

ANÁLISIS MICROMECAÍNICO DE MATRICES ASFÁLTICAS FINAS PARA LA OBTENCIÓN DE MÓDULOS DE CORTANTE Y FLEXIÓN Y GENERACIÓN DE CURVAS MAESTRAS

Guillermo Loría¹, Fabiola Miranda²

¹ Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

² Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, fabiola.miranda@ucr.ac.cr

Resumen

El estudio realizado consiste en una caracterización de propiedades mecánicas en morteros asfálticos a partir de un ensayo a escala micro. La investigación contempla el diseño de las matrices asfálticas finas o mezclas FAM, el proceso de elaboración de los especímenes, la implementación del ensayo bajo carga cortante y la construcción de curvas maestras a partir de los resultados obtenidos para la predicción de módulos complejos de corte.

Las pruebas fueron realizadas en el equipo llamado Analizador Mecánico Dinámico (DMA). La configuración del ensayo consistió en un barrido de frecuencias y temperaturas para un nivel de deformación constante en el rango viscoelástico lineal del material. El programa experimental contempla el diseño de las mezclas FAM a partir de dos fuentes de agregados y tres variaciones a un mismo ligante asfáltico (original, modificado con SBR y modificado con *ethylene copolymer*) para un total de seis tratamientos. A partir de los resultados se calibraron curvas maestras empleando las fórmulas generales Sigmoidal, CA y CAM y los factores de ajuste de Arrhenius y WLF.

En la investigación se logró ejecutar con éxito el ensayo DMA para el modo de carga cortante, de donde se obtuvo propiedades fundamentales del material, específicamente se midió módulo complejo de cortante y se registró la respuesta a partir de la obtención de esfuerzos cortantes, deformaciones angulares y ángulos de desfase. Como parte de los resultados, se obtuvo módulos complejos de corte en un rango de 40 a 170 MPa, en donde los tratamientos con asfalto modificado con *ethylene copolymer* desarrollaron mayores rigideces. Con los resultados de los ensayos se calibraron curvas maestras alcanzando un mejor ajuste con la fórmula general Sigmoidal, lo cual revela la similitud en el comportamiento de las mezclas FAM con las mezclas asfálticas.

Palabras clave: matriz, fina, módulo, micromecánico, curva maestra.

1 Introducción

La complejidad del comportamiento del ligante asfáltico como material viscoelástico y su variabilidad con la temperatura, tiempo de carga y edad, convierten a la mezcla asfáltica en un campo de estudio amplio. La presente investigación representa un aporte para la caracterización de uno de los componentes de la mezcla; la matriz asfáltica fina.

La investigación nace con el objetivo de desarrollar un método de ensayo para el análisis de mezclas FAM a partir de la implementación del equipo DMA especializado en la medición de propiedades visco-elásticas de los materiales a partir de diferentes análisis a una escala micro.

La importancia de realizar esta investigación radica en que, mediante la puesta en marcha del equipo DMA, fue posible caracterizar la matriz asfáltica de la mezcla, a partir de mediciones en

rango visco-elástico lineal del material. Se enumeran tres razones fundamentales que evidencian la importancia de la caracterización esta fase de la mezcla: a) El fracturamiento de la mezcla asfáltica inicia en la matriz fina. b) La matriz fina corresponde al componente más homogéneo de la mezcla asfáltica. c) La caracterización de la matriz fina permite predecir el comportamiento de la mezcla asfáltica [1].

1.1 Antecedentes

El análisis micromecánico de mezclas asfálticas ha sido estudiado por el Instituto de Transportes de Texas [2, 3], donde se desarrolló un proyecto que buscaba realizar mediciones de energía superficial para la evaluación de la susceptibilidad a la humedad de asfalto y agregados, centrado en la comprensión de los procesos de daño por humedad, analizando cuidadosamente los micromecanismos que influyen en la interfaz adhesiva entre el agregado y el asfalto y la fuerza cohesiva y durabilidad de la matriz asfáltica. La investigación se desarrolló en dos fases.

La primera fase inició en el 2005 [2], donde se evaluó el daño por humedad a través de la medición de energía superficial y análisis mecánico dinámico. Los ensayos micromecánicos realizados se basaron en la aplicación de una carga cíclica torsional a deformación controlada. El ensayo se enfocó en la determinación de la tasa de acumulación de daños en ligantes y matrices asfálticas. En análisis de resultados se dirige en la identificación de la energía disipada por el daño del material y de la energía asociada a la deformación visco-elástica [2].

La segunda fase del proyecto se llevó a cabo en el 2007 [3]. En esta la investigación se utilizó el concepto de relación energética ER, la cual combina las energías de enlace cohesivo y adhesivo, como parámetro de evaluación de compatibilidad de ligantes asfálticos y agregados en cuanto a la resistencia de daño por humedad. Para esto, se desarrolló un sistema integral para la evaluación de daños por humedad, el primer paso fue examinar la interacción de una combinación de asfalto y agregado mediante la evaluación de los componentes de energía superficial y ER. El segundo paso consistió en realizar un análisis dinámico mecánico en un espécimen de mezcla asfáltica fina. Finalmente, se realiza una evaluación de la susceptibilidad de la humedad de la mezcla completa, con el fin de examinar la idoneidad del diseño de mezcla y volumetría para resistir daños por humedad.

Puesto que dichos estudios demostraron la eficiencia del método de análisis micromecánico para evaluar la resistencia de las mezclas FAM ante el daño por humedad y agrietamiento por fatiga, se desarrolló una investigación con el fin de diseñar un método sistemático simple para el diseño de las mezclas finas asfálticas y un software sencillo para analizar los datos producto del análisis micromecánico y calcular los parámetros de fractura que caracterizan la resistencia a fatiga y los daños por humedad [4]. En 2011 se desarrolló un proyecto que implementó con éxito una metodología para la preparación de las muestras para análisis micromecánico, así como un software para el procesamiento de los resultados. En esta investigación los autores derivan un método para el diseño de mezclas asfálticas finas a partir de la obtención del contenido de asfalto real que contiene la sección granulométrica fina de la mezcla asfáltica analizada (material pasando la malla No 16).

Recientemente se desarrolló una investigación de análisis viscoelástico lineal y no lineal de morteros bituminosos, la cual trata sobre la caracterización del comportamiento de matrices asfálticas a varias temperaturas y a varios niveles de esfuerzo cortante [5]. La metodología implementada en la investigación para la medición de propiedades de los morteros asfálticos, mantiene el mismo esquema desarrollado en TTI en el proyecto de daño por humedad. En esta investigación se destaca la importancia de realizar análisis no lineal para obtener el rendimiento real de las mezclas que alcanzan este comportamiento a temperaturas altas de pavimento con bajos niveles de carga.

Otros estudios se han desarrollado en diferentes temas a nivel micro, un ejemplo de esto consiste en la investigación de análisis de la anisotropía de la rigidez en mezclas asfálticas basado en modelos micromecánicos en el 2002 [6]. A partir de esta investigación se obtuvo que la rigidez de las mezclas asfálticas en el eje horizontal es un 30% mayor que en el eje vertical.

Además se demostró que la anisotropía de la rigidez disminuye con la rigidez de la mezcla. Esto se logró mediante la caracterización de materiales a escala micro, donde la homogeneidad de la mezcla permite estudiar propiedades que en la totalidad de la mezcla son más complejas.

Por otro lado, las mezclas FAM han sido ensayadas en investigaciones de mezclas asfálticas recicladas (RAP). En este ámbito, se desarrolló un proyecto para la evaluación de métodos de ensayo que valoran las propiedades del diseño de mezcla de pavimentos reciclados, y de esta manera analizar las mezclas asfálticas en caliente (MAC) con altos contenidos de RAP. El autor resalta que la caracterización del ligante de la mezcla reciclada constituye uno de los pasos más importantes para el diseño de mezclas con contenidos de RAP [7]. Para realizar este análisis del ligante existen cinco metodologías, tanto experimentales como analíticas, una de ellas corresponde a la caracterización a partir de mezclas asfálticas finas RAP mediante ensayos reológicos.

Como se ha mencionado anteriormente, el análisis micromecánico es un campo reciente de estudio en la Ingeniería de Pavimentos, que permite a partir de equipo especializado la descripción mecánica de la estructura de mezclas asfálticas, de manera práctica, económica y eficiente.

2 Objetivo

El proyecto se desarrolla con objetivo de implementar un método de ensayo que permita relizar una caracterización micromecánica de la matriz asfáltica de la mezcla, mediante la medición de una propiedad fundamental del material, como lo es el módulo complejo de cortante. Dentro de los objetivos específicos del proyecto se contempló la definición de un método de diseño de mezclas FAM a partir de la combinación de dos fuentes de agregados y tres variaciones de un mismo ligante asfáltico. Posterior a esto se determinó una metodología experimental para la medición de las propiedades mecánicas de las mezclas FAM empleando el equipo de análisis micromecánico DMA. Finalmente, a partir de los resultados obtenidos en los ensayos, se generaron curvas maestras de módulo complejo de cortante a partir de las fórmulas generales Sigmoidal, CA y CAM para los factores de ajuste de Arrhenius y WLF.

3 Programa experimental

3.1 Diseño de mezcla FAM

El diseño de las mezclas FAM, se basó en la metodología propuesta por Jonathan Howson [3], la cual consiste en el cálculo del espesor de la película de asfalto que recubre las partículas de material granular, en función de la granulometría y contenido de asfalto de la mezcla completa y de las propiedades del ligante asfáltico.

En la investigación se utilizó agregados pasando el tamiz No 30, provenientes de dos fuentes costarricenses y tres variaciones de un mismo ligante asfáltico con un PG 64-22. En la Tabla 1 se muestran los tratamientos ensayados en el laboratorio.

Tabla 1. Tratamientos de mezclas FAM

Matriz asfáltica fina	Fuente de agregados	Tipo de asfalto	Contenido de Asfalto ⁽¹⁾
1	Planta 1	Original virgen	17,30 %
2	Planta 2	Original virgen	15,15 %
3	Planta 1	Original modificado con SBR al 1,5%	17,30 %
4	Planta 2	Original modificado con SBR al 1,5%	15,15 %
5	Planta 1	Original modificado con <i>ethylene copolymer</i> al 1,5%	17,30 %
6	Planta 2	Original modificado con <i>ethylene copolymer</i> al 1,5%	15,15 %

⁽¹⁾ El contenido de asfalto calculado corresponde al porcentaje de ligante asfáltico que recubre el material pasando el tamiz No 50, respecto al contenido de asfalto óptimo de la mezcla asfáltica completa.

3.2 Procedimiento de elaboración de especímenes

Para la confección de los especímenes se diseñaron moldes de acuerdo a las especificaciones del equipo, las cuales obedecen a las dimensiones máximas de las muestras para el ensayo de cortante. Los moldes consisten en secciones metálicas ensambladas mediante tornillos, de manera que se facilite el desmolde de los especímenes una vez finalizado el proceso.

El procedimiento de elaboración de las mezclas FAM consideró varios aspectos desarrollados por Loria [7] para el ensayo de morteros asfálticos. La metodología implementada inicia con la preparación de materiales, tanto el agregado como el asfalto son llevados a una temperatura de 150 °C. Se procede con el proceso de mezclado, colocando un recipiente metálico pequeño sobre un mechero Bunsen y posteriormente se vierten y mezclan los materiales hasta obtener una mezcla homogénea. Se estableció un tiempo máximo de mezclado de un minuto. Posteriormente los especímenes son moldeados a altas temperaturas, con el fin de evitar el endurecimiento de la mezcla FAM durante la colocación y compactación a presión del material en los moldes. Finalmente, los especímenes son desmoldados y colocados sobre láminas rígidas evitando deformaciones en el material y llevados a una cámara libre de humedad, hasta justo antes de la falla. En la Figura 1 se muestra el proceso descrito anteriormente.



Figura 1 Confección de los especímenes

3.3 Generación de imágenes microscópicas

Para la validación del método de confección de los especímenes se realizó un ensayo de barrido de imágenes superficiales a una escala en el orden de micrómetros (SEM). En la Figura 2 se muestran algunos de los resultados obtenidos. En las imágenes se observaron vacíos superficiales en los especímenes, no obstante estos describen una distribución aleatoria típica, al mismo tiempo se aprecian caras homogéneas y no se distinguen planos de falla.

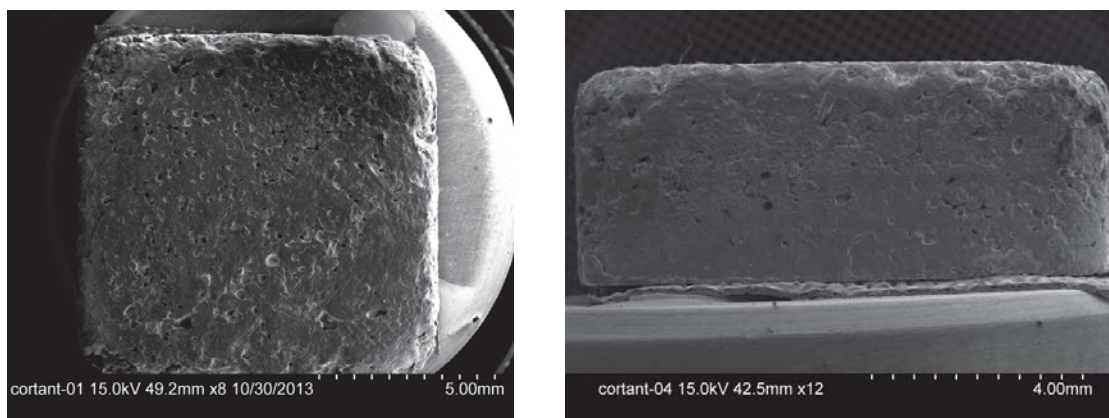


Figura 2 Ensayo SEM en las muestras DMA de cortante

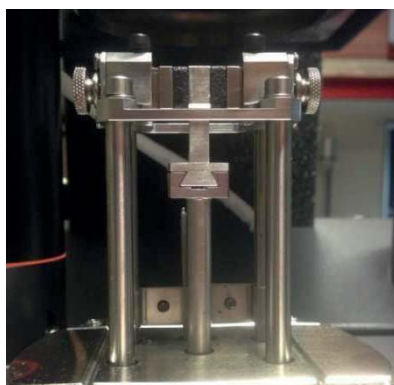
4 Implementación del método de ensayo

4.1 Descripción del ensayo

El ensayo implementado consiste en una prueba de carga dinámica en un modo cortante basada en la aplicación de un esfuerzo sinusoidal al material y el registro de su respuesta. El ensayo consiste en la colocación dos muestras idénticas, entre dos apoyos fijos y en el centro una placa en movimiento genera el movimiento de corte (Figura 3). Este modo es ideal para materiales con alta viscosidad. Las muestras que pueden ser evaluadas en esta modalidad deben tener dimensiones máximas de 10 mm de lado y 4 mm de espesor.

La prueba consiste en un ensayo de multi-frecuencia a deformación controlada. Las frecuencias aplicadas al espécimen fueron de 0,1; 0,5; 1, 5, 10 y 25 Hz, cada una a las temperaturas de -10; 4,4; 21,1; 37,8 y 54,5 °C. Tales parámetros fueron tomados con base en el ensayo de módulo dinámico en mezclas asfálticas según la norma AASHTO TP62.

a.



b.

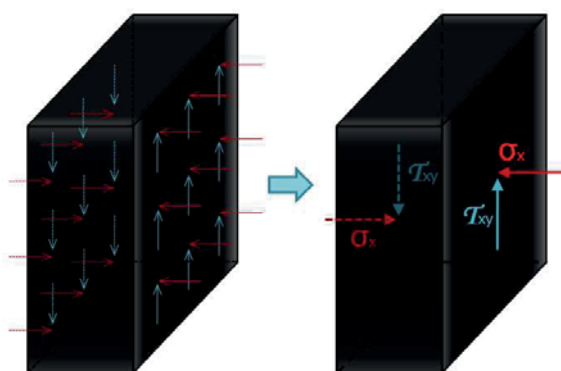


Figura 3 Esquema del ensayo de cortante DMA

El nivel de deformación fue seleccionado a partir de un barrido de amplitudes a una temperatura de 32 °C y una frecuencia de 1 Hz. En la Figura 4 se aprecia un deterioro gradual del material en el tiempo, el cual aumenta conforme se incrementa el nivel de deformación al que es sometida la muestra. Para deformaciones en mayores a 0,010 % el material inicia con una pérdida gradual de la capacidad entre mediciones consecutivas, asociado a la acumulación de daño. Por tanto el ensayo se realiza a nivel de deformación de 0,010 % en donde se garantiza una respuesta dentro del rango viscoelástico lineal.

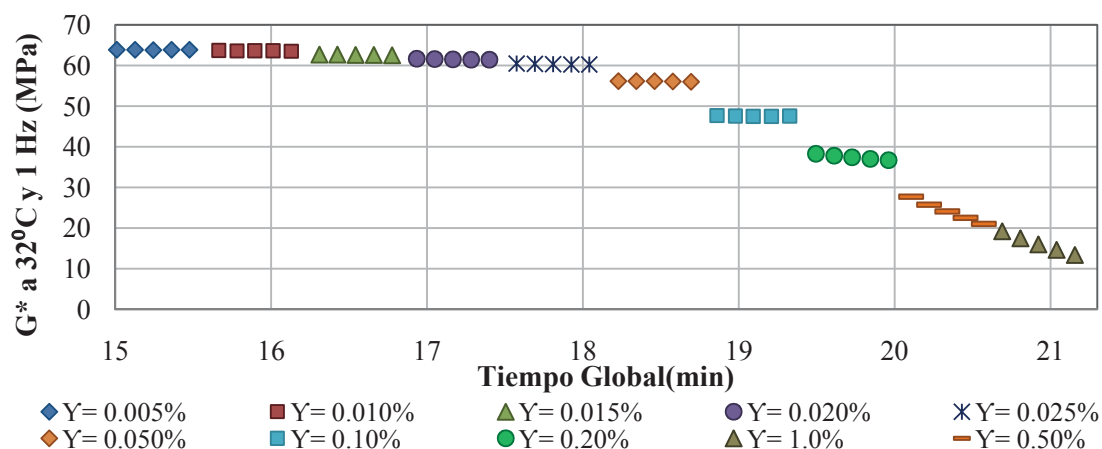


Figura 4 Salida del ensayo DMA de cortante de multi-frecuencia a deformación controlada

Para la determinación del número mínimo de réplicas se realizó un procedimiento estadístico basado en el método de Montecarlo y las cadenas de Markóv. El proceso empleado consistió en registrar la variación de los resultados a partir del promedio y la desviación estándar, mediante combinaciones aleatorias de diferentes muestras para diferentes números de réplicas. Para esto se realizaron 120 combinaciones aleatorias de los resultados de 3, 4, 5, 6 y 7 réplicas. En la Figura 5 se muestra la variación de la desviación estándar de los resultados para diferentes números de réplicas.

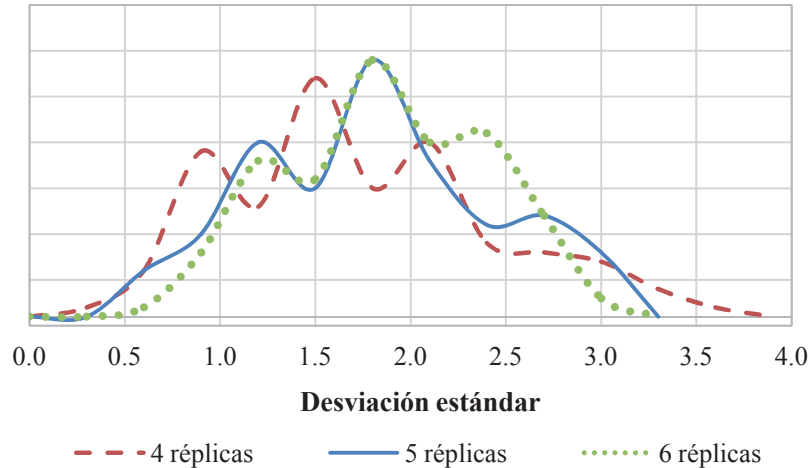


Figura 5. Variación de la desviación estándar de los resultados en función del número de réplicas

La menor desviación estándar ocurre al combinar aleatoriamente cuatro muestras ensayadas, sin embargo las colas de la distribución son más amplias, evidenciando desviaciones más dispersas. Por otro lado, el promedio de las desviaciones para cinco y seis muestras es muy cercano y los valores poseen una distribución muy similar, por tanto se concluye que cinco réplicas por tratamiento garantizan repetividad en el ensayo.

Una vez definido el número de réplicas necesarias por tratamiento, se realizó un análisis de sensibilidad de los resultados, con el fin de contabilizar el error asociado a las imperfecciones de las muestras. El análisis se basa en la técnica analítica de la Transformada de Mellin, aplicable para funciones positivas en todo su dominio, como lo es la ecuación de la componente elástica del módulo cortante, lo cual permite obtener cuál es la desviación estándar del valor de módulo más probable, considerando la desviación estándar intrínseca de los parámetros que intervienen en el cálculo, como lo son los parámetros de dimensionamiento y rigidez de la muestra.

La transformada de Mellin considera la distribución probabilística de las variables independientes asociadas al valor de módulo y les asigna una transformada. La desviación más probable se calcula como el producto de las transformadas de Mellin individuales de las funciones [9]. Con base en ese criterio, la expresión de módulo puede expresarse como:

$$G' = \frac{3 K t}{5 w h} \quad (1)$$

$$M_{G'} = (3/5)^{s-1} M_K(s) M_t(s) M_w(2-s) M_h(2-s) \quad (2)$$

Donde M_G, M_K, M_t, M_w, M_h corresponden a las funciones de las transformadas de Mellin de módulo, rigidez, espesor, ancho y largo de la muestra. Posteriormente se evalúan cada una de las transformadas en funciones asociadas a la distribución probabilística de cada variable.

Finalmente a partir del análisis se obtuvo una desviación de 0,6 MPa en el módulo de almacenamiento reportado por el equipo. Dado que la componente viscosa del módulo complejo de corte reportado en los ensayos se encuentra en rango de una orden de magnitud menor que la componente elástica, es posible concluir que la incertidumbre de 0,6 MPa se aplica sobre el valor de módulo complejo de cortante.

5 Resultados y análisis de los ensayos

Como primera etapa se analizaron los resultados de los ensayos de cortante individuales, con el fin de verificar la variabilidad entre muestras. En la Figura 6 se muestra la relación del módulo dinámico contra la frecuencia a diferentes temperaturas en escala normal y logarítmica (a. y b.), así como el Diagrama de Black (c.) y el gráfico de Cole-Cole (d.) para una muestra aleatoria. En los primeros dos gráficos se observan claramente las curvas isotermales lineales y paralelas entre ellas, lo cual le da validez a las mediciones. Por otro lado, el Diagrama de Black brinda información acerca de la tendencia del comportamiento del material, ya sea que se comporte más como un ligante asfáltico o más como una mezcla asfáltica. Esta teoría supone que en un ligante asfáltico el ángulo de fase se incrementa en función de la temperatura, mientras que en una mezcla asfáltica el ángulo de fase aumenta a medida que la temperatura se incrementa y posteriormente disminuye [10]. En los resultados obtenidos se observó un incremento del ángulo de fase desde $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $21,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, y un posterior descenso a $37,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, por tanto se determinó que el comportamiento del material estudiado se asemeja al comportamiento de una mezcla asfáltica. Mientras que el gráfico de Cole-Cole permite realizar un mejor análisis del material a temperaturas bajas e intermedias [10] y además un buen ajuste en este gráfico se traduce en un material termoreológicamente estable, y por tanto es válido aplicar el principio de superposición tiempo temperatura.

El Diagrama de Black y gráfico de Cole-Cole que aparecen en la Figura 6 muestran un ajuste suavizado mediante funciones polinomiales de segundo grado con coeficientes de correlación superiores al 90% en ambos casos, esto indica buena calidad en las mediciones. Al mismo tiempo se observó que la correlación de estas funciones fue mejor para las mezclas que contienen los asfaltos originales que para aquellas matrices que contienen asfaltos modificados, esto se atribuye en la afectación en la trabajabilidad al incorporar ligantes asfálticos con mayores rigideces.

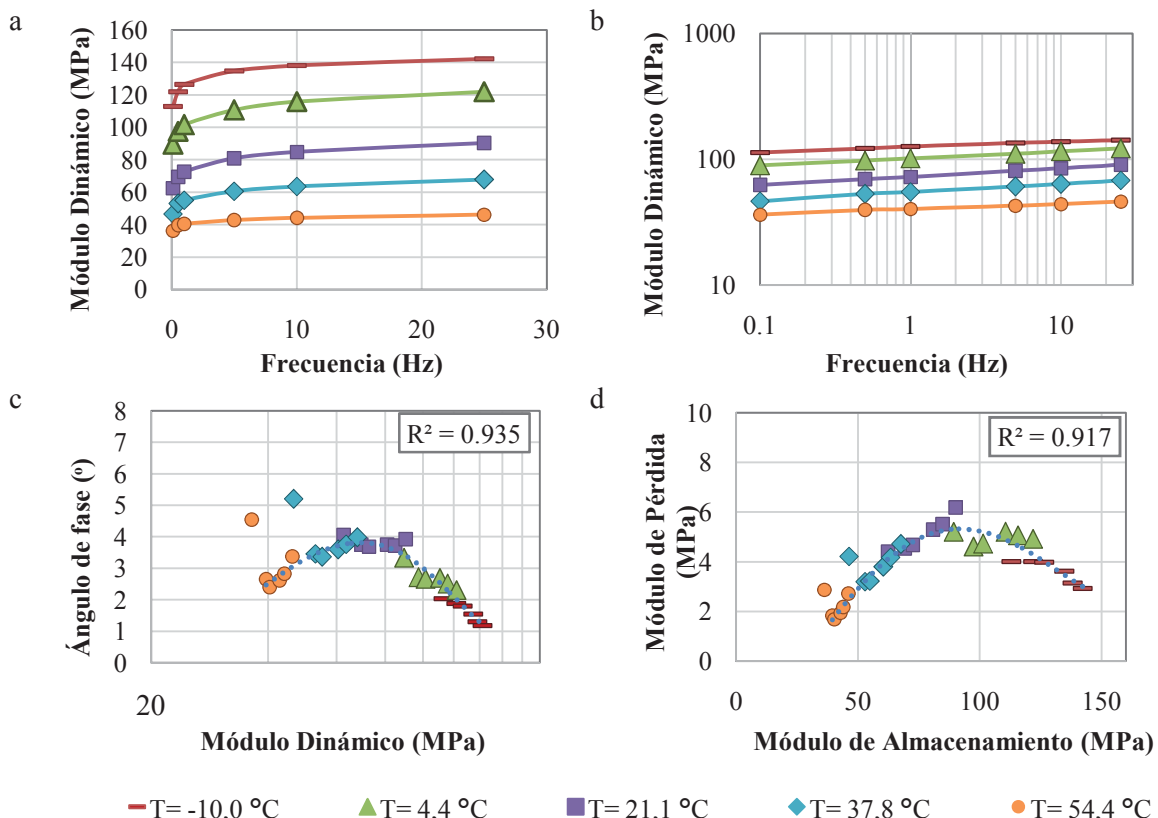


Figura 6 Resultados de los ensayos de la Matriz Asfáltica 1

6 Calibración de un modelo mecánico 2S2P1D Model

A partir de los resultados obtenidos del ensayo de cortante DMA se calibraron los parámetros de un modelo mecánico con el fin de evaluar los resultados mediante la descripción de las propiedades reológicas de ligantes y mezclas asfálticas. Para esto se utilizó el modelo 2S2P1D, el cual consiste en una abreviatura de la combinación de dos resortes, dos elementos de tipo *parabolic creep* y un amortiguador, basado en una generalización del modelo Huet – Sayegh. En la Tabla 2 se muestran los valores calibrados del modelo para los 6 tratamientos, donde los parámetros h y k se asocian a los elementos tipo *parabolic creep*, G_∞ y G_0 a los resortes y β al amortiguador del sistema.

Tabla 2 Parámetros del Modelo 2S2P1D para las matrices asfálticas finas

FAM	1	2	3	4	5	6	Modelo 2S2P1D
G_∞ (MPa)	162,95 3	154,70 9	163,42 8	178,92 3	164,41 4	169,86 1	
G_0 (MPa)	46,374	50,184	48,991	52,148	50,106	58,544	
k	0,17	0,19	0,19	0,16	0,19	0,17	
h	0,48	0,43	0,51	0,5	0,68	0,62	
α	3,45	3,71	7,94	2,98	8,5	3,12	
β	798	729	202	222	202	209	
τ	12,61	10,61	777,73	6,4	902,19	12,8	
Se/Sy	0,046	0,049	0,088	0,075	0,087	0,079	
R^2	0,998	0,998	0,994	0,996	0,995	0,996	

Tal y como se aprecia en los resultados de los modelos, se obtuvieron valores de k en un rango de 0,16 a 0,19, mientras que los valores de h se ubicaron entre 0,43 y 0,68, mostrando un aumento en el valor de k respecto al aumento de la rigidez de las mezclas. Por otro lado, los tratamientos con asfaltos originales, con menores rigideces que los asfaltos modificados de la investigación, se asocian a valores de β menores que en el resto de las mezclas, lo cual es un comportamiento esperado, dado que este parámetro se encuentra directamente ligado a la rigidez del ligante asfáltico. Al mismo tiempo, se aprecia que el valor de β para los mezclas con asfaltos modificados es muy similar entre las ellas, confirmando la similitud de las medidas de rigidez entre tratamientos. Finalmente el parámetro α permite evaluar la ocurrencia de errores en las mediciones, según lo obtenido, las mezclas que contienen asfaltos modificados, generalmente presentan valores de α mayores asociados a una variabilidad mayor en las mediciones [11].

En cuanto al ajuste de los parámetros del modelo, se obtuvieron valores de R^2 mayores a 0,99 y relaciones de Se/Sy menores de 0,09 en todos los casos, lo cual se traduce en un excelente ajuste a nivel estadístico [12].

7 Resultados de curvas maestras

A partir de los resultados se confeccionaron las curvas maestras para cada mezcla FAM. Para esto se utilizó la fórmula general Sigmoidal suponiendo que el material se comporta como mezcla asfáltica y las fórmulas CA y CAM para observar el comportamiento del material tal si fuera un ligante asfáltico. A su vez, para estas metodologías mencionadas se aplicaron los factores de ajuste de Arrhenius y WLF.

La Figura 7 muestra las curvas maestras de una matriz con asfalto original, calibradas a partir de las fórmulas generales Sigmoidal, CA y CAM, y aplicando el factor de corrimiento de WLF. De acuerdo a los resultados obtenidos, la función Sigmoidal se ajusta de mejor forma en los 6 tratamientos ensayados. En la Figura 7 a. se aprecia una curva S suavizada, de donde se

obtuvo una relación de Se/Sy por debajo de 0,05, además un R^2 de 0,99 con un porcentaje de error de 0,2 %.

A nivel general, todas las mezclas calibradas con la ecuación Sigmoidal, mostraron un excelente ajuste al aplicar ambos factores de corrimiento, los porcentajes de correlación obtenidos se ubicaron entre 97 y 99 %. Estos resultados sustentan las consideraciones realizadas a partir del Diagrama de Black, donde se evidencia la similitud del comportamiento de la matriz asfáltica con la mezcla asfáltica.

En cuanto al ajuste de las curvas maestras mediante la ecuación de CA (Figura 7b), se obtuvieron buenos porcentajes de correlación aplicando ambos factores de corrimiento, los valores de R^2 fueron superiores al 92 % con errores cercanos al 1 %. Mientras que para los ajustes con la fórmula general de CAM, a pesar de que se obtuvieron porcentajes de correlación superiores al 88%, la ecuación predicha fue una ecuación lineal (Figura 7 c.), por tanto se excluye del análisis.

De los ajustes obtenidos con las diferentes metodologías, se identifican diferencias en las colas de las predicciones. Tal y como se observa, la rigidez de la matriz asfáltica aportada por esqueleto mineral es significativamente bajo respecto una mezcla asfáltica con una granulometría completa. Al mismo tiempo el alto contenido de asfalto que poseen los especímenes evidencia una estructura más inestable y por tanto con baja resistencia al corte.

A nivel general el material analizado mostró un comportamiento muy similar al de las mezclas asfálticas convencionales, mostrando a su vez que las mezclas FAM desarrollan rigideces mayores que los ligantes asfálticos, pero menores que las mezclas asfálticas.

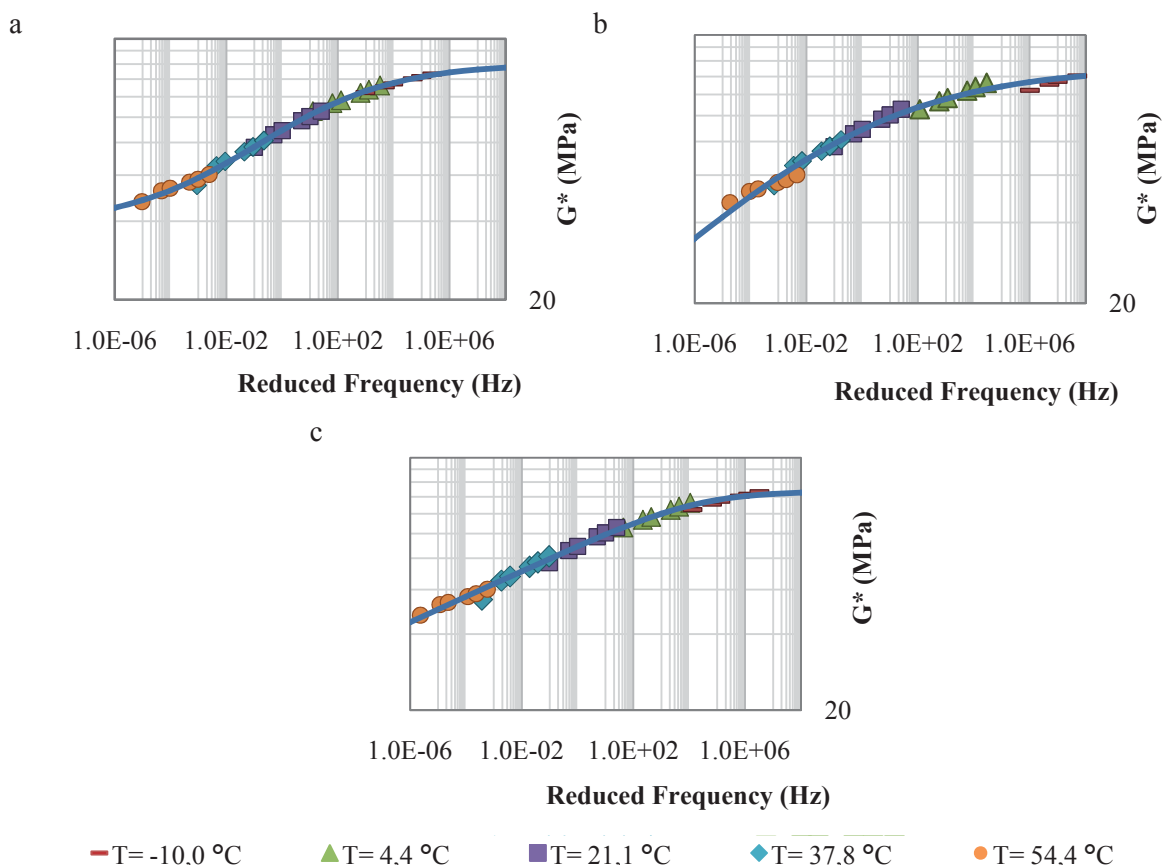


Figura 7 Curvas maestra de la matriz asfáltica fina 1 a partir de tres fórmulas generales empleando el factor de corrimiento de WLF a. Sigmoidal b. CA c. CAM

Es importante notar que generalmente, el material viscoelástico presenta un comportamiento lineal entre el estado de transición vítrea que en asfaltos generalmente se presenta a los $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. En el caso de la matriz asfáltica, la transición vítrea inicia a los $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 7a).

Adicionalmente en ligantes el estado de líquido Newtoniano se presenta cerca de los 70 °C, sin embargo para la matriz asfáltica esta transición ocurre posterior a los 54,4 °C (Figura 7a). Estas propiedades del material se pueden asociar con el agrietamiento a bajas temperaturas y con la deformación permanente respectivamente.

Finalmente se realizó una comparación entre los módulos obtenidos en los 6 tratamientos. A nivel de fuentes de agregados, no se obtuvieron diferencias significativas en los módulos de las mezclas. Mientras que a nivel de ligantes asfálticos, las ganancias de rigidez fueron desde 3 % a temperaturas bajas hasta 18 % a temperaturas altas. No obstante, no se encontraron diferencias significativas entre las tres variaciones del ligante asfáltico dentro de cada planta. En la Figura 8 se muestra el comportamiento típico observado a lo largo de los ensayos. Tal y como se aprecia, los valores de rigidez mayores se alcanzaron para las matrices con asfalto modificado con *ethylene copolymer*.

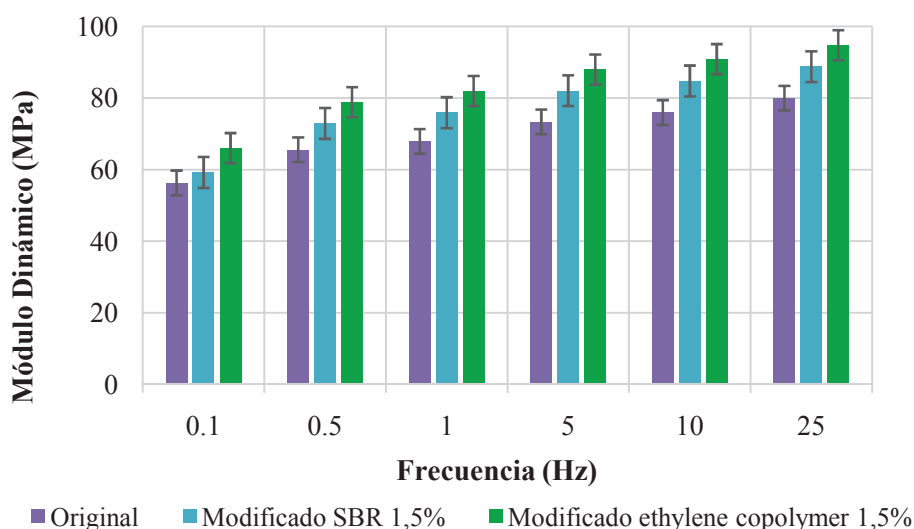


Figura 8 Comparación entre matrices asfálticas finas a nivel de ligantes asfálticos

8 Conclusiones

La implementación del ensayo DMA bajo el modo de carga cortante permitió en el laboratorio caracterizar una matriz asfáltica fina a partir de la medición de la respuesta del material ante la aplicación de cargas dinámicas. Dentro de los hallazgos obtenidos en la investigación se mencionan los siguientes:

- Los módulos complejos de cortante de matrices asfálticas finas medidos en un ensayo DMA empleando el modo de carga de cortante, se encuentran en un rango de 40 a 170 MPa, obteniéndose mayores rigideces en mezclas con asfaltos modificados.
- El comportamiento de las matrices asfálticas finas como material, se asemeja al comportamiento de una mezcla asfáltica, esto se determinó a partir de las tendencias del ángulo de fase respecto al módulo dinámico registradas a partir del Diagrama de Black.
- Del análisis de sensibilidad se obtuvo que la desviación estándar más probable del módulo complejo de corte producto de la incertidumbre de los parámetros de ancho, largo, espesor y rigidez es de 0,60 MPa. Esto implica que el 97,5 % del total de las mediciones contienen un error del 0,5 al 3 % asociado a la variabilidad intrínseca de dichos parámetros.
- Existe un excelente ajuste de los resultados de módulo en las curvas maestras empleando la fórmula general Sigmoidal y el factor de ajuste de WLF, donde se obtuvieron bondades de ajuste entre 0,97 y 0,99 y errores menores al 0,3%.

- No se encontró diferencias significativas en módulos de matrices asfálticas finas con asfaltos modificado con SBR y *ethylene copolymer* al 1.5% para una misma fuente de agregados.

A través de la experiencia adquirida a lo largo del proyecto, y del éxito obtenido en la ejecución de los ensayos DMA, se recomienda el desarrollo de mayor investigación correspondiente a la validación de los resultados obtenidos mediante la realización de ensayos certificados de la misma naturaleza. Al mismo tiempo deben estudiarse los efectos inducidos por la geometría de los especímenes DMA, así como los rangos de ensayo y modos de carga en la respuesta del material.

9 Referencias

- [1] Caro, S. "Modelo micromecánico de fractura para cuantificar moisture damage usando ensayos reológicos y DMA". Universidad de Costa Rica. Charla Magistral. Setiembre 2013.
- [2] Lytton R., L., Masad E., A., Zollinger C., Bulut R., and Little D. "Measurements Of Surface Energy And Its Relationship To Moisture Damage". Report FHWA/TX-05/0-4524-2. Texas, 2005.
- [3] Howson, J., Masad, E. A., Bhasin, A., Castelo, V., Arambula, E., Lytton, R., and Little, D. "System for the Evaluation of Moisture Damage Using Fundamental Material Properties". Report FHWA/TX-07/0-4524-1. Texas, 2007.
- [4] Sousa P., Kassem E., Masad E., and Little D. "New Design Method of Fine Aggregates Mixtures And Automated Method For Analysis Of Dynamic Mechanical Characterization Data". Transportation Research Board 90th Annual Meeting. Washington, D.C., 2011.
- [5] Woldekidan M. F., Huurman M., and Pronk A. C. "Linear and Nonlinear Viscoelastic Analysis of Bituminous Mortar". In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2370, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2013.
- [6] Masad E., Tashman L., Somedavan N., and Little D. "Micromechanics-Based Analysis of Stiffness Anisotropy in Asphalt Mixtures". In Journal of Materials in Civil Engineering, 14(5), 374-383, America Society of Civil Engineers. [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2002\)14%3A5\(374\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14%3A5(374)) Accessed May 2013.
- [7] Loria, L. G. "Evaluation of New and Existing Test Methods to Assess Recycled Asphalt Pavement Properties for Mix Design". Graduation project to qualify for the degree of Doctor of Philosophy, University of Nevada, Reno. 2011.
- [8] TA Instruments. "TA Instruments Dynamic Mechanical Analyzer, 2010". <http://www.tainstruments.com/pdf/literature/TA284.pdf>, Accessed September 2012.
- [9] Mays, L., W. "Hydraulic Design Handbook. Department of Civil and Environmental Engineering. McGraw-Hill Professional. 1999.
- [10] Pellenin, T., Witczak M. W., y Bonaquist, R. "Master Curve Construction Using Sigmoidal Fitting Function with No Linear Least Squares Optimization Technique". Proceedings of the 15th ASCE Engineering Mechanics Division Conference, Columbia University, New York, 2002.
- [11] Yusoff N. I. Md., Mounier D., Ginoux M., Hainin R., Gordon D., Di Benedetto H. "Modelling the rheological properties of bituminous binders using the 2S2P1D Model". Construction and Building Materials. 2013.
- [12] Tran NH, Hall KD. "Evaluating the predictive equation in determining dynamic moduli of asphalt mixtures used in Arkansas". Electron J Assoc Asphalt Paving Technol 2005.