrasonic measurements," *Materials and Structures*, vol. 48, no. 5, pp. 1377–1388, 2015.
- [12] A. C. Saltarin Gallardo. and L. Acevedo Rodriguez, *Modificación del Asfalto de la Refinería de Barrancabermeja Con Asfaltitas de la Zona Norte de Santander y Sur del Cesar*. Universidad Industrial de Santander, 1998, p. 27.

- [13] B. V. Kök and H. Çolak, "Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 8, pp. 3204–3212, 2011.
- [14] A. Gallardo and L. Acevedo, "Modificación del Asfalto de la Refinería de Barrancabermeja con Asfaltitas de la Zona Norte de Santander y Sur del Cesar," Universidad Industrial de Santander, 1998.
- [15] M. Mazumder, H. Kim, and S.-J. Lee, "Performance properties of polymer modified asphalt binders containing wax additives," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 128–139, 2016.
- [16] Y. Zhao, H. Liu, L. Bai, and Y. Tan, "Characterization of linear viscoelastic behavior of asphalt concrete using complex modulus model," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 25, no. 10, pp. 1543–1548, 2012.
- [17] R. A. Al-Mansob, A. Ismail, A. N. Alduri, C. H. Azhari, M. R. Karim, and N. I. M. Yusoff, "Physical and rheological properties of epoxidized natural rubber modified bitumens," *Construction and Building Materials*, vol. 63, pp. 242–248, 2014.
- [18] G. Airey, "Styrene butadiene styrene polymer modification of road bitumens," *Journal of Materials Science*, vol. 39, no. 3, pp. 951–959, 2004.

7 BIBLIOGRAFÍA

G. de P. S. Oficina Asesora de Planeación, "Transporte en Cifras - Estadísticas 2014," Ministerio de Transporte de Colombia, 2014.

S. Aflaki, P. Hajikarimi, E. H. Fini, and B. Zada, "Comparing effects of biobinder with other asphalt modifiers on low-temperature characteristics of asphalt," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 26, no. 3, pp. 429–439, 2014.

D. J. Mundt, R. C. Adams, and K. M. Marano, "A historical review of additives and modifiers used in paving asphalt refining processes in the United States," *Journal of occupational and environmental hygiene*, vol. 6, no. 11, pp. 705–713, 2009.

M. Ameri, A. Mansourian, and H. Ziari, "Experimental investigation of the effect of Gilsonite on performance of hot-mix asphalt," *Transportation Research*, vol. 1, no. 1, p. 1, 2011.

B. V. Kök, M. Yilmaz, and M. Guler, "Evaluation of high temperature performance of SBS+ Gilsonite modified binder," *Fuel*, vol. 90, no. 10, pp. 3093–3099, 2011.

H. A. R. Quintana, J. A. H. Noguera, and C. F. U. Bonells, "Behavior of Gilsonite Modified Hot Mix Asphalt by Wet and Dry Processes," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 28, no. 2, p. 04015114, 2015.

W. D. Fernández-Gómez, H. Rondón Quintana, and F. Reyes Lizcano, "A review of asphalt and asphalt mixture aging: Una revisión," *Ingeniería e investigación*, vol. 33, no. 1, pp. 5–12, 2013.

J. Shen, S. Amirkhanian, F. Xiao, and B. Tang, "Influence of surface area and size of crumb rubber on high temperature properties of crumb rubber modified binders," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 1, pp. 304–310, 2009.

H. A. Rondón-Quintana and F. A. Reyes, "Comportamiento de una mezcla densa en caliente elaborada con asfaltos modificados con asfaltita," *Tecno Lógicas*, no. 22, pp. 141–161, 2009.

D. Anderson, D. Maurer, T. Ramirez, D. Christensen, M. Marasteanu, and Y. Mehta, "Field performance of modified asphalt binders evaluated with superpave test methods: I-80 test project," *Journal of the Transportation Research Board*, 1999.

N. Larcher, M. Takarli, N. Angellier, C. Petit, and H. Sebbah, "Towards a viscoelastic

mechanical characterization of asphalt materials by ultrasonic measurements,” *Materials and Structures*, vol. 48, no. 5, pp. 1377–1388, 2015.

A. C. Saltarin Gallardo. and L. Acevedo Rodriguez, *Modificación del Asfalto de la Refinería de Barrancabermeja Con Asfaltitas de la Zona Norte de Santander y Sur del Cesar*. Universidad Industrial de Santander, 1998, p. 27.

B. V. Kök and H. Çolak, “Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt,” *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 8, pp. 3204–3212, 2011.

A. Gallardo and L. Acevedo, “Modificación del Asfalto de la Refinería de Barrancabermeja con Asfaltitas de la Zona Norte de Santander y Sur del Cesar,” Universidad Industrial de Santander, 1998.

M. Mazumder, H. Kim, and S.-J. Lee, “Performance properties of polymer modified asphalt binders containing wax additives,” *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 128–139, 2016.

Y. Zhao, H. Liu, L. Bai, and Y. Tan, “Characterization of linear viscoelastic behavior of asphalt concrete using complex modulus model,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 25, no. 10, pp. 1543–1548, 2012.

R. A. Al-Mansob, A. Ismail, A. N. Alduri, C. H. Azhari, M. R. Karim, and N. I. M. Yusoff, “Physical and rheological properties of epoxidized natural rubber modified bitumens,” *Construction and Building Materials*, vol. 63, pp. 242–248, 2014.

G. Airey, “Styrene butadiene styrene polymer modification of road bitumens,” *Journal of Materials Science*, vol. 39, no. 3, pp. 951–959, 2004.

D. Anderson, D. Maurer, T. Ramirez, D. Christensen, M. Marasteanu, and Y. Mehta, “Field Performance of Modified Asphalt Binders Evaluated with Superpave Test Methods: I-80 Test Project.”

G. Botasso, O. Rebollo, A. Cuattrocchio, and C. Soengas, “EJECUCION DE PAVIMENTO CON MEZCLA ASFALTICA DENSA CON UTILIZACION DE CAUCHO RECICLADO.”

Y. Cui and L. Wang, “High-Temperature Behavior of Compound Crumb Rubber Modified Asphalt,” in *Third International Conference on Transportation Engineering (ICTE)*, 2011.

P. Frantzis, “Crumb rubber-bitumen interactions: Diffusion of bitumen into

- rubber," *Journal of materials in civil engineering*, vol. 16, no. 4, pp. 387–390, 2004.
- V. T. Gopal, P. E. Sebaaly, and J. Epps, "Effect of crumb rubber particle size and content on the low temperature rheological properties of binders," in *Transportation Research Board Annual Meeting, Washington DC, 13–17 January, 2002*.
- P. Hajikarimi, S. Aflaki, and A. S. Hoseini, "Implementing fractional viscoelastic model to evaluate low temperature characteristics of crumb rubber and gilsonite modified asphalt binders," *Construction and Building Materials*, vol. 49, pp. 682–687, 2013.
- J. Liu and P. Li, "Experimental study on gilsonite-modified asphalt," in *Proceedings of the 2008 Airfield and Highway Pavements Conference, 2008*, pp. 15–18.
- L. N. Mohammad, S. B. Cooper Jr, and M. A. Elseifi, "Characterization of HMA mixtures containing high reclaimed asphalt pavement content with crumb rubber additives," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 23, no. 11, pp. 1560–1568, 2011.
- S. Palit, K. S. Reddy, and B. Pandey, "Laboratory evaluation of crumb rubber modified asphalt mixes," *Journal of materials in civil engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 45–53, 2004.
- Z. X. J. Shen, "Multi-Scale Evaluation on the Interaction between Asphalt and Crumb Rubber," *New Frontiers*, p. 10, 2015.
- S. Wang and Y. Xie, "Crumb Tire Rubber Polyolefin Elastomer Modified Asphalt with Hot Storage Stability," *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, vol. 32, no. 1, p. 25, 2016.
- M. Yılmaz, B. V. Kök, and N. Kuloglu, "Investigation of Mechanical Properties of Short-and Long-Term Aged Asphaltite Modified Asphalt Mixtures," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 25, no. 5, pp. 563–572, 2012.
- K. Zhong, D. Cao, and Q. Liu, "Research on the Rheologic Characteristics of Gilsonite Modified Bitumen," *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, vol. 3, no. 1, pp. 20–24, 2008.