



# ANÁLISIS DE AGRIETAMIENTO DEL MASTIC ASPHALT MEDIANTE EL ENSAYO DE LÍNEA DE AMPLITUD SWEEP

Sarilú Guadalupe Contreras Rubio<sup>1</sup>, Lucero Pérez Hernández<sup>2</sup>, Pedro Limón Covarrubias<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México, sarilu.contreras3219@alumnos.udg.mx

<sup>2</sup> Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México, lucero.perez3221@alumnos.udg.mx

<sup>3</sup> Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México, pedro.limon@academicos.udg.mx

## Resumen

El Mastic asphalt, una mezcla de filler y asfalto, mejora la durabilidad, impermeabilidad y rigidez de las mezclas asfálticas. Su alta cohesión y capacidad para rellenar vacíos del agregado pétreo son importantes para garantizar una mejor adhesión y prevenir fallas en el pavimento. En investigaciones anteriores se priorizaba mejorar la calidad de los agregados y el diseño de las mezclas asfálticas, sin considerar la importancia de los ligantes asfálticos, que se vuelven más rígidos y quebradizos con el tiempo. Es crucial evaluar el envejecimiento del ligante para abordar el agrietamiento. Algunos investigadores enfocan la fatiga como factor principal, mientras otros resaltan la importancia de la mezcla asfáltica. Sin embargo, es fundamental reconocer que las grietas por fatiga se originan en el asfalto, destacando la relevancia del comportamiento del ligante en el diseño y construcción del pavimento. El objetivo principal de este trabajo es analizar el agrietamiento del mastic asphalt mediante el ensayo de línea de amplitud sweep (LAS). Se evaluaron ocho filler utilizando el ensayo azul de metileno y SEM. Se realizaron pruebas de envejecimiento a corto plazo mediante RTFO con diferentes tipos de asfalto y técnicas. Se analizó mediante DSR el comportamiento del Mastic ante cargas cíclicas determinando la amplitud de deformación para generar fisuras o grietas. Los resultados mostraron que la relación filler/asfalto de 0.6 tiene mejor resistencia al agrietamiento en el mastic debido al aporte del ligante. Se identificó la relación A/b puede utilizarse como parámetro de referencia para evaluar la resistencia a la fatiga en el mastic mediante LAS. Combinado diferentes pruebas, como el azul de metileno y la micrografía, obtenemos una visión completa de la interacción entre los fillers, el ligante asfáltico y las propiedades del mastic. Estos hallazgos mejoran diseño, selección de materiales y medidas prolongando la vida útil y previniendo agrietamiento en pavimentos.

**Palabras Clave:** Mastic Asphalt, Agrietamiento, RTFO, LAS.

## 1 Introducción

Los pavimentos no experimentan una falla o colapsan repentinamente, sino que lo hacen en forma gradual y progresiva. El deterioro de los pavimentos asfálticos es un fenómeno inevitable, debido a las cargas a las que están expuestos y la influencia de diversos factores externos. Según investigaciones, se ha encontrado que el agua y los agentes climáticos pueden provocar cambios internos en el asfalto a corto y largo plazo [1]. Estos factores externos contribuyen a diferentes tipos de deterioro en los pavimentos, clasificados en tres categorías: deterioros en la superficie, en la estructura y los originados desde su construcción [2,3]. En particular, el enfoque de este estudio se centró en las deformaciones en la estructura, específicamente en los agrietamientos, ya que estas fallas a su vez son resultado de la fatiga y el envejecimiento del material. Estos agrietamientos comprometen la integridad del pavimento y pueden llevar a un deterioro acelerado si no se abordan de manera adecuada y oportuna. Como se aludió anteriormente, existen los agrietamientos que se presentan por



bajas temperaturas y agentes climáticos, los cuales producen la aparición de fisuras transversales debido a la contracción de la carpeta, cabe mencionar que estas no se asocian a las cargas de tránsito. Por otro lado, los agrietamientos por fatiga son ocasionados por los esfuerzos continuos aplicados en estas mismas, las cuales se manifiestan como fisuras longitudinales. Cabe resaltar que este tipo de fisuración es una señal de que se ha alcanzado el límite de cargas que se obtuvieron en su diseño [4, 5, 6].

Ha habido un creciente interés en la investigación del agrietamiento, ya que anteriormente siempre se centraba en mejorar la calidad del agregado pétreo, buscar un mejor diseño en las mezclas asfálticas o bien, en el uso de asfaltos altamente modificados. Se dejaba a un lado los ligantes asfálticos, siendo que estos son los que cambian con el tiempo y se vuelven más rígidos y quebradizos, razón por la cual el agrietamiento depende más del estado de envejecimiento del aglomerante y las pruebas que se realizaban no se hacían con material envejecido [7]. Asimismo, investigadores opinan que el problema en la estructura del pavimento es la fatiga, otros que el problema radica en la mezcla asfáltica, no obstante, la grieta por fatiga comienza y se propaga en el asfalto; por ello esto debe tomarse en cuenta desde el ligante asfáltico [8].

Por esta razón, se realizó un análisis distinto del agrietamiento en el asfalto, considerando su comportamiento y condiciones. Se utilizaron mezclas de asfalto con diferentes dosificaciones de filler, teniendo en cuenta factores como el tipo de filler, su micrografía, la proporción y la temperatura de análisis. Estos elementos son clave para comprender la susceptibilidad del mastic al agrietamiento. Además, se evaluó el envejecimiento del filler y su impacto en los agrietamientos. Este análisis brindó información relevante sobre la resistencia y durabilidad del asfalto.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es analizar el agrietamiento del mastic asphalt mediante el ensayo de línea de amplitud sweep (LAS). Se emplearon dos tipos de asfalto: uno modificado (PG 70 -22) y otro convencional (PG 64 -22). Se procedió a seleccionar ocho diferentes de filler, en función de su grado de reactividad mediante el ensayo de azul de metileno. Asimismo, se utilizó la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM) para analizar la distribución de partículas, su forma, textura y posibles irregularidades en la superficie. Aspectos relevantes para comprender cómo pueden influir en el comportamiento y rendimiento del Mastic Asphalt. Los fillers seleccionados fueron sometidos a dosificación en distintas proporciones en el ligante asfáltico. Se realizó el envejecimiento a corto plazo mediante RTFO: técnica 1 - envejecimiento de ligantes asfálticos seguido de dosificación con filler en distintas proporciones; técnica 2 - homogeneización de filler con asfalto y posterior envejecimiento. Finalmente, con ayuda del Reómetro de corte dinámico (DSR) se realizó un barrido de amplitud lineal (LAS) con el fin de analizar el comportamiento del Mastic Asphalt cuando es sometido a un daño mediante cargas cíclicas empleando amplitudes de carga linealmente crecientes, es decir, simulando el efecto de agrietamiento. Este ensayo se llevó a cabo a la temperatura intermedia del ligante asfáltico (PGint). A partir de la combinación de los resultados obtenidos a través del ensayo de azul de metileno, la micrografía electrónica, se realizaron correlaciones y se compararon los resultados para la evaluación de agrietamiento y permitió obtener una visión integral de la interacción entre los filler, el ligante asfáltico y las propiedades del Mastic Asphalt.

## 2 Materiales y métodos

### 1.1 Filler

El filler, también conocido como la fracción de polvo mineral del árido total que pasa por la malla No. 200 (0.075 mm) durante el tamizado, desempeña un papel crucial en la composición y comportamiento de las mezclas asfálticas. Su presencia y características mineralógicas tienen una influencia significativa en la rigidez y las propiedades de la mezcla. Además de su función en la



estabilidad y cohesión, su presencia ayuda en la durabilidad y la impermeabilidad de la mezcla asfáltica, evitando la segregación de los componentes y mejorando la capacidad de resistir la infiltración de humedad. Esto es especialmente importante para prevenir daños causados por la humedad y preservar las propiedades físicas de la mezcla a lo largo del tiempo. Su correcta selección y dosificación son fundamentales para garantizar el rendimiento óptimo de la mezcla asfáltica [9]. En este proyecto, se manejan diversos tipos de filler, selectos dependiendo de los resultados de las pruebas de azul de metileno realizadas que se muestran en la Tabla 1. Cabe mencionar que solo se realizó este estudio a los filler para su selección.

Tabla 1. Filler seleccionado mediante la prueba de azul de metileno

No. de Filler	MBV [mg/g]	Rango
1	4	Debajo
2	1	Debajo
3	27	Arriba
4	32	Arriba
5	4	Debajo
6	14	Dentro
7	8	Debajo
8	17	Arriba

En la Tabla 1, se muestran los filler utilizados y sus valores de azul de metileno en diferentes rangos para ver su comportamiento al hacer la mezcla con el asfalto. Dichos rangos o bien especificaciones, se toman en cuenta por los requisitos de calidad de la fracción fina del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa de la Normativa Recomendación AMAAC PA-MA 01/2013, donde indica el valor de 12 máximo para capas de rodadura y 15 máx. para capas estructurales [10].

## 1.2 Cemento asfáltico

El término "cemento asfáltico" o "asfalto" se refiere al residuo del petróleo utilizado como material aglomerante. Se obtiene a través del proceso de destilación del petróleo, resultando en un material viscoso, impermeable y altamente adherente a materiales pétreos. Además, el cemento asfáltico es altamente susceptible a la temperatura.

En el contexto de este estudio, se llevaron a cabo evaluaciones de dos tipos de cemento asfáltico. La Tabla 2, corresponde a un grado de desempeño 64-22, mientras que la Tabla 3, es de grado PG 70-22.

Tabla 2. Caracterización del asfalto convencional (PG 64 -22)

Prueba	Especificación (N-CMT-4-05- 004/18)	Método de prueba	Resultado
Visc. Rotacional Brookfield a 135°C SC4- 27 12 rpm; (Pa·s)	3 máx.	ASTM D 4402	0.4906
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s; (dmm)	60 mín.	M-MMP-4-05- 006/00	74
Punto de Reblandecimiento; (°C)	48 mín.	M-MMP-4-05- 009/00	50
Módulo Reológico de Corte Dinámico a 64°C [G*/Sen δ ]; (Kpa)	1 mín.	ASTM D 7175	1.75

Tabla 3. Caracterización del asfalto convencional (PG 70 -22)

Prueba	Especificación (N-CMT-4-05- 004/18)	Método de prueba	Resultado
Visc. Rotacional Brookfield a 135°C SC4- 27 12 rpm; (Pa·s)	3 máx.	ASTM D 4402	0.4906
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s; (dmm)	40 mín.	M-MMP-4-05- 006/00	74
Punto de Reblandecimiento; (°C)	55 mín.	M-MMP-4-05- 009/00	50
Módulo Reológico de Corte Dinámico a 70°C [G*/Sen δ ]; (Kpa)	1 mín.	ASTM D 7175	1.75

### 1.3 Mastic Asphalt

El mastic asphalt es la mezcla de filler y asfalto, el cual tiene como fin proporcionar mayor cohesión, así como rellenar los vacíos que deja el agregado pétreo en las mezclas asfálticas.

Una de las propiedades más importantes que deben tener las mezclas es una buena adhesión del Masthic Asphalt, ya que gracias a esto se puede alargar la vida útil de las carreteras, además de evitar la deformación. Si se pierde adhesividad en la mezcla, esta se comporta de manera inestable provocando fallos en las condiciones del pavimento. Es por ello, que al mezclar filler con el asfalto se produce una modificación de la adhesión, ya que aumenta la adhesión [11].

Es por ello, que para mejorar el comportamiento mecánico y dar mayor durabilidad a nuestra mezcla, se busca realizar una mezcla asfáltica agregando filler.

### 1.4 Ensayos

Para poder analizar los agrietamientos del Mastic Asphalt con diferentes tipos de filler y su comportamiento en diferentes proporciones y temperaturas, se propuso la metodología mostrada en la Figura 1.

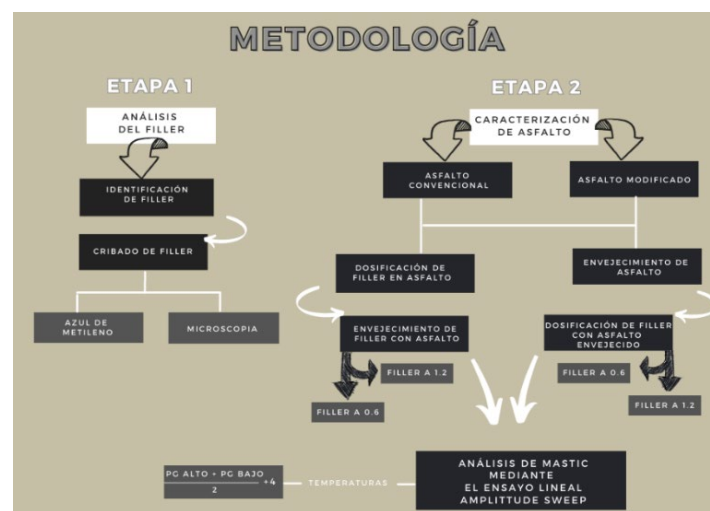


Figura 1. Plan de trabajo análisis de filler/asfalto

#### 1.4.1 Azul de metileno

La prueba de Azul de Metileno de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas estima la reactividad de los materiales finos en las mezclas (partículas menores de 0.075 mm, dichas que pasan por la malla N°200). Consiste en añadir dosis controladas de solución de azul de metileno a los finos hasta que dejen de absorberlo. Cuanto más azul de metileno retengan, mayor será su potencial expansivo, lo que indica su grado de reactividad.

Se realizaron 16 pruebas de azul de metileno con diferentes tipos de filler, de las cuales se seleccionaron 8. En el ensayo, siguiendo la metodología de la norma M-MMP-4-04-014-09, se mezcló un gramo de filler con 30 gramos de agua bidestilada y se agregó un mililitro de la solución de azul de metileno. Después de agitar durante un minuto, se vertió una gota en un papel filtro. Se repitió este proceso hasta que se formara un halo azul alrededor de la gota en el papel filtro. Esta prueba proporciona información sobre la reactividad de los materiales finos y su potencial para expandirse en las mezclas asfálticas. [12].

#### 1.4.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La micrografía del filler se refiere a la captura ampliada de un material de relleno mediante un microscopio, el cual nos proporciona una visión detallada de la morfología, tamaño y distribución de las partículas presentes en el filler. Esta técnica de caracterización resulta fundamental para evaluar la calidad y las propiedades del filler, así como para comprender su comportamiento en diferentes sistemas.

Se prepararon las muestras del filler para posteriormente examinarse en un microscopio electrónico. Se requieren dos condiciones para analizar muestras en un SEM: que se encuentren libres de humedad y sean conductoras. Cuando las muestras no son conductoras (orgánicas, biológicas, vidrios, polímeros) necesitan una cubierta metálica para lograr su observación, generalmente una cubierta de oro, o con carbono. En este estudio, fueron recubiertas con una capa de 40  $\mu\text{m}$  de oro por espolvoreado catódico para ser observadas en el microscopio. Las imágenes de electrones secundarios se lograron excitando la muestra con voltajes de aceleración de 10 y 15 KV y la distancia de trabajo utilizada fue de 10 y 15 mm.

Al analizar la micrografía del filler (ver Figura 2), se puede determinar la forma de las partículas (esféricas, alargadas, irregulares), el tamaño medio de las partículas, la distribución de tamaños, así como la posible aglomeración o agregación de partículas. Estos datos resultan esenciales para comprender la interacción del filler con otros componentes en una matriz o sistema, y para optimizar su formulación y rendimiento [13, 14].

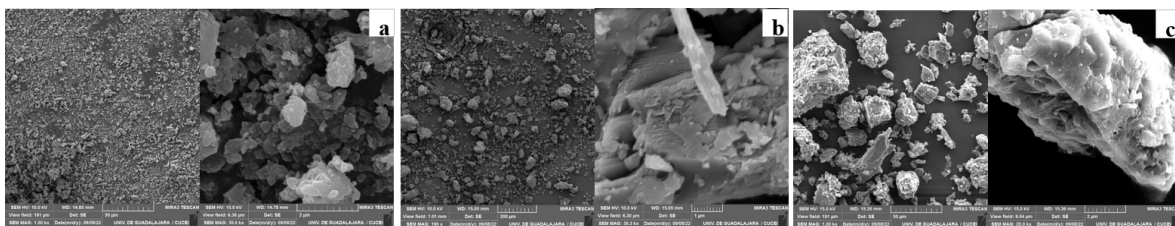


Figura 2. Micrografías del filler a modo de muestra

De acuerdo con la Figura 2a, que muestra el filler con un azul de metileno bajo, se puede observar una distribución uniforme y homogénea de grumos en la dimensión de 50  $\mu\text{m}$ . Al hacer zoom a 2  $\mu\text{m}$ , se aprecia que estos grumos adoptan una forma angular, pero presentan una disposición de láminas delgadas apiladas. En cuanto a la Figura 2b, se empieza a notar que algunos grumos son ligeramente más grandes que otros, aunque las diferencias no son significativas. Resulta interesante destacar la



dimensión de 1  $\mu\text{m}$ , donde nuevamente se aprecia la disposición de láminas delgadas apiladas con un ordenamiento unidireccional. Por último, la Figura 2c corresponde al filler con un azul de metileno alto. En general, se observa una morfología irregular, con una superficie expuesta compuesta por poliedros o superficies angulosas y rugosas.

#### *1.4.3 Dosificación de filler en asfalto*

Con el fin de lograr una dosificación precisa, se procedió a mezclar los distintos tipos de filler, dando lugar a nuestro Mastic Asphalt. El proceso de mezclado se realizó a una temperatura constante de 100°C, por encima del punto de ablandamiento del material. Para evitar cualquier problema de dosificación, el filler se añadió gradualmente durante el proceso, evitando así un enfriamiento rápido del asfalto. La mezcla se llevó a cabo de forma continua, permitiendo la salida del aire atrapado en la masa de asfalto.

En el contexto de nuestro proyecto, se emplearon dos dosificaciones distintas: una con un filler de 0.6 y otra con un filler de 1.2. Estas dosificaciones fueron aplicadas, respectivamente, después y antes del envejecimiento del asfalto. Los valores de 0.6 y 1.2 representan los límites establecidos por Superpave en términos de relación de polvo o relación filler/asfalto. Si la proporción de material fino es demasiado alta, puede resultar en una mezcla más frágil y menos resistente al desgaste y la fatiga. Por otro lado, una proporción insuficiente de material fino puede llevar a problemas de resistencia y estabilidad en la mezcla [15, 16].

#### *1.4.3 Envejecimiento de asfalto*

Para simular el envejecimiento oxidativo a corto plazo que ocurre durante las operaciones de mezclado, pavimentación y en los primeros meses de la construcción, se utilizó el horno rotatorio de película delgada RTFO (Rolling Thin Film Oven) de acuerdo con la norma ASTM D2872. Como se mencionó, esta prueba simula los cambios en las propiedades de las mezclas asfálticas al aplicar aire caliente con una velocidad y presión constantes. Esta prueba es crucial para evaluar cómo el envejecimiento afecta al asfalto y su capacidad para mantener su calidad y resistencia a lo largo del tiempo.

El envejecimiento del asfalto en nuestro proyecto se realizó de dos formas: el envejecimiento por separado, seguido de la dosificación con filler, y el envejecimiento simultáneo del asfalto con el filler. Se utilizaron 8 recipientes cilíndricos de vidrio, a los cuales se les añadió aproximadamente 35 gramos de asfalto. Estos recipientes se colocaron horizontalmente en el horno giratorio, asegurándose de que se acomodaran correctamente en los orificios de la rueda para evitar accidentes. Luego, se cerró la puerta del horno y se estableció la temperatura en 163°C, dejando que la prueba se llevara a cabo durante 85 minutos.

#### *4.4.4 Ensayo del mastic asphalt mediante la prueba Lineal Amplitude Sweep (LAS)*

El ensayo LAS tiene como propósito determinar la resistencia al daño por fatiga por medio de una carga cíclica (sinusoidal) y utiliza el incremento de amplitudes de carga en forma lineal; esto para provocar un daño continuo acelerado por fatiga, el cual se utiliza para calcular la capacidad de resistencia a la fatiga que tiene el ligante a partir de las propiedades reológicas y los resultados del barrido de amplitud.

De acuerdo al método AASHTO TP-101-14 [15], el ensayo se divide en 2 etapas. En primera instancia corresponde a un barrido de frecuencias a una deformación constante (0.1%), estas frecuencias van en el siguiente orden: 0.2, 0.4, 0.8, 1, 2, 4, 8, 10, 20 y 30 Hz, con la finalidad de recabar información de las propiedades reológicas del asfalto antes de este ser dañado; mientras que,

en la segunda, es un barrido de deformaciones a frecuencia constante (10 Hz) durante intervalos de 10 segundos, estos intervalos se conforman de 100 ciclos de carga cada uno. Las frecuencias de barrido van de 0 hasta alcanzar el 30%.

En la Figura 3, se detalla el plan de trabajo para las pruebas LAS. Con un total de 8 muestras de filler, tanto utilizando asfalto convencional como modificado, se evaluó el envejecimiento por separado del asfalto, seguido de la dosificación con filler en proporciones de 0.6 y 1.2. Asimismo, se realizaron pruebas donde el asfalto y el filler se envejecieron simultáneamente, tanto para el asfalto convencional como el modificado, utilizando las mismas dosificaciones.

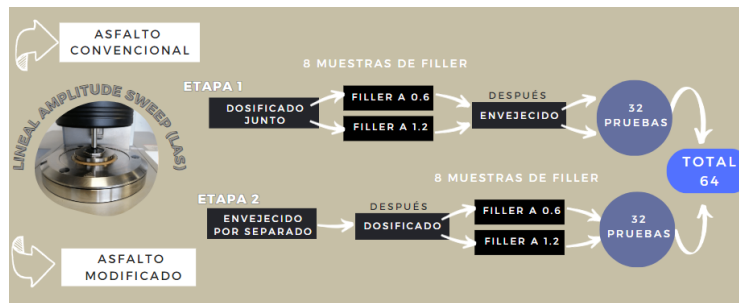


Figura 3. Plan de trabajo del análisis del mastic

Se realizaron 64 pruebas LAS en total, en especímenes de 8 mm de diámetro y 2 mm de altura, como lo marca la norma, teniendo en cuenta la temperatura intermedia del ligante asfáltico (PGint) obtenida a través de la ecuación 1, fórmula especificada según las normas de la AASHTO y la ASTM.

$$PG\ alto + PG\ bajo \approx 2 \approx + 4 \quad (1)$$

En la Tabla 4, se muestra las temperaturas a las que se correrán las pruebas LAS, según el asfalto a utilizar. Estas temperaturas representan puntos específicos dentro del rango de temperaturas en el que el asfalto muestra su comportamiento viscoelástico. Las cuales también sirven como referencia para clasificar el comportamiento del ligante asfáltico y garantizar su desempeño adecuado en diferentes condiciones climáticas y de tráfico.

Tabla 4. Temperaturas intermedias del ligante asfáltico a PGint

Grado PG	PG Alto	PG Bajo	Temperatura intermedia calculada
Convencional	64	-22	25
Modificado	70	-22	28

### 3 Resultados y discusión

A continuación, en la Figura 4 se muestra la ley de fatiga de los diferentes tipos de mastic modificado con polímero en la condición de dosificación de 0.6 y envejecimiento del asfalto por separado.

En el gráfico cabe resaltar dos variables importantes, el valor A que es la intercepción al origen de la ley de fatiga, que entre mayor es su valor, mayor es su resistencia a la fatiga al comienzo del ensayo o porcentaje de deformación inicial. Por otra parte, el valor b, el cual es la pendiente de la ley de fatiga, que entre menor es su valor, mayor resistencia a la fatiga a los diferentes cambios de porcentaje de deformación que sufre el mastic.

Por lo tanto, se ha realizado el análisis en función de la relación A/b, la cual entre mayor es su valor, mayor es la resistencia a la fatiga.

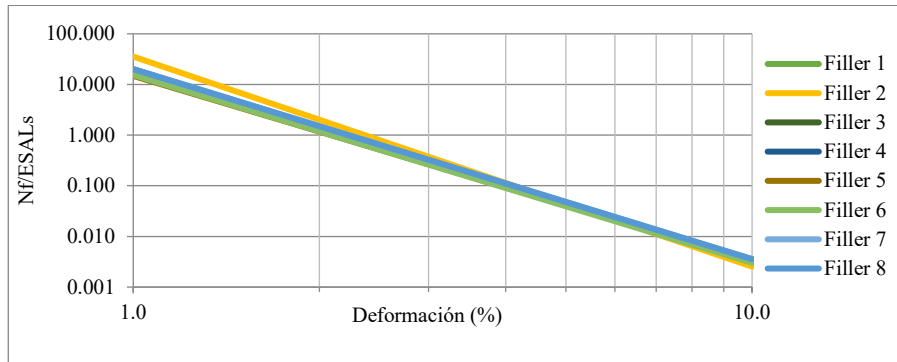


Figura 4. Gráfico de ley de fatiga a modo de muestra.

### 3.1 Relación A/b PGInt

En la Figura 5, se observa un mejor desempeño de resistencia al agrietamiento cuando el ligante se envejece por separado, destacando el uso de plantas de asfalto donde se agrega el filler por separado. Los fillers 2 y 8 muestran mayor resistencia, con el filler 2 de bajo valor azul de metileno y el filler 8 por encima de 15.

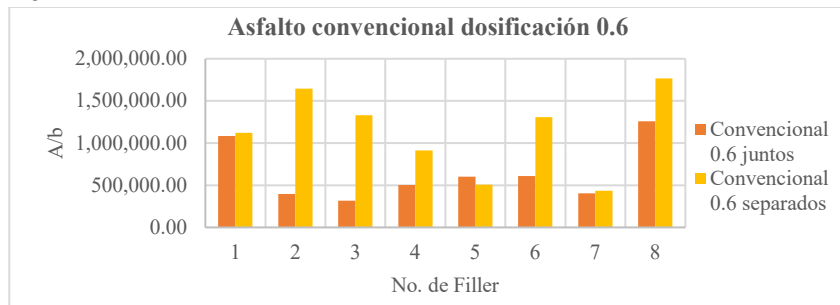


Figura 5. Relación A/b de mastic convencional con dosificación de 0.6.

En la Figura 6, nuevamente se observa un mejor desempeño de resistencia al agrietamiento al envejecer el ligante por separado. Los fillers 3 y 8 muestran la mayor resistencia, con alto valor de azul de metileno. El filler 2, con menor valor de azul de metileno, se vuelve demasiado rígido al tener alta proporción de filler asfalto, resultando en baja resistencia al agrietamiento (relación A/b). Esto se debe a su composición de óxido de calcio (cal), que mejora la cohesión y ralentiza el envejecimiento, pero su exceso causa fraguado acelerado.

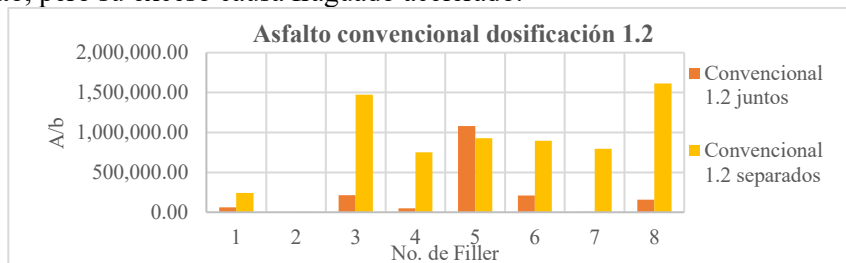


Figura 6. Relación A/b de mastic convencional con dosificación de 1.2.



En la Figura 7, se puede observar que se tiene mayor resistencia al agrietamiento en valores de relación de filler/asfalto de 0.6, esto debido a que se tiene mayor ligante asfáltico, los filler con mayor resistencia son el 1 y 8. En el cual el filler 1 tiene un valor bajo de azul de metileno y el filler 8, un valor por encima de 15.

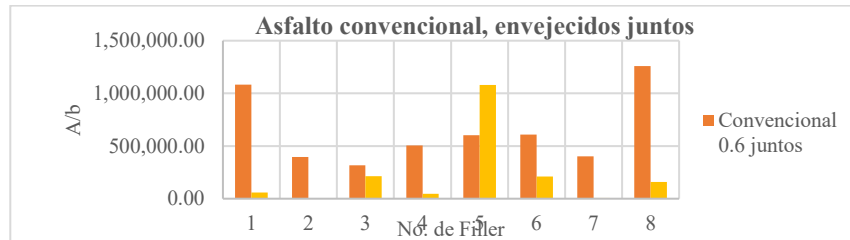


Figura 7. Relación A/b de mastic convencional con dosificación de 0.6 y 1.2 (juntos).

En la Figura 8, se puede observar que se tiene mayor resistencia al agrietamiento en valores de relación de filler/asfalto de 0.6, esto debido a que se tiene mayor ligante asfáltico, los filler con mayor resistencia son el 1, 2, 3, 6 y 8. En el cual los filler 1 y 2 tiene un valor bajo de azul de metileno, el filler 6 un valor en el rango máximo permitido y los filler 3 y 8, un valor por encima de 15.

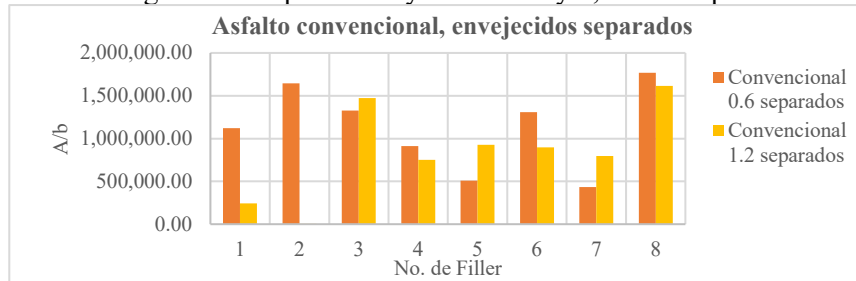


Figura 8. Relación A/b de mastic convencional con dosificación de 0.6 y 1.2 (separados).

En la Figura 9, se puede ver que se tiene mejor desempeño de resistencia al agrietamiento cuando el ligante se envejece por separado, esto pone de manifiesto el uso de plantas de asfalto en el que el filler se añade por separado. Por otra parte, el filler 2 es el de mayor resistencia. En donde el filler 2 es de bajo valor azul de metileno.

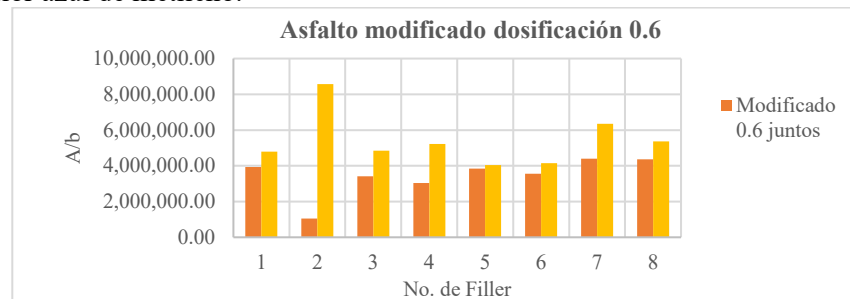


Figura 9. Relación A/b de mastic modificado con dosificación de 0.6.

En la Figura 10, se puede ver que se tiene una resistencia muy semejante en los mastic modificados con relación 1.2, ya sea en condición de envejecimiento junto o separado. Así mismo, el filler 2, que corresponde a oxido de calcio su resistencia fue nula, debido a la sobre rigidez que se tuvo con el

mastic modificado y la alta relación de filler/asfalto. Por otra parte, el filler 8 es el de mayor resistencia. En donde el filler 8 es de bajo valor azul de metileno mayor a 15.

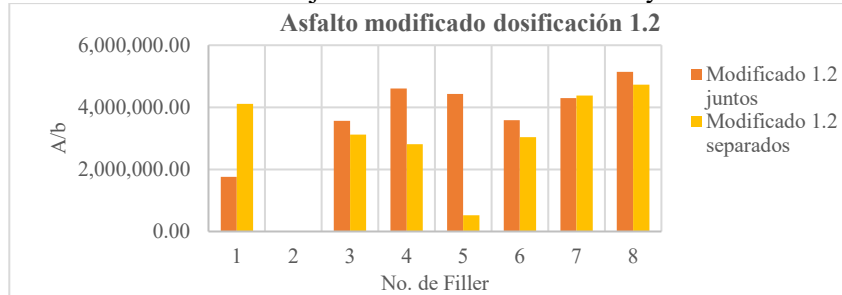


Figura 10. Relación A/b de mastic modificado con dosificación de 1.2.

En la Figura 11, se puede ver que se tiene una resistencia muy similar en los mastic modificados en ambas relaciones filler/asfalto de 0.6 y 1.2. Así mismo, el filler 2, que corresponde a su resistencia fue muy baja, debido a la sobre rigidez que se tuvo con el mastic modificado y la alta relación de filler/asfalto. Por otra parte, el filler 8 es el de mayor resistencia. En donde el filler 8 es de bajo valor azul de metileno mayor a 15.

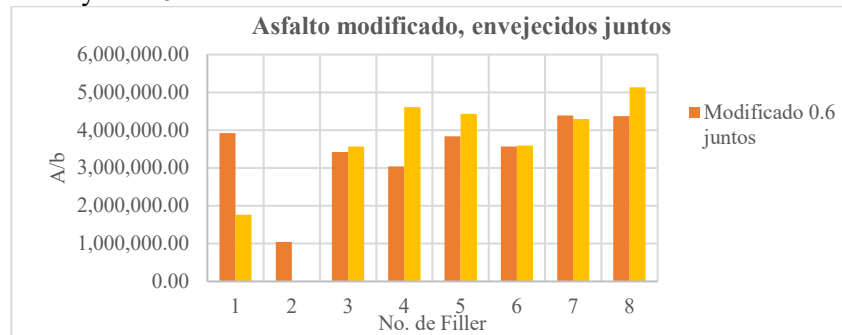


Figura 11. Relación A/b de mastic modificado con dosificación de 0.6 y 1.2 (juntos).

En la Figura 12, se puede ver que se tiene una resistencia mayor en los mastic modificados con relación de 0.6. Así mismo, el filler 2, que corresponde a la mayor resistencia. Sin embargo, a la relación de 1.2 no se tiene resistencia debido a la sobre rigidez que se tuvo con el mastic modificado y la alta relación de filler/asfalto.

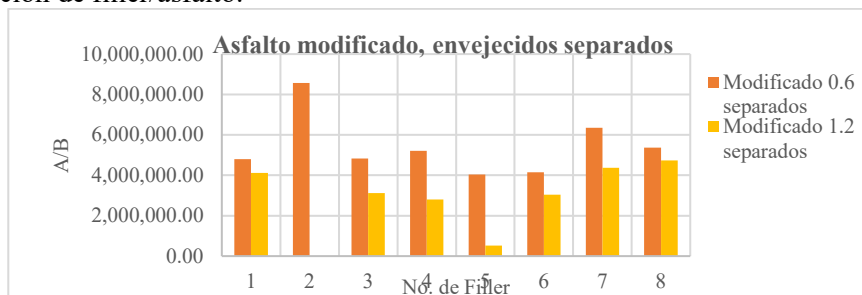


Figura 12. Relación A/b de mastic modificado con dosificación de 0.6 y 1.2 (separados).

### 3.2 Correlación del Azul de Metileno

Como se pudo ver en los resultados de la relación A/b, no existe en algunas de las condiciones una tendencia de que entre menor sea el valor de azul de metileno, mayor la relación A/b. Por lo tanto, se ha realizado un gráfico de correlación entre azul de metileno y relación en el ensayo LAS A/b con todas las condiciones propuestas anteriormente.

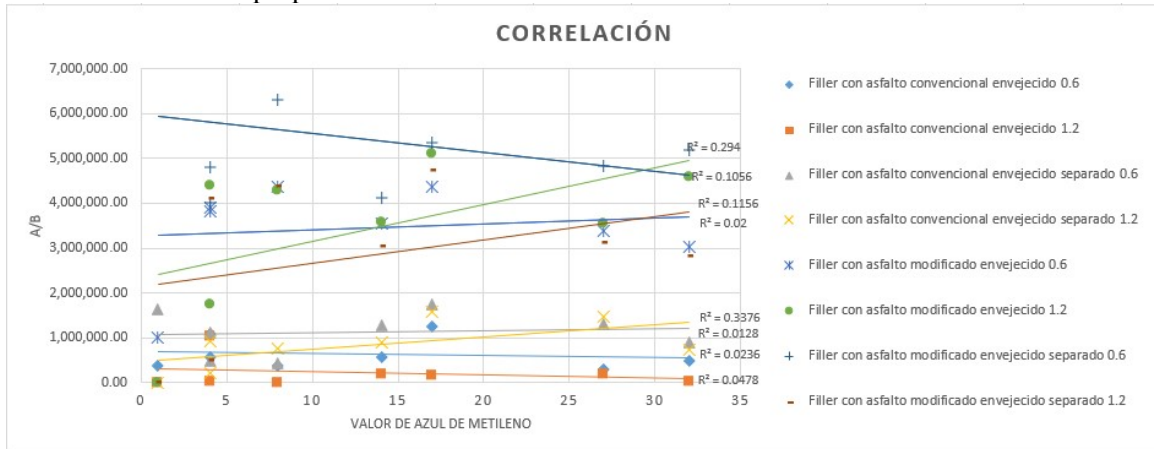


Figura 13. Correlación de resultados de valor de azul de metileno y relación A/b

Las correlaciones observadas en la Figura 13, son muy bajas por lo cual no existe una tendencia entre los valores de azul de metileno y la relación A/b del ensayo de resistencia al agrietamiento lineal amplitud sweep. La mejor correlación la presenta los mastic convencional con relación filler asfalto de 1.2 y en condición de envejecimiento por separado, siendo su valor de  $R^2$  de 0.3376.

### 3 Conclusiones

La relación A/b puede ser utilizada en el ensayo lineal amplitud sweep como un parámetro de referencia, al otorgar la resistencia inicial y comportamiento a los cambios de deformación.

El mastic es un importante componente de la mezcla asfáltica, por lo cual se debe cuidar tanto la calidad del ligante asfáltico como del filler utilizado. Así mismo, el usar ligantes asfálticos modificados incrementan la resistencia del mastic.

Cabe mencionar que la relación filler/asfalto de 0.6 y 1.2 en este estudio es con base en peso, en futuras investigaciones se propone hacerlo respecto al volumen, dicho esto, esta relación de 0.6 tiene mejor resistencia al agrietamiento, debido al aporte que realiza la cantidad de ligante asfáltico en el mastic. Sin embargo, el mastic modificado con envejecimiento junto, presentó valores muy similares en la relación filler/asfalto de 0.6 y 1.2.

Se recomienda un envejecimiento por separado de los componentes del mastic, para mayor resistencia de este. Es por ello que plantas discontinuas o de doble tambor favorecen este efecto.

El óxido de calcio tiene buen comportamiento en condiciones de relación filler/asfalto cercanas a 0.6, debido a que valores cercanos a 1.2 se rigidiza demasiado, presentando nula resistencia. Por otra parte, la condición de envejecimiento por separado del mastic con óxido de calcio presenta el mejor comportamiento de los mastic analizados.

La correlación entre el valor de azul de metileno y la resistencia al agrietamiento medida mediante el lineal amplitud sweep, es muy baja, teniendo correlaciones menores a 0.4.

Se tiene como línea futura de investigación realizar ensayos a otras temperaturas como es la temperatura de falla  $G^* \text{sen } \delta = 5000 \text{ kPa}$ , correlacionar los resultados con microscopia del filler, composición de este, plasticidad y distribución de tamaños.



#### 4 Referencias

- [1] Smith, J., et al. (2018). Effects of water on asphalt binders: A literature review and analysis. *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- [2] Iberoamérica, C. d. (2002). M5.1. Catálogo de Deterioros de Pavimentos Flexibles. Recuperado el Abril de 2021, de <https://snavarro.files.wordpress.com/2008/08/manualfallas.pdf>
- [3] Jones, P., et al. (2019). Surface treatments for pavement preservation. *Transportation Research Circular, E-C251*, 1-15.
- [4] Brown, A., et al. (2020). Asphalt pavement cracking: Mechanisms, modeling, characterization, and case studies. *Construction and Building Materials*, 258, 119627.
- [5] Johnson, R., & Smith, T. (2021). Durability of asphalt pavements: A state-of-the-art review. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 2(1), 35-50.
- [6] Abdul Hassan, N., et al. (2017). Fatigue life of flexible pavements with various asphalt binder contents and compaction temperatures. *Construction and Building Materials*, 144, 500-510.
- [7] D'angelo, J. (2019). Pavement Cracking: what binder properties control. *Asphalt Magazine*.
- [8] Ayala del Toro, Y., Delgado Alamilla, H., & Garnica Anguas, P. (Julio de 2016). Efecto de la Temperatura en la Evaluación de la Fatiga en Ligantes Asfálticos. *Infraestructura Vial*, 18(31), 05-13.
- [9] Moreno-Pérez, M. A. (2011). Influencia de la naturaleza del filler de aportación en la adhesividad árido-ligante para mezclas bituminosas discontinuas. Zaragoza: Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad de Zaragoza.
- [10] PA-MA-01/2013, P. A. (2013). Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño. Asociación Mexicana del Asfalto, A.C.
- [11] Cardona-Campuzano, Y., & Cadena, L. (2018). Análisis de la resistencia a la flexión en especímenes de concreto asfáltico, usando una red de cápsulas de café desecho. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- [12] M-MMP-4-04-014-09. (2009). MMP- Métodos de muestreo y prueba de materiales.
- [13] Rosas, G. (2023). Microscopía electrónica de barrido y microanálisis de elementos del Clúster Científico y Tecnológico BioMimic. Instituto de Ecología, A.C. <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/723-microscopia-electronica-de-barrido-y-microanalisis-de-elementos-del-cluster-cientifico-y-tecnologico-biomimic>
- [14] Ledea, O., Castro, H., González, R., Farina, M., Linhares, A., & De Oliveira, M. (2010). Aplicación de la Microscopía Electrónica de Barrido en la Caracterización de la Poliapatit. *CENIC. Ciencias Químicas*, 41, 1-6.
- [15] Asociación Mexicana de Asfaltos A.C (2013). Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño, PA-MA 01/2013.
- [14] Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2021). Método de diseño por desempeño para mezclas asfálticas de granulometría densa. M-MMP-4-05-046/21
- [17] AASHTO TP-101-14. (2014). Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep. American Association of State Highway and Transportation Officials.