

# INFLUENCIA EN EL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS TEMPLADAS CON EMULSIÓN POR LA INCORPORACIÓN DE ADICIONES ACTIVAS

Marina Cauhapé Casaux<sup>1</sup>, Luis Zorzutti<sup>2</sup>, Silvia Angelone<sup>3</sup> y Fernando Martínez<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio Vial IMAE-FCEIA - Universidad Nacional de Rosario - Argentina. Riobamba y Beruti. Rosario (2000). Tel: 0341 – 4808538 [mccasaux@fceia.unr.edu.ar](mailto:mccasaux@fceia.unr.edu.ar)

<sup>2</sup>Laboratorio Vial IMAE-FCEIA - Universidad Nacional de Rosario - Argentina. Riobamba y Beruti. Rosario (2000). Tel: 0341 – 4808538 [luis.zorzutti@hotmail.com](mailto:luis.zorzutti@hotmail.com)

<sup>3</sup>Laboratorio Vial IMAE-FCEIA - Universidad Nacional de Rosario - Argentina. Riobamba y Beruti. Rosario (2000). Tel: 0341 – 4808538 [sangelon@fceia.unr.edu.ar](mailto:sangelon@fceia.unr.edu.ar)

<sup>4</sup>Laboratorio Vial IMAE-FCEIA - Universidad Nacional de Rosario - Argentina. Riobamba y Beruti. Rosario (2000). Tel: 0341 – 4808538 [fermar@fceia.unr.edu.ar](mailto:fermar@fceia.unr.edu.ar)

## Resumen

Las mezclas templadas con emulsión (MTE) son un tipo de mezcla asfáltica que se constituye en una alternativa sustentable con una tecnología emergente relativamente novedosa con un gran desarrollo en España y en menor medida, en otros países de Europa y América. Las mismas se producen utilizando una combinación de agregados calentados a aproximadamente 120°C y un porcentaje de una emulsión bituminosa a una temperatura de alrededor de 60°C para que la temperatura de mezcla y compactación resulte entre 80 y 90°C. Se ha considerado la utilización de adiciones activas bajo la hipótesis que éstas pueden mejorar las prestaciones mecánicas y reológicas de este tipo de mezclas. En este trabajo se analiza la influencia que ejerce la adición de un reducido porcentaje de cal hidratada o cemento Portland sobre la resistencia y propiedades viscoelásticas de una mezcla templada con emulsión de granulometría semidensa. Comparativamente se ha considerado una mezcla de igual composición granulométrica pero elaborada en caliente con un cemento asfáltico de iguales características al empleado en la emulsión asfáltica. Se presentan los resultados obtenidos para las principales características volumétricas, mecánicas y reológicas de las mezclas consideradas, el análisis de los mismos y las conclusiones resultantes.

**Palabras Clave:** Mezclas templadas, Emulsión asfáltica, Filler activo, Propiedades reológicas

## 1 Introducción

La sustentabilidad se ha convertido en un factor clave a ser considerado en todo proyecto de ingeniería. En el caso de las carreteras ello ha impulsado el desarrollo de distintas tecnologías tales como las que permiten elaborar, distribuir y compactar mezclas asfálticas a menores temperaturas, la utilización de materiales reciclados de la propia carretera o residuos y desechos de la actividad industrial, agrícola o urbana, la reducción en el consumo de materiales vírgenes y la moderación en la emisión de gases de efecto invernadero.

De una manera general, las mezclas asfálticas pueden ser clasificadas según su fabricación y colocación en dos grandes tipos: las mezclas asfálticas en caliente (MAC) y las mezclas asfálticas en frío (MAF).

En las primeras (MAC) se emplean ligantes asfálticos que se calientan a elevadas temperaturas, superiores a los 150°C para ser mezclados con los agregados pétreos y ser colocados en la carretera. Este material presenta un excelente desempeño estructural pero demandan elevados consumos energéticos y producen emisiones de componentes volátiles de los ligantes asfálticos que son perjudiciales para la salud y el medio ambiente.

Las segundas (MAF) emplean principalmente emulsiones asfálticas que permiten fabricar y aplicar las mezclas asfálticas a temperatura ambiente por lo que su producción requiere bajos consumos de energía y muy limitadas emisiones de sustancias perjudiciales con una óptima huella ambiental aunque su desempeño estructural es menor en comparación con las mezclas en caliente.

Con el objeto de mitigar las desventajas de las mezclas en caliente se ha desarrollado una generación de mezclas elaboradas a menores temperaturas denominadas “Mezclas Tibias” (en España, “Mezclas Semicalientes”) que permiten fabricar y colocar mezclas asfálticas a temperaturas entre 30 o 40°C por debajo de las temperaturas habituales de las mezclas en caliente mediante distintas tecnologías se han desarrollado recientemente.

Más recientemente se ha comenzado a desarrollar una generación de mezclas asfálticas elaboradas por debajo de la temperatura de evaporación del agua denominadas “Mezclas Templadas con Emulsión (MTE)” (Half-warm asphalt mixtures en inglés o Enrobes semi-tiedes en francés) en donde el ligante es una emulsión asfáltica. En estas Mezclas Templadas con Emulsión la mezcla de áridos con la emulsión bituminosa se produce a una temperatura de fabricación por debajo de los 100°C. Las mismas han tenido un desarrollo significativo en España y Portugal, donde se utilizaron para capas de base y rodadura.

Para el diseño de estas mezclas no existe un marco normativo por lo que distintas experiencias de aplicación se han llevado a cabo siguiendo distintas metodologías en lo que se refiere a la temperatura de los materiales, métodos de compactación y condiciones de curado.

Miranda Pérez et al. [1] presentan una descripción general sobre las MTE incluyendo las condiciones de fabricación y puesta en obra. El estudio destaca que desarrollo de la MTE se ha realizado siguiendo consignas resultantes de la experiencia práctica y por semejanza a como se procede para las mezclas en caliente y en frío sin que exista una normativa que acredite esas actuaciones.

A ese respecto, la Asociación Técnica de la Emulsión Bituminosa (ATEB) de España ha realizado una recopilación de las experiencias llevadas a cabo con este tipo de mezclas en una monografía redactada con el objeto de ser una guía para el empleo de las MTE [2].

Por otro lado la Agencia de Obras Públicas de la Junta de Andalucía ha desarrollado unas recomendaciones para el empleo de mezclas templadas en lo que respecta a los materiales, plantas de fabricación, control de calidad y puesta en obra [3]. En estas recomendaciones, se considera filler al polvo mineral que procede de los áridos separados de ellos por medio de los ciclones de la planta de fabricación o al polvo mineral de aportación de origen comercial o especialmente preparado para su empleo. En ambos casos se trata de adiciones inactivas cuyo principal objetivo es el de actuar

como llenante en el esqueleto mineral. Sin embargo se reconocen los efectos beneficiosos de algunas adiciones (filleres) activas en las propiedades y desempeño de las mezclas asfálticas.

El término adición activa se utiliza para definir rellenos que alteran químicamente las propiedades de la mezcla e incluyen a la cal, el cemento y las cenizas volantes entre otras. La incorporación de estas adiciones activas es mejorar la adherencia del ligante al árido, mejorar la dispersión del ligante en la mezcla, modificar la plasticidad de los materiales naturales, aumentar la rigidez y la cohesión de la mezcla, acelerar el curado de la mezcla compactada y controlar el tiempo de rotura de la emulsión

Bianchetto et al. [4] han estudiado la influencia de filleres activos en las mezclas asfálticas en caliente en lo que respecta al incremento de la resistencia al envejecimiento del mástico y los consecuentes efectos sobre las propiedades funcionales y mecánicas de las mezclas después de un cierto período de servicio.

Miró et al. [5] han demostrado la influencia beneficiosa de la incorporación de cal sobre las propiedades resistentes a la fisuración de mezclas asfálticas ensayadas mediante el ensayo Barcelona Tracción Directa (BTD).

Halles y Thenoux [6] han estudiado la influencia relativa de rellenos activos sobre las propiedades mecánicas de mezclas recicladas con asfalto espumado. Se estudiaron cuatro rellenos activos: cemento Portland, polvo de horno de cemento, cal hidratada y cenizas volantes habiéndose encontrado que si bien algunos rellenos activos tienen una influencia importante en las propiedades mecánicas, desempeño a largo plazo, mejora en la sensibilidad al agua y aceleración de los procesos de curado de este tipo de mezclas consideradas, otras solo actúan como rellenos minerales de la granulometría.

Hodgkinson y Visser [7] han llevado a cabo un estudio para evaluar el efecto de adiciones inactivas y activas de naturaleza cementicia sobre materiales estabilizados con asfalto espumado y emulsión asfáltica concluyendo que los rellenos inactivos no tenían influencia sobre la resistencia a la tracción indirecta (ITS) en estado seco o saturado pero las adiciones cementicias dieron como resultado un aumento de los valores de ITS tanto para los materiales tratados con la emulsión bituminosa como con el asfalto espumado.

Romeo et al. [8] han llevado a cabo una investigación de laboratorio para evaluar el efecto de las adiciones activas sobre la resistencia al agrietamiento de mezclas compuestas por áridos 100% reciclados, diferentes combinaciones porcentuales de cemento, cal y polvo natural estabilizadas con emulsión bituminosa o asfalto espumado. Los testigos calados de tres tramos experimentales de una carretera en construcción se ensayaron a la tracción indirecta con el procedimiento Superpave Indirect Tensile Test (IDT). Los resultados muestran el beneficio de las adiciones activas sobre la resistencia a la fisuración en términos de mayores tensiones de rotura siendo la combinación más prometedora aquella que consiste en 1% de cemento, 2% de cal y 1,5% de filler natural.

Un estudio de similares características ha sido realizado por Betti et al. [9] para estudiar la evolución con el tiempo del desempeño in situ de diferentes mezclas estabilizadas con asfalto espumado y diferentes adiciones activas (cemento y cal), monitoreadas durante el primer año de servicio. Los resultados obtenidos apoyan positivamente el uso de cal como relleno activo en el material estabilizado con asfalto espumado y permiten subrayar el efecto beneficioso de diferentes rellenos activos en el comportamiento bajo carga del tránsito de todas las mezclas consideradas.

Sufian et al. [10] han evaluado el efecto del cemento Portland como adición activa, el tiempo de curado y el contenido de humedad sobre la resistencia de mezclas tratadas con asfalto espumado y emulsión asfáltica. Las mismas fueron preparadas con diversos contenidos de RAP y agregado pétreo virgen para determinar sus propiedades de resistencia en términos de compresión no confinada (UCS) y resistencia a la tracción indirecta (ITS).

En general estas referencias evalúan los efectos de las adiciones activas sobre las propiedades mecánicas de resistencia a la rotura usando fundamentalmente el ensayo de tracción indirecta o compresión simple aunque son mucho más limitadas las referencias respecto a la valoración de las propiedades viscoelásticas de este tipo de mezclas.

Por ejemplo, Kuchishi et al. [11] han estudiado la influencia de las propiedades viscoelásticas de las mezclas asfálticas recicladas en frío con asfalto espumado o emulsión asfáltica en la respuesta estructural de un pavimento. En este trabajo se realizaron pruebas de módulo dinámico  $|E^*|$  y los resultados obtenidos sugieren un comportamiento viscoelástico para este tipo de mezclas dependiente de la temperatura.

En un trabajo posterior los mismos autores observaron mediante el ensayo triaxial de módulo resiliente que las mezclas con adición de cemento se comportaron de manera similar a los materiales cementados con independencia de la presión de confinamiento, mientras que las de cal hidratada se asemejaron a un material granular dependiente del estado de tensión. Además, los resultados de la prueba de módulo dinámico indicaron que las mezclas asfálticas recicladas en frío también exhiben propiedades viscoelásticas [12].

Godenzoni et al. [13] han caracterizado la respuesta viscoelástica lineal (LVE) de mezclas tratadas con asfalto espumado mediante ensayos de compresión cíclica uniaxial, en un rango de temperaturas y frecuencias. El comportamiento termorreológico fue modelado utilizando el modelo Huet-Sayegh, comúnmente utilizado para mezclas bituminosas. Los resultados obtenidos por estos investigadores están por debajo de los medidos normalmente en mezclas asfálticas pero las variaciones resultantes de la frecuencia y la temperatura destacan claramente un comportamiento típico de las mezclas asfálticas. Además, han mostrado que el principio de superposición tiempo-temperatura puede considerarse válido, de tal manera que es posible caracterizar la respuesta LVE de este tipo de materiales utilizando el mismo enfoque experimental y analítico adoptado para las mezclas asfálticas convencionales.

También Godenzoni et al. [14] en un trabajo posterior pero con similares objetivos han considerado mezclas tratadas con emulsión bituminosa encontrando la clara dependencia de la frecuencia y la temperatura sobre el módulo complejo medido en el laboratorio y la aplicabilidad del principio de superposición tiempo-temperatura para desarrollar curvas maestras isotérmicas.

Leandri et al. [15] han determinado las propiedades viscoelásticas de mezclas recicladas en frío con emulsión bituminosa y mostraron que los parámetros viscoelásticos de estas mezclas exhiben una capacidad satisfactoria para reproducir con precisión la respuesta visco-elástica estructural del pavimento.

En Argentina, Francesio y Scarafia [16] han investigado la influencia de los aglomerantes hidráulicos en la resistencia de mezclas asfálticas elaboradas con emulsión mediante el ensayo Marshall concluyendo que se incrementa la cohesión de

la mezcla y la viscosidad del residuo asfáltico haciendo que la mezcla sea menos susceptible a la acción del agua y la temperatura. Por otra parte, se producen modificaciones que alteran el comportamiento reológico de las mezclas analizadas sin llegar a perder sus características visco-elásticas.

En estos casos se han considerado mezclas con asfalto espumado o emulsión bituminosa aunque no se han encontrado referencias específicas al caso de las mezclas templadas con emulsión bituminosa.

En ese marco, el objetivo de este trabajo es analizar la influencia que ejerce la adición de un reducido porcentaje de cal hidratada o cemento Portland sobre la resistencia y propiedades viscoelásticas de una mezcla templada con emulsión (MTE) de granulometría semidensa. Comparativamente se ha considerado una mezcla de igual composición granulométrica pero elaborada en caliente con un cemento asfáltico de iguales características al empleado en la emulsión asfáltica.

La metodología experimental, los resultados obtenidos y el análisis de los mismos se presentan en las secciones que siguen.

## 2 Caracterización reológica de las mezclas asfálticas

El módulo complejo ( $E^*$ ) es una de las propiedades más utilizadas en las mezclas asfálticas para realizar el análisis de pavimentos y su modelización. Dos componentes del módulo complejo son el Módulo Dinámico ( $|E^*|$ ), que describe la rigidez del material a una temperatura y frecuencia determinada, y el Angulo de Fase ( $\phi$ ), que describe la magnitud relativa del comportamiento viscoso y elástico del material. La determinación de  $|E^*|$  y  $\phi$  en laboratorio se realiza comúnmente para diferentes combinaciones de temperatura y frecuencia.

El ángulo de fase  $\phi$  caracteriza la mayor o menor respuesta elástica del material. Para un material perfectamente elástico,  $\phi$  tiende a cero y por el contrario, para un material perfectamente viscoso ideal  $\phi$  tiende a  $\pi/2$ .

Este módulo dinámico  $|E^*|$ , además de depender de las características de formulación de la mezcla asfáltica, es fuertemente influenciado por la temperatura y la frecuencia. Para tener en cuenta este comportamiento, su variación es modelada matemáticamente y de manera habitual en función de la frecuencia de acuerdo a una Curva Maestra para una dada Temperatura de Referencia ( $T_R$ ) elegida arbitrariamente sobre la base del principio de superposición de frecuencia - temperatura para materiales de comportamiento termo-reológicamente simples.

En estas condiciones, la Curva Maestra puede ser descrita matemáticamente con una función sigmoideal de la forma:

$$\log|E^*| = \log(E_0) + \frac{\log(E_\infty) - \log(E_0)}{1 + e^{(\beta + \gamma \cdot \log f_R)}} \quad (1)$$

para la que  $E_0$  (MPa) es el valor mínimo de  $|E^*|$  para una frecuencia  $f_R$  tendiendo a cero,  $E_\infty$  (MPa) es el valor máximo de  $|E^*|$  para una frecuencia  $f_R$  tendiendo a infinito,  $\gamma$  y  $\beta$  son parámetros adimensionales que describen la forma de la función sigmoideal y su punto de inflexión.

En la construcción de estas curvas maestras, los valores de módulo dinámico obtenidos a múltiples temperaturas se desplazan en el sentido de las frecuencias

mediante la aplicación de un factor de traslación que describe la dependencia de la temperatura del material y se define como:

$$aT = \frac{f_R}{f} \quad (2)$$

donde  $f_R$  es la Frecuencia Reducida (frecuencia de sollicitación a la temperatura de referencia),  $f$  es la frecuencia a la temperatura de ensayo y  $aT$  es el factor de desplazamiento.

En este trabajo se ha adoptado una ecuación del tipo Arrhenius para describir el factor de desplazamiento  $aT$  en función de temperatura de la forma:

$$aT = e^{C_A \left( \frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_R} \right)} \quad (3)$$

donde  $C_A$  es la constante de Arrhenius del material ( $^{\circ}K$ ),  $T_i$  es temperatura de ensayo de interés ( $^{\circ}K$ ) y  $T_R$  es la temperatura de referencia ( $^{\circ}K$ ). Un esquema similar puede ser utilizado para el trazado de curvas maestras de variación del Angulo de fase  $\phi$  en función de la frecuencia para una temperatura de referencia elegida arbitrariamente.

Sin embargo, esta modelización resulta insuficiente para caracterizar el comportamiento Visco-Elástico Lineal de las mezclas asfálticas (VEL) porque no toma en cuenta la relación entre  $|E^*|$  y  $\phi$  como un factor de importancia.

Por ello en este trabajo se ha adoptado complementariamente el Modelo Huet-Sayegh (H-S) el cual es un modelo mecánico en el que el comportamiento real del material visco-elástico es asimilado a un conjunto de elementos mecánicos ideales vinculados en serie o paralelo [17]. El mismo está compuesto por dos resortes ideales vinculados en serie o paralelo [17]. El mismo está compuesto por dos resortes ideales y dos elementos de flujo  $J_1(t)$  y  $J_2(t)$  de respuesta parabólica respecto al tiempo conectados como muestra la Figura 1.

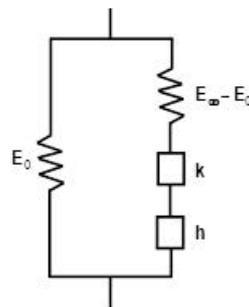


Figura 1. Modelo de Huet-Sayegh (H-S)

Para este modelo, la expresión analítica del módulo complejo correspondiente resulta:

$$E^*(i\omega) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (4)$$

donde  $E_\infty$ , es el módulo instantáneo para tiempos de carga tendiendo a cero,  $E_0$  es el módulo estático que caracteriza la rigidez del sistema mecánico bajo una tensión estática de duración infinita,  $\omega$  es la frecuencia angular de excitación,  $\tau$  es el tiempo característico dependiente de la temperatura,  $h$ ,  $k$ ,  $\delta$  son parámetros de ajuste del modelo e  $i$  es la unidad de los números imaginarios ( $i = (-1)^{1/2}$ ).

A partir de la ecuación (4) que utiliza álgebra compleja, es posible hallar por descomposición las componentes  $E_1$  y  $E_2$  del módulo complejo que resultan:

$$E_1 = E_0 + \frac{E_1'}{\left[ \frac{E_1'}{(E_\infty - E_0)} \right]^2 + \left[ \frac{E_2'}{(E_\infty - E_0)} \right]^2} \quad (5)$$

$$E_2 = -\frac{E_2'}{\left[ \frac{E_1'}{(E_\infty - E_0)} \right]^2 + \left[ \frac{E_2'}{(E_\infty - E_0)} \right]^2} \quad (6)$$

con:

$$E_1' = [E_\infty - E_0] \cdot \left\{ 1 + \left[ \delta(\omega\tau)^{-k} \cdot \cos\left(\frac{k\pi}{2}\right) \right] + \left[ (\omega\tau)^{-h} \cdot \cos\left(\frac{h\pi}{2}\right) \right] \right\} \quad (7)$$

$$E_2' = [E_\infty - E_0] \cdot \left\{ \left[ -\delta(\omega\tau)^{-k} \cdot \text{sen}\left(\frac{k\pi}{2}\right) \right] - \left[ (\omega\tau)^{-h} \cdot \text{sen}\left(\frac{h\pi}{2}\right) \right] \right\} \quad (8)$$

Con los datos experimentales de  $|E^*|$  y  $\phi$  obtenidos a distintas frecuencias y temperaturas y previa descomposición en las componentes  $E_1$  y  $E_2$ , es posible proceder al ajuste del modelo determinando los 6 parámetros  $E_\infty$ ,  $E_0$ ,  $\tau$ ,  $h$ ,  $k$  y  $\delta$ . Luego, el módulo dinámico  $|E^*|$  y el ángulo de fase  $\phi$  resultan:

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (9)$$

$$\phi = \arctan \frac{E_2}{E_1} \quad (10)$$

La variación de  $\tau$  respecto a la temperatura también ha sido considerada con una ecuación del tipo Arrhenius como la empleada anteriormente. Diversos autores han hecho uso del modelo H-S para describir el comportamiento visco-elástico de mezclas asfálticas [18, 19, 20].

Bayane et al. [21] han propuesto que el comportamiento al ahuellamiento y la fisuración por fatiga puede ser caracterizado utilizando el módulo dinámico  $|E^*|$  y el ángulo de fase ( $\phi$ ). El comportamiento frente al ahuellamiento es crítico durante el verano con condiciones de alta temperatura y velocidades de tránsito lento en tanto que para la fisuración por fatiga, el fenómeno es más común a temperaturas de servicio medias o bajas y velocidades de tránsito normales.

Estos autores sugieren una evaluación de la resistencia a la fatiga mediante un parámetro denominado Factor de fatiga  $F_f$  calculado como:

$$F_f = |E^*| \cdot \text{sen}(\phi) \quad (11)$$

y una evaluación del ahuellamiento a través de un parámetro denominado Factor de ahuellamiento  $F_a$  calculado como:

$$F_a = |E^*| / \text{sen}(\phi) \quad (12)$$

Desde el punto de vista de la fatiga es más conveniente que la mezcla tenga una menor rigidez (reducido  $|E^*|$ ) y un comportamiento más elástico (ángulo de fase  $\phi$  reducido) por lo que un Factor de fatiga  $F_f$  más bajo es una indicación de un mejor desempeño. Respecto al ahuellamiento es más conveniente que la mezcla tenga una mayor rigidez (elevado  $|E^*|$ ) y un comportamiento elástico (ángulo de fase  $\phi$  reducido) por lo que un Factor de ahuellamiento  $F_a$  más alto es una indicación de un mejor desempeño.

Bhasin et al. [22] han mostrado que el Factor de ahuellamiento correlaciona relativamente bien con la profundidad de huella y la pendiente de ahuellamiento para 9 mezclas asfálticas de distinta tipología ensayadas mediante el ensayo Asphalt Pavement Analyzer (APA).

Los factores de fatiga  $F_f$  y de ahuellamiento  $F_a$  han sido empleados por Harnaeni et al. [23] para comparar el desempeño de dos alternativas de mezclas asfálticas usadas como carpetas de rodamiento

Finalmente, Shahadan et al. [24] han mostrado la influencia de distintos contenidos de RAP en la formulación de mezclas asfálticas mediante la valoración de los factores  $F_f$  y  $F_a$ .

### 3 Materiales y métodos experimentales

#### 3.1 Mezcla asfáltica templada con emulsión bituminosa (MTE)

Para este estudio se han diseñado dos mezclas templadas con emulsión siguiendo las recomendaciones de la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía [3] para una mezcla del tipo Semidensa (identificada como MBT AC 16) cuya composición de agregados resulta en la curva granulométrica que se muestra en la Figura 2.

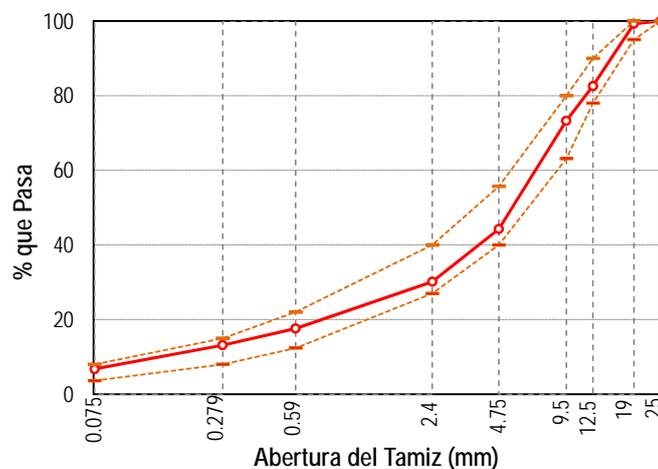


Figura 2. Curva granulométrica de las MTE

Una de estas mezclas, identificada como MTE-Cal, se ha formulado con un 2% en peso de cal hidratada como adición activa en tanto que la otra, denominada MTE-Cem se ha dosificado con un porcentaje igual de cemento Portland normal CP40.

Se ha utilizado una emulsión bituminosa catiónica súper estable que cumple con los requerimientos establecidos en la Norma IRAM Argentina N° 6691 para emulsiones tipo CRS con un residuo asfáltico mínimo del 60%. La emulsión utilizada tiene un residuo asfáltico del 61.1% y para éste, la Penetración a 25°C es de 90 1/10 mm con un Punto de Ablandamiento (Anillo y Bola) de 46.3°C.

Para el moldeo de probetas se ha calentado el conjunto de agregados a una temperatura de 120°C y la emulsión a 60°C de tal manera que el mezclado manual durante no más de 120 segundos y la inmediata compactación de la mezcla se realizaran a una temperatura comprendida entre 80 y 90°C.

Se han compactado probetas del tipo Marshall con 75 golpes por cara y contenidos variables de ligante asfáltico residual entre 4.5 y 6% a las cuales se les determinaron sus parámetros volumétricos y resistencia a la tracción indirecta.

Finalmente, en base a estos resultados obtenidos y atendiendo a las recomendaciones de la Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas (ATEB) referidas al contenido mínimo de ligante residual, se ha adoptado un porcentaje de asfalto residual igual al 5.25% sobre el total de la mezcla.

Adicionalmente y con fines comparativos se ha considerado una mezcla asfáltica en caliente identificada como MAC del tipo concreto asfáltico formulado con agregados graníticos de la misma composición granulométrica que para las MTE. El ligante asfáltico utilizado es el mismo empleado para la elaboración de la emulsión y ha sido dosificado también con un porcentaje de 5.25% respecto a la totalidad de la mezcla. La Tabla 1 resume las principales propiedades volumétricas y mecánicas de estas mezclas. La Resistencia a la Tracción Indirecta (RTI) ha sido determinada a la temperatura de 25°C y con una velocidad de 50.8 mm/minuto. La Deformación Vertical (Dv) corresponde a la deformación diametral vertical al momento de la carga máxima de ensayo.

Tabla 1. Propiedades de las mezclas consideradas

Mezcla	Dm (Kg/dm <sup>3</sup> )	Dtm (Kg/dm <sup>3</sup> )	Vacios (%)	RTI (kN/m <sup>2</sup> )	Dv (mm)
MTE-Cal	2.416	2.543	4.9	8.34	3.9
MTE-Cem	2.433	2.554	4.7	10.40	3.4
MAC	2.432	2.552	4.7	9.25	3.8

Dm: Densidad Marshall / Dtm: Densidad Teórica Máxima

### 3.2 Procedimiento experimental para la determinación de $|E^*|$ y $\phi$

La determinación del módulo dinámico ha sido realizada usando la técnica de tracción indirecta por compresión diametral con cargas sinusoidales (Haversine) utilizando un equipo de ensayos servo-neumático, desarrollado en el Laboratorio Vial de la Universidad de Rosario. El marco de carga está encerrado en una cámara de temperatura con un sistema de control en el rango de 0 a 50°C. Las mediciones del módulo dinámico se llevaron a cabo sobre dos probetas gemelas para 7 frecuencias de sollicitación (f) (5, 4, 2, 1, 0,5, 0,25 y 0,10 Hz) y 5 temperaturas (T) (0, 10, 20, 30 y

40 °C) con el fin de tener una caracterización completa del comportamiento visco-elástico de estas mezclas asfálticas.

#### 4. Resultados obtenidos, análisis y modelización

##### 4.1 Caracterización reológica mediante un modelo sigmoidal

Los resultados experimentales de ambas mezclas han sido considerados para obtener las respectivas curvas maestras de variación de  $|E^*|$  de acuerdo al modelo sigmoidal de la Ecuación (1) a través de un proceso de optimización usando la función Solver de la hoja de cálculo Excel.

Las Figuras 4(a), 5(a) y 6(a) muestran las curvas maestras de variación de  $|E^*|$  en función de la frecuencia para una temperatura de referencia de 20°C para las mezclas MTE-Cal, MTE-Cem y MAC respectivamente.

Las Figura 4(b), 5(b) y 6(b) presentan la variación de  $|E^*|$  en función de la temperatura para una frecuencia de referencia de 10 Hz utilizando el mismo modelo de comportamiento y para las respectivas mezclas asfálticas mencionadas previamente.

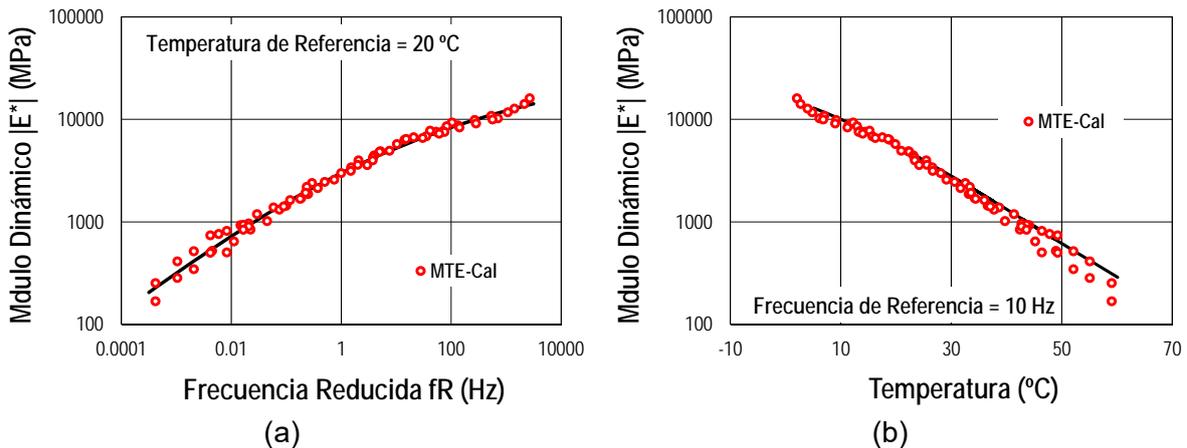


Figura 4. Curvas maestras de  $|E^*|$  para la mezcla MTE-Cal

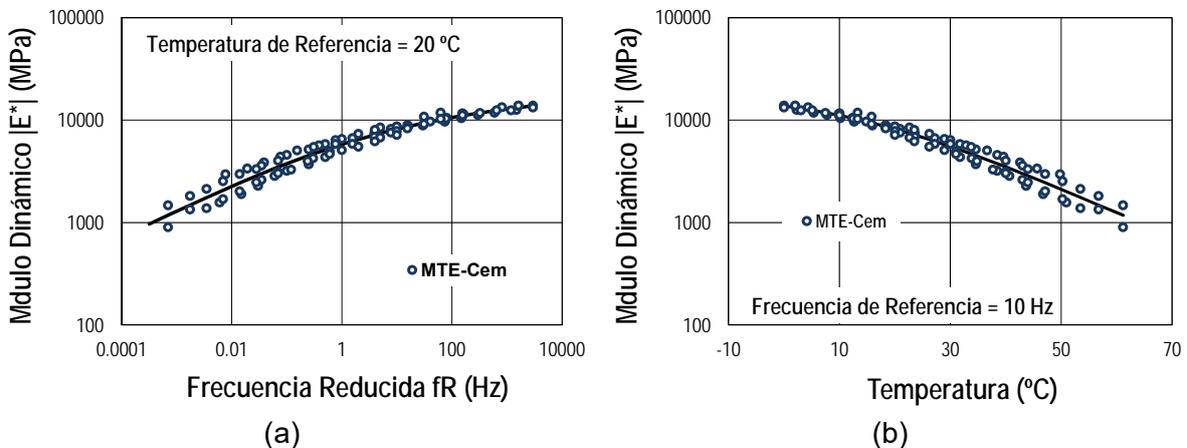


Figura 5. Curvas maestras de  $|E^*|$  para la mezcla MTE-Cem

Las Figuras 7, 8 y 9 presentan las curvas maestras de variación del ángulo de fase  $\phi$  en función de la frecuencia a la temperatura de referencia de 20°C para las tres

mezclas analizadas.

La Figura 10(a) muestra en forma comparativa las curvas maestras de  $|E^*|$  y la Figura 10(b) hace lo propio para las curvas maestras de  $\phi$ , para las tres mezclas asfálticas consideradas y a la temperatura de 20°C.

La Tabla 2 resume los parámetros resultantes para la modelización de las curvas de variación de  $|E^*|$  en función de la frecuencia para las tres mezclas analizadas.

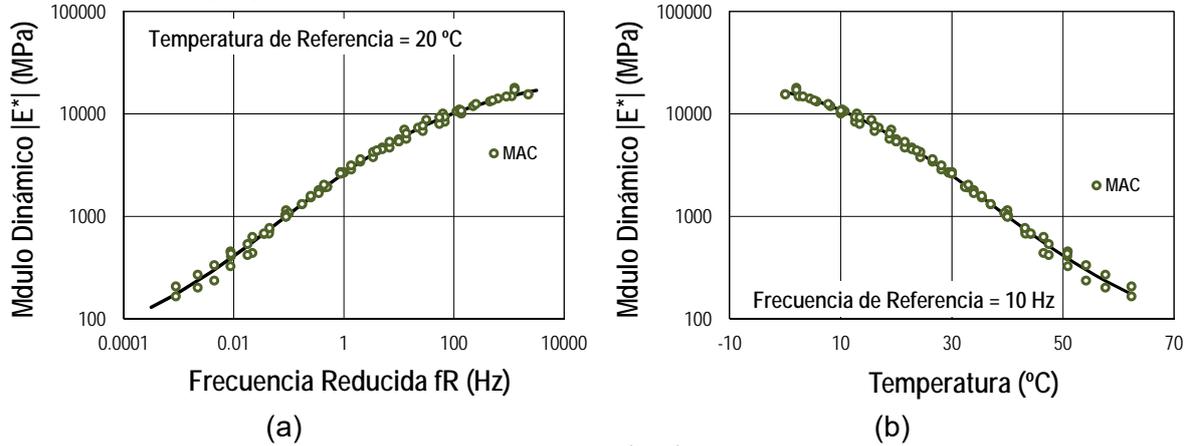


Figura 6. Curvas maestras de  $|E^*|$  para la mezcla MAC

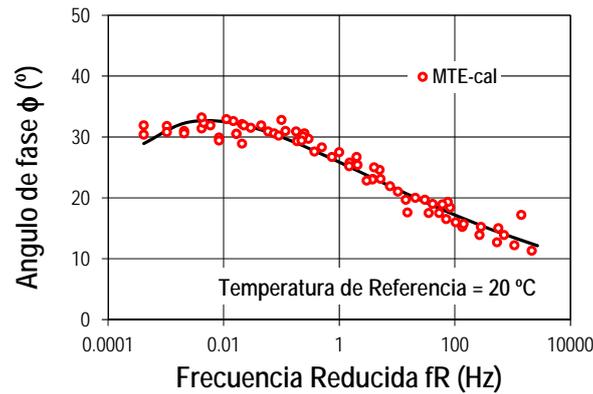


Figura 7. Curva maestra de  $\phi$  para la mezcla MTE-Cal

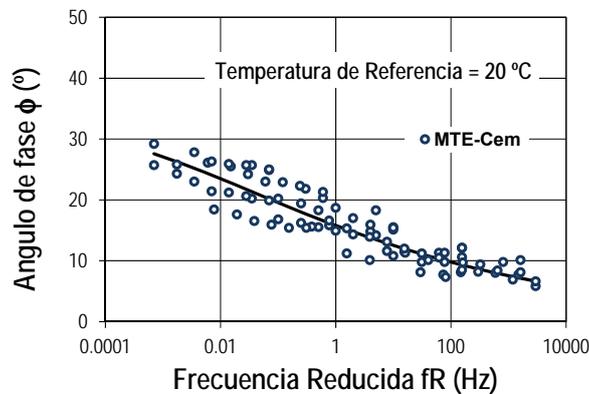


Figura 8. Curva maestra de  $\phi$  para la mezcla MTE-Cem

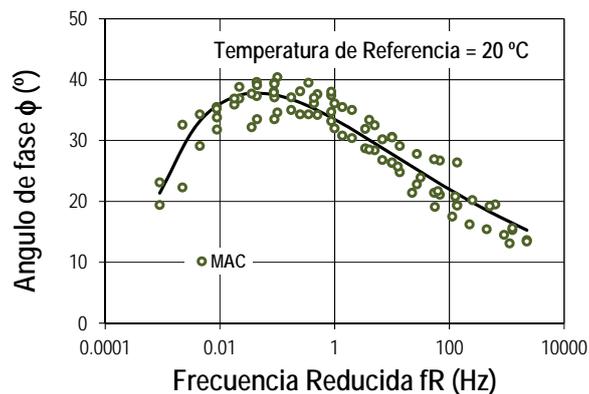


Figura 9. Curva maestra de  $\phi$  para la mezcla MAC

Tabla 2. Parámetros de los modelos reológicos sigmoidales

Mezcla	$E_0$ (MPa)	$E_\infty$ (MPa)	$\gamma$	$\beta$	$C_A$
MTE-Cal	1	41990	-0.30	-1.25	25136
MTE-Cem	68	19742	-0.40	-1.29	22769
MAC	35	25995	-0.58	-0.64	21647

#### 4.2 Caracterización reológica mediante el modelo Huet-Sayegh

Al igual que para el modelo sigmoidal, se han ajustado los parámetros que definen el modelo H-S utilizando la función Solver de la hoja de cálculo Excel mediante un proceso de optimización por mínimos cuadrados de las diferencias entre valores medidos y resultantes del modelo.

Las Figuras 10(a), 11(a) y 12(a) muestran la variación del ángulo de fase  $\phi$  en función de  $|E^*|$  en el llamado Diagrama de Black en forma comparativa entre los valores experimentales y los del modelo ajustado para las mezclas MTE-Cal, MTE-Cem y MAC respectivamente.

Las Figuras 10(b), 11(b) y 12(b) muestran la variación de la componente viscosa  $E_2$  en función de la componente elástica  $E_1$  de  $|E^*|$  mediante el denominado Diagrama Cole-Cole en las que también, se comparan valores experimentales y del modelo para las tres mezclas analizadas.

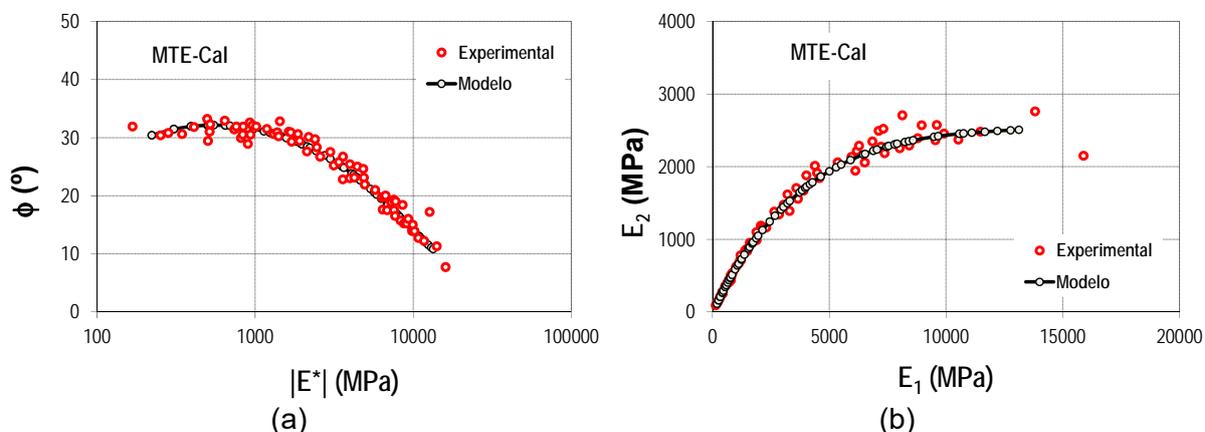


Figura 10. Resultados del modelo H-S para la mezcla MTE-Cal

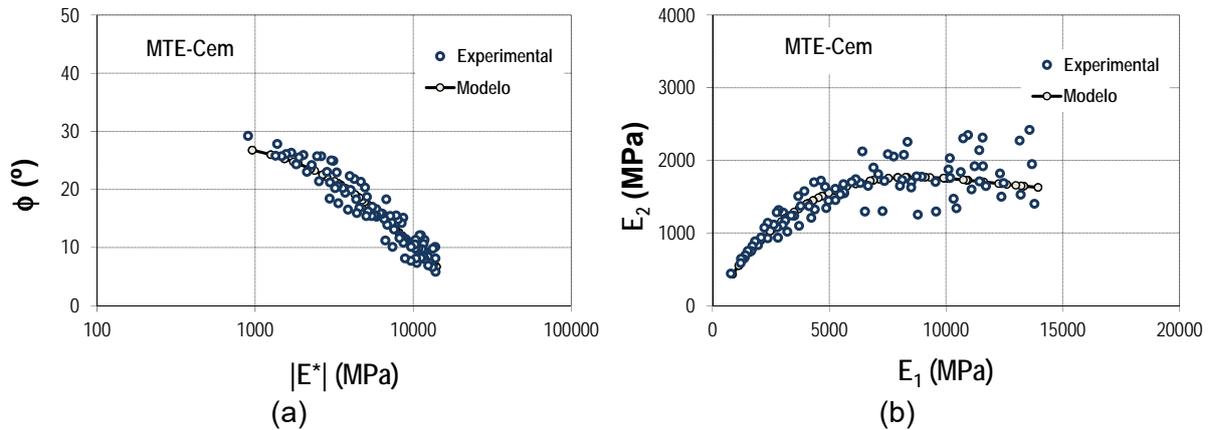


Figura 11. Resultados del modelo H-S para la mezcla MTE-Cem

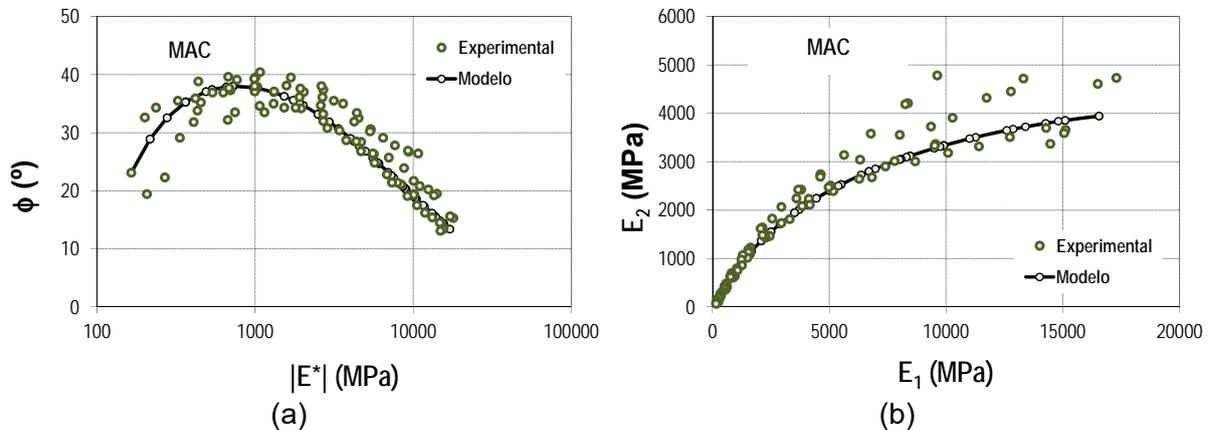


Figura 12. Resultados del modelo H-S para la mezcla MAC

La Tabla 3 presenta los valores de los parámetros que definen los respectivos modelos H-S de las tres mezclas analizadas.

Tabla 3. Parámetros del modelo H-S para las mezclas analizadas

Mezcla	$E_{\infty}$ (MPa)	$E_0$ (MPa)	$\delta$	k	h	$C_A$ (°K)	$\tau_0$ (s)
MTE-Cal	118168	35	6.61	0.09	0.41	24014	$5.378 \cdot 10^{-5}$
MTE-Cem	143923	9	8.63	0.06	0.34	21893	$9.574 \cdot 10^{-5}$
MAC	46439	94	3.66	0.21	0.56	21693	$2.899 \cdot 10^{-3}$

### 4.3 Análisis de resultados

La Figura 13(a) muestra las curvas maestras de variación de  $|E^*|$  y la Figura 13(b), la curva maestra de variación de  $\phi$ , ambas en función de la frecuencia y en forma comparativa para las tres mezclas asfálticas consideradas.

Se observa que en los tres casos, las curvas maestras muestran un trazado continuo indicando la validez del principio de superposición (equivalencia) frecuencia-temperatura propio de los materiales que presentan un comportamiento termo reológico simple en viscoelasticidad lineal.

A elevadas frecuencias, o de manera equivalente a bajas temperaturas, las tres mezclas tienden a valores del mismo orden en tanto que a bajas frecuencias, o alta temperatura, la mezcla templada con cemento MTE-Cem muestra un comportamiento marcadamente diferente con menor susceptibilidad térmica y módulos dinámicos que

son aproximadamente 10 veces más elevados. En esa condición y sin tanta diferencia, la MTE-Cal también presenta mayores de  $|E^*|$  que la mezcla en caliente MAC.

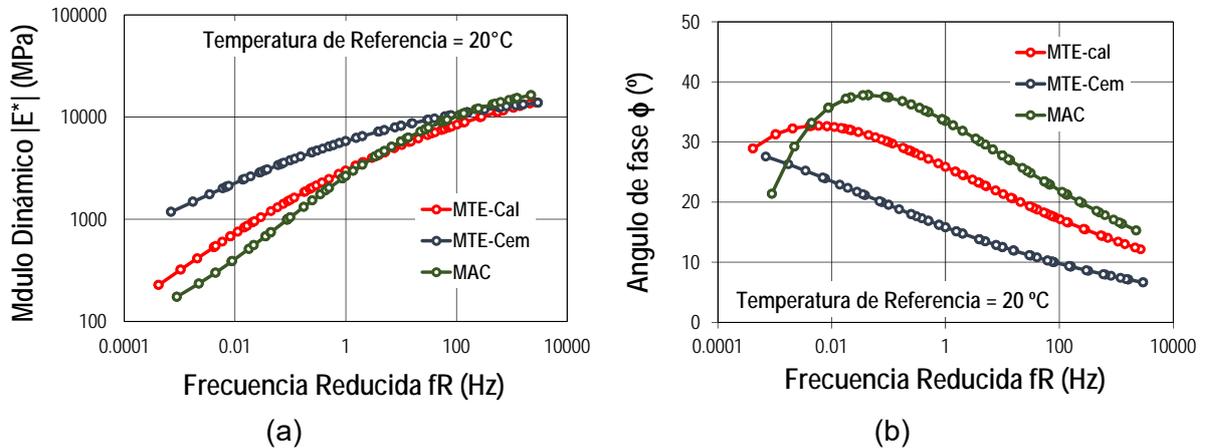


Figura 13. Curvas maestras comparadas

Respecto al ángulo de fase, la MTE-Cem presenta menores valores de  $\phi$  en todo el rango de frecuencias indicando un mayor comportamiento elástico que las otras dos mezclas y con un trazado notablemente diferente. La MTE-Cal y la MAC incrementan el ángulo de fase a medida que disminuye la frecuencia hasta un valor máximo para luego comenzar a disminuir mientras que la MTE-Cem la variación es siempre creciente. Comparando la MTE-Cal con la MAC, la mezcla templada presenta un comportamiento más elástico con menores valores de  $\phi$  en todo el rango de frecuencias considerado en este estudio. Resulta entonces que estas adiciones activas influyen el comportamiento de las mezclas analizadas sin que estas pierdan el carácter de materiales viscoelásticos.

La Figura 14(a) muestra el diagrama de Black mientras que la Figura 14(b), el diagrama Cole-Cole de los modelos H-S resultantes en forma comparativa para las tres mezclas asfálticas consideradas.

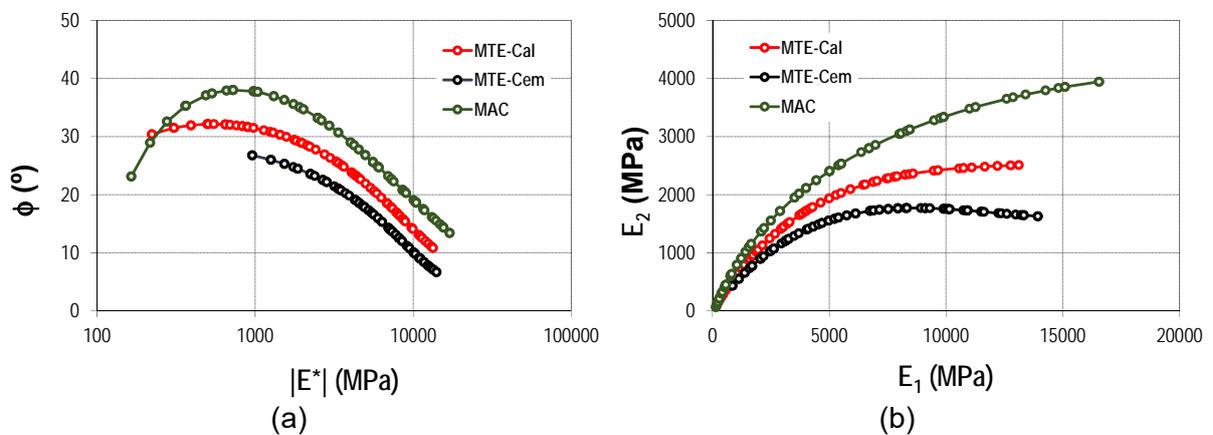


Figura 14. Curvas maestras comparadas

Del diagrama de Black resulta que la mezcla MAC presenta los mayores ángulos de fase lo que indica una mayor dependencia de la temperatura en tanto que la MTE-Cem, con los menores valores de  $\phi$ , sugiere una menor susceptibilidad térmica de esta mezcla. Del diagrama Cole-Cole, para un dado valor de la componente elástica  $E_1$ , la mezcla MTE-Cem es la que presenta menor componente viscosa  $E_2$  en tanto que la mezcla MTE-Cal se ubica por debajo de la curva resultante de la MAC. Sin embargo, la forma de estas curvas indica que las mismas continúan presentando un comportamiento viscoelástico dependiente de la temperatura y la frecuencia de sollicitación.

#### 4.4 Factores de fatiga y ahuellamiento

Se han calculado los factores de fatiga y ahuellamiento para las tres mezclas analizadas considerando las condiciones críticas para cada uno de estos modos de falla.

Para la falla por fatiga, la condición crítica corresponde al rango de temperaturas medias a bajas y a la velocidad normal de circulación de los vehículos por lo que el Factor de fatiga  $F_f$  de la ecuación (11) se ha calculado a partir de los resultados experimentales promedios a 10°C y 5 Hz.

Para el caso del ahuellamiento, la condición crítica corresponde a las temperaturas altas y a una baja velocidad de circulación de los vehículos pesados (bajas frecuencias) por lo que el Factor de ahuellamiento  $F_a$  de la ecuación (12) se ha calculado a partir de los resultados experimentales promedios a 40°C y 1 Hz.

La Figura 15(a) y (b) muestra los factores de fatiga y ahuellamiento de las 3 mezclas asfálticas analizadas.

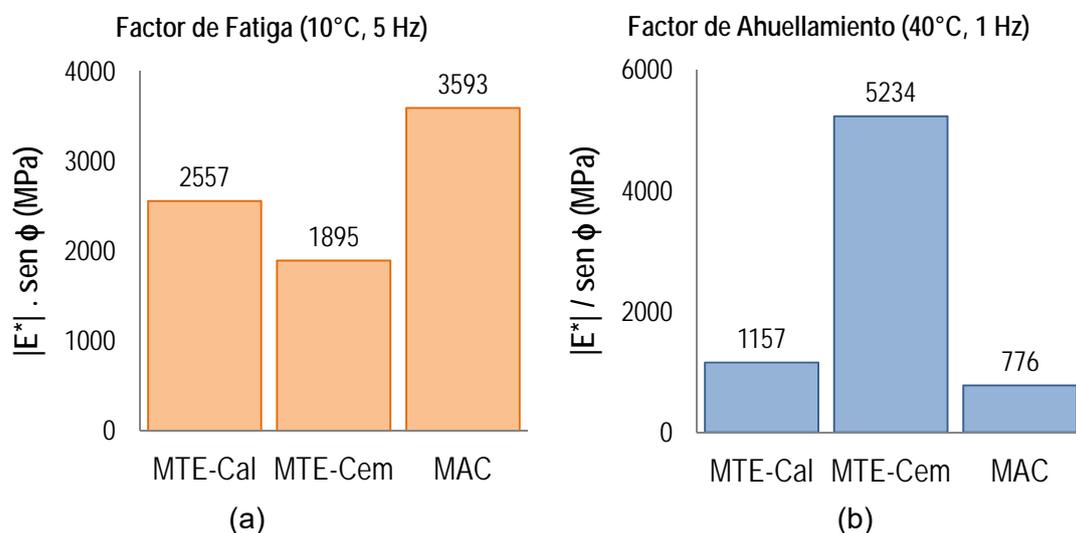


Figura 15. Factores de fatiga y ahuellamiento de las 3 mezclas

Para la fatiga, el mejor desempeño correspondería a la mezcla MTE-Cem con el menor valor de  $F_f$  pues a pesar de tener el mayor valor de  $|E^*|$  presenta el mayor comportamiento elástico con los menores valores de  $\phi$ . La mezcla MTE-Cal muestra un comportamiento algo más desfavorable siendo la peor situación la de la mezcla en caliente MAC.

Para la falla por ahuellamiento, el mayor factor  $F_a$  también corresponde a la mezcla MTE-Cem debido a su mayor módulo dinámico  $|E^*|$  y mayor comportamiento elástico con menores valores de  $\phi$ . Finalmente para la mezcla MTE-Cal se observa un comportamiento al ahuellamiento algo mejor que el que corresponde a la mezcla MAC.

## 5. Conclusiones

Se ha estudiado la influencia que dos adiciones activas ejercen sobre las propiedades reológicas de las mezclas templadas con emulsión asfáltica: con cal hidratada la mezcla MTE-Cal y con cemento Portland la mezcla MTE-Cem. Estas propiedades se han comparado con las de una mezcla asfáltica en caliente (MAC) elaborada con el mismo ligante que el residuo de la emulsión.

Se han considerado un modelo sigmoideal para caracterizar la variación del módulo dinámico  $|E^*|$  respecto a la frecuencia y la temperatura así como el modelo de Huet-Sayegh (H-S) para describir el comportamiento reológico dependiente de ese módulo dinámico y el ángulo de fase  $\phi$ .

Para las tres mezclas asfálticas analizadas, las curvas maestras de  $|E^*|$  muestran un trazado continuo indicando la validez del principio de superposición (equivalencia) frecuencia-temperatura propio de los materiales que presentan un comportamiento termo reológico simple en viscoelasticidad lineal.

A elevadas frecuencias, las tres mezclas tienden a valores del mismo orden en tanto que a bajas frecuencias la mezcla templada con cemento MTE-Cem presenta módulos dinámicos más elevados y menor susceptibilidad térmica. Sin tanta diferencia, la MTE-Cal también presenta mayores de  $|E^*|$  que la mezcla en caliente MAC.

Para el ángulo de fase  $\phi$ , la MTE-Cem presenta menores valores en todo el rango de frecuencias indicando un mayor comportamiento elástico que las otras dos mezclas.

Los resultados del modelo H-S muestran que las tres mezclas presentan un carácter viscoelástico dependiente de la temperatura y la frecuencia típico de las mezclas elaboradas con ligantes asfálticos como factor preponderante de comportamiento.

Respecto a la estimación de las propiedades de falla de las mezclas, para la fatiga el mejor desempeño correspondería a la mezcla MTE-Cem con el menor valor de  $F_f$  en tanto que la mezcla MTE-Cal muestra un comportamiento algo más desfavorable siendo la peor situación la de la mezcla en caliente MAC. Para la falla por ahuellamiento, el mayor factor  $F_a$  también corresponde a la mezcla MTE-Cem mientras que la mezcla MTE-Cal presenta un comportamiento algo mejor que la MAC.

## 6. Referencias bibliográficas

[1] Miranda Pérez, L., García Santiago, J. L., Uguet, N., Andaluz, D., Colás Victoria, M. del M., Lucas, F. J. & Gil, S. "Mezclas templadas con emulsión bituminosa". Revista Carreteras Número Extraordinario, 4<sup>a</sup>. Época. Asociación Española de la Carretera (AEC), pp. 30-36, 2013.

[2] Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas (ATEB). "Mezclas templadas con emulsión bituminosa". Monografía. 2014.

- [3] Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía. "Recomendaciones para la redacción de: pliegos de especificaciones técnicas para el uso de mezclas bituminosas a bajas temperaturas". 2012.
- [4] Bianchetto, H., Martínez Reguero, A., Miró Recasens, R., Pérez Jiménez, F. y Amorós Parras, J. "Efecto de los filleres activos en la resistencia al envejecimiento de las mezclas asfálticas mediante el uso del ensayo fénix". XX° Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto. Guadalajara, México, 2019.
- [5] Miró Recasens, R., Martínez Reguero, A. & Bianchetto, H., "Effect of filler on the aging potential of asphalt mixtures". Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board. DOI: 10.3141/1901-02, 2005.
- [6] Halles, F. & Thenoux, G. "Degree of influence of active fillers on the properties of recycled mixes with foamed asphalt". Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board. DOI: 10.3141/2095-13, 2009.
- [7] Hodgkinson, A & Visser, A. T. "The role of fillers and cementitious binders when recycling with foamed bitumen or bitumen emulsion". Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04). ISBN Number: 1-920-01718-6. 2004.
- [8] Romeo, E., Betti, G., Marradi, A. & Tebaldi, G. "Effect of active fillers on cracking performance of bitumen-stabilised materials". Road Materials and Pavement Design. DOI 10.1080/14680629.2017.1325773, 2017.
- [9] Betti, G., Airey, G., Jenkins, K., Marradi, A. & Tebaldi, G. "Active fillers' effect on in situ performances of foam bitumen recycled mixtures". Road Materials and Pavement Design, 18:2, 281-296. DOI: 10.1080/14680629.2016.1213486. 2017.
- [10] Sufian, Z., Aziz, N., Matori, M., Hussain, M., Hainin, M. & Oluwasola, E. "Influence of active filler, curing time and moisture content on the strength properties of emulsion and foamed bitumen stabilized mix". Jurnal Teknologi, 70 (4). pp. 135-141. ISSN 0127-9696. 2014.
- [11] Kuchiishi, K., Vasconcelos, K. & Bernucci, L. "Influence of viscoelastic properties of cold recycled asphalt mixtures on pavement response". Proceedings of the International Society for Asphalt Pavements Conference. Fortaleza, Ceará, Brazil, 2018.
- [12] Kuchiishi, K., Vasconcelos, K. & Bernucci, L. "Effect of mixture composition on the mechanical behaviour of cold recycled asphalt mixtures". International Journal of Pavement Engineering. DOI: 10.1080/10298436.2019.1655564. 2019.
- [13] Godenzoni, C., Graziani, A. & Perraton, D. "Complex modulus characterisation of cold recycled mixtures with foamed bitumen and different contents of reclaimed asphalt". Road Materials and Pavement Design. DOI: 10.1080/14680629.2016.1142467. 2016.
- [14] Godenzoni, C., Graziani, A., Bocci, E & Bocci, M. "The evolution of the mechanical behaviour of cold recycled mixtures stabilised with cement and bitumen: field and laboratory study". DOI: 10.1080/14680629.2017.1279073. 2017.
- [15] Leandri, P., Losa, M. & Di Natale, A. "Field validation of recycled cold mixes viscoelastic properties". Construction and Building Materials. Volume 75, 30, 275:282. 2015.
- [16] Francesio, C. y Scarafía, M. "Los aglomerantes hidráulicos en las mezclas asfálticas con emulsión". Revista Carreteras. Año XXXIII, N° 129. 1988.
- [17] Sayegh, G. "Viscoelastic properties of bituminous mixtures". Proc. Second International Conferences on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, USA. 1967.
- [18] Yusoff, N. I., Shaw, M. T & Airey, G. "Modelling the linear viscoelastic rheological properties of bituminous binders". Construction and Building Materials 25, pp. 2171–2189.2011.
- [19] Olard, F. "Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures. Relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé". These. Ecole Doctorale des Sciences pour l'ingénieur de Lyon, France. 2003.
- [20] Cauhapé Casaux, M., Angelone, S. & Martínez, F. "Evaluación del comportamiento visco elástico de mezclas asfálticas mediante modelos mecánicos". XIX CILA. Medellín, Colombia. 2017.

- [21] Bayane, B. Yang, E. & Yanjun, Q. "Dynamic modulus master curve construction using Christensen-Anderson-Marasteanu (CAM) model". *Int. Journal of Engineering Research and Application*. ISSN: 2248-9622, Vol. 7, Issue 1, (Part -5), 53:63. 2017.
- [22] Bhasin, A., Button, J. & Chowdhury, A. "Evaluation of simple performance tests on hot-mix asphalt mixtures from South Central United States". *Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board*, No. 1891, 174:181. Washington, D.C. 2004.
- [23] Harnaeni, S., Pramesti, F., Budiarto, A., Setyawan, A., Khan, M. & Sutanto, M. "Study on structural performance of asphalt concrete and hot rolled sheet through viscoelastic characterization". *Materials* 13(5):1133. DOI: 10.3390/ma13051133. 2020.
- [24] Shahadan, Z., Hamzah, M., Yahya, A. & Jamshidi, A. "Evaluation of the dynamic modulus of asphalt mixture incorporating reclaimed asphalt pavement". *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. Vol. 20, 376:384. 2013.