

DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES VISCO-ELASTICAS DE UNA MEZCLA TEMPLADA CON EMULSION ASFALTICA

Fernando Martínez¹, Marina C. Casaux², Luis Zorzutti³ y Silvia Angelone⁴

¹Laboratorio Vial, Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Fac. de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina, fermar@fceia.unr.edu.ar

²Laboratorio Vial, Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Fac. de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina, marina_cc02@yahoo.com.ar

³Laboratorio Vial, Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Fac. de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina, luis.zorzutti@hotmail.com

⁴Laboratorio Vial, Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Fac. de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina, sangelon@fceia.unr.edu.ar

Resumen

Las mezclas templadas con emulsión asfáltica (MTE) son parte de una tecnología emergente relativamente nueva, rentable y respetuosa con el medio ambiente. Por definición, las mismas se producen utilizando una combinación de agregados calentados a aproximadamente 120°C y un porcentaje de una emulsión bituminosa calentada a una temperatura de alrededor de 60°C para que la temperatura de mezcla y compactación resulte entre 80 y 90 ° C. Este tipo de mezclas asfálticas ha tenido un desarrollo significativo en España y Portugal, donde se utilizaron para capas de base y rodamiento. Aunque hay recomendaciones para la formulación de este tipo de mezclas y muchas referencias a sus propiedades mecánicas convencionales, existe una falta de información con respecto a sus propiedades visco-elásticas. Este trabajo presenta los primeros resultados de un proyecto de investigación en curso sobre el diseño y el desempeño de mezclas templadas con emulsión asfáltica. Se han determinado el Módulo Dinámico (E^*) y el Ángulo de Fase (ϕ) a diferentes temperaturas y frecuencias de carga bajo condiciones de carga sinusoidal continua con el objetivo de producir datos experimentales que puedan ser utilizados como insumos en los procedimientos de diseño de pavimentos basados en principios mecanísticos. Se presentan las principales características volumétricas y mecánicas de la mezcla considerada en este trabajo así como los resultados obtenidos del módulo dinámico y el ángulo de fase.

Palabras Clave: Mezclas Templadas, Emulsión Asfáltica, Módulo Dinámico, Visco-elasticidad

1 Introducción

Los requerimientos de sustentabilidad que se imponen actualmente en la construcción, mantenimiento y rehabilitación de caminos hacen necesario reutilizar materiales, reducir la generación de residuos, minimizar el empleo de materiales vírgenes, reducir las demandas energéticas y moderar las emisiones 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 cementos asfálticos que se calientan a elevadas temperaturas, superiores a los 150 °C de manera de reducir su consistencia y ser mezclados con los agregados pétreos para ser luego colocados en la carretera. Este tipo de material, empleado mayoritariamente en la construcción y mantenimiento de los pavimentos flexibles, presenta un excelente desempeño estructural pero son demandantes de elevados consumos energéticos para alcanzar las altas temperaturas requeridas para su fabricación a las cuales además, se producen emisiones de componentes volátiles de los ligantes asfálticos que son perjudiciales para la salud y el medio ambiente.

Las segundas (MAF) emplean ligantes asfálticos con viscosidad reducida tales como las emulsiones asfálticas que permiten fabricar y aplicar las mezclas asfálticas a temperatura ambiente por lo que este tipo de mezcla no requiere ni el calentamiento de los agregados pétreos ni del ligante asfáltico. Se trata de un material que demanda bajos consumos de energía, con muy limitadas emisiones de sustancias perjudiciales y una óptima huella ambiental pero por el contrario, pero su desempeño estructural es menos eficiente cuando se lo compara con el de las mezclas en caliente, especialmente a corto y medio plazo, lo que ha limitado su empleo en carreteras con tránsitos medios y bajos o en rutas de países en desarrollo como primera alternativa de pavimentación de las mismas.

Con el objeto de mitigar las desventajas energéticas y de emisión de sustancias volátiles y humos perjudiciales de las mezclas asfálticas en caliente pero con iguales prestaciones mecánicas que éstas, se ha desarrollado una generación de mezclas elaboradas a menores temperaturas denominadas “Mezclas Tibias” 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. En ese sentido, distintas tecnologías se han desarrollado recientemente y que involucran el uso de aditivos orgánicos o químicos y procesos de espumación a base de agua o que contienen agua. Aunque estas tecnologías son diferentes, todas tienen el objetivo de producir una menor viscosidad del asfalto, una mejor trabajabilidad de la mezcla y menores emisiones perjudiciales [1].

Este tipo de mezcla cuenta con un muy importante grado de desarrollo y en Argentina se presentan especificaciones que regulan su diseño y uso. Las ventajas de trabajar a menores temperaturas respecto a los consumos energéticos e impacto medioambiental son importantes pero dada la necesidad de alcanzar todavía temperaturas para producir el secado de los agregados, por encima de la de evaporación del agua, la reducción en los consumos de energía no son tan significativos.

Buscando optimizar este aspecto, 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 con un proceso que permite obtener condiciones de puesta en obra y prestaciones adecuadas para el uso previsto en función del tipo de tránsito y el clima. Las mismas han tenido un desarrollo significativo en España y Portugal, donde se utilizaron para capas de base y rodamiento.

López et al. [2] realizan un estudio comparativo de una MTE elaborada con una emulsión catiónica súper estabilizada respecto a una mezcla en caliente convencional con probetas compactadas usando el procedimiento Marshall por impacto y mediante la compactación giratoria. Se concluye que el uso de compactador por impacto no permite alcanzar las propiedades volumétricas que se alcanzan con una mezcla en caliente pero la densificación de estas mezclas por medio del compactador giratorio sí resulta en una densificación similar. También destacan que las propiedades mecánicas de la MTE evaluada resultan menores que las de la mezcla en caliente de comparación.

Singh et al. [3] realizaron un estudio experimental comparando las propiedades mecánicas de mezclas MTE respecto a su equivalente de mezcla asfáltica en frío. El estudio experimental comprendió dos tipologías de mezclas diferentes (densa y semidensa) y se utilizaron probetas Marshall compactadas con 75 golpes por cara. El estudio concluye que las mezclas templadas con emulsión para ambas tipologías consideradas presentan mayores estabilidades y resistencias a la tracción indirecta respecto a sus equivalentes elaboradas en frío.

Dinis Almeida et al. [4] presentan un caso de estudio en Portugal para el mantenimiento de una ruta en servicio con una MTE. Se prepararon muestras de laboratorio para los ensayos Marshall e inmersión-compresión con diferentes contenido de emulsión, diferentes temperaturas de compactación y mezclado y distintos procedimientos de curado. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos utilizando el método de diseño de mezcla Marshall y su comparación con las pruebas de inmersión-compresión utilizadas para la formulación de mezclas en frío con emulsión, se concluye que la metodología Marshall usada para las mezclas en caliente convencionales parece ser más adecuado para el diseño de mezclas MTE adaptando las temperaturas de mezclado y compactación así como el procedimiento de curado posterior.

García Santiago y Lucas Ochoa [5] presentan la aplicación de MTE con reutilización de RAP con tasas alta y total. En este trabajo se propone una metodología específica de diseño en laboratorio de mezclas recicladas templadas a tasa total (reutilizando el 100% del RAP) y tasa alta (con el 50% o más de RAP) en razón que los métodos tradicionales no responden adecuadamente a su diseño debido a las características particulares de este tipo de mezclas. La utilización de estas mezclas como capas de base en tramos experimentales mostró un muy buen comportamiento, sin indicio de deformaciones u otra patología luego de dos años en servicio.

García Prieto et al. [6, 7] han llevado a cabo la fabricación y puesta en obra de un reciclado templado con emulsión bituminosa y una mezcla drenante templada con emulsión bituminosa. En ambos casos se presenta la metodología para definir la fórmula de trabajo así como el proceso de fabricación y colocación destacándose que la ejecución y puesta en obra de estas mezclas bituminosas a bajas temperaturas es factible pudiéndose obtener resultados plenamente satisfactorios.

En Argentina, una experiencia de aplicación de una MTE fue presentada por Colombo et al. [8]. En la misma se diseñó una mezcla drenante templada con emulsión utilizando el ensayo Cántabro para definir el contenido óptimo de emulsión de una manera análoga a como se procede en el caso de las mezclas drenantes en caliente.

Lizárraga et al. [9] han presentado el diseño y aplicación de mezclas asfálticas templadas con 100% de material reciclado. Se evaluó el comportamiento relativo de estas mezclas respecto a una mezcla en caliente equivalente con probetas compactadas con el compactador giratorio ajustado de manera de obtener contenidos de vacíos comprendidos entre el 4 y el 6% para todos los casos. Se realizaron ensayos para determinar la rigidez a 20 °C, la sensibilidad al agua y la resistencia a las deformaciones permanentes concluyéndose que las mezclas templadas presentan un comportamiento bastante similar al de las mezclas en caliente de comparación.

Un estudio de similares características fue llevado a cabo por Swaroopa et al. [10] comparando propiedades mecánicas de una mezcla en frío, una mezcla templada con emulsión y una mezcla intermedia a estas dos, en la cual los agregados han sido calentados a sólo 70°C. Se concluye que tanto esta mezcla intermedia como la templada con emulsión presentan mejores propiedades mecánicas que la mezcla en frío de comparación.

Dado que no existe un marco normativo para el diseño de las MTE, estos estudios considerados 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. [11] presentan una descripción general sobre las MTE incluyendo las condiciones de fabricación y puesta en obra. El estudio muestra que las mismas pueden presentar prestaciones semejantes a las de las mezclas en caliente, proveer un aumento de la distancia de transporte y mejorar las condiciones de trabajo del personal que ejecuta las obras. Además destacan que el 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 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 [12]. 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 [13].

Estos estudios muestran que las mezclas templadas con emulsión pueden ser utilizadas en la construcción de pavimentos con un comportamiento similar al de otras mezclas asfálticas utilizadas convencionalmente aunque no se han encontrado referencias respecto a su comportamiento reológico.

En ese contexto, el objetivo de este trabajo es determinar las propiedades visco-elásticas lineales de una mezcla templada con emulsión bituminosa para distintas condiciones de temperaturas y frecuencias de sollicitación de manera de posibilitar su aplicación en metodologías de diseño de estructuras de pavimentos basadas en principios mecánicos. Se presenta una descripción de los procedimientos y materiales utilizados, los resultados obtenidos, un análisis comparativo de los mismos y las conclusiones alcanzadas.

2 Respuesta visco-elástica de las mezclas asfálticas

Si una mezcla asfáltica es sometida a la acción uniaxial de una tensión de variación sinusoidal de la forma

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (1)$$

en condiciones estacionarias ésta responde con una deformación también sinusoidal pero desfasada en el tiempo

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \text{sen}(\omega t - \phi) \quad (2)$$

donde $\sigma(t)$ es la tensión aplicada dependiente del tiempo t , σ_0 es la amplitud de la tensión aplicada, $\varepsilon(t)$ es la deformación resultante dependiente del tiempo t , ε_0 es la amplitud de la deformación resultante, ω es la frecuencia angular (radianes/segundo) y ϕ es el ángulo de fase (en radianes).

En estas condiciones, el módulo dinámico $|E^*|$ (o módulo del módulo complejo E^*) es definido como:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (3)$$

Es posible definir dos parámetros E_1 y E_2 denominados módulo de almacenamiento (*storage modulus*) y módulo de pérdida (*loss modulus*) respectivamente como:

$$E_1 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos(\phi) \quad (4)$$

$$E_2 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \text{sen}(\phi) \quad (5)$$

resultando:

$$\tan(\phi) = \frac{E_2}{E_1} \quad (6)$$

De una manera simple, el parámetro E_1 puede ser interpretado como la componente elástica y E_2 la componente viscosa del módulo dinámico. El ángulo de fase ϕ caracteriza la mayor o menor respuesta elástica del material. Si ϕ es igual a cero ($E_2 = 0$), las tensiones y deformaciones están en fase tal como ocurre en los materiales perfectamente elásticos. Por el contrario, si ϕ es igual a $\pi/2$ ($E_1 = 0$), las tensiones y deformaciones están absolutamente fuera de fase como ocurre en un material perfectamente viscoso ideal.

El módulo dinámico $|E^*|$ es la propiedad de mayor interés de las mezclas asfálticas y utilizado en métodos de cálculo de tensiones y deformaciones en sistemas de capas elásticas estratificadas tales como en la Guía de Diseño Empírico Mecánico de Pavimentos (MEPDG por su designación en inglés *Mechanical Empirical Pavement Design Guide*) [14].

Este módulo dinámico, 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, la variación del módulo dinámico es modelada matemáticamente y de manera habitual en función de la frecuencia de acuerdo a una Curva Maestra para una dada Temperatura de Referencia (TR) 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 descripta matemáticamente con una función sigmoideal de la forma:

$$\log|E^*| = \log(E_0) + \frac{\log(E_\infty) - \log(E_0)}{1 + e^{(\beta + \gamma \cdot \log f_R)}} \quad (7)$$

para la que E_0 es el valor mínimo de $|E^*|$ para una frecuencia f_R tendiendo a cero, E_∞ es el valor máximo de $|E^*|$ para una frecuencia f_R tendiendo a infinito, γ y β son parámetros 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:

$$aT = \frac{f_R}{f} \quad (8)$$

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 primera instancia 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:

$$aT = e^{C_A \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_R} \right)} \quad (9)$$

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 ($^{\circ}K$).

El mismo modelo puede ser empleado de manera equivalente para el trazado de curvas maestras que muestren la variación de $|E^*|$ en función de la temperatura para una frecuencia de referencia seleccionada arbitrariamente.

Sin embargo, esta modelización resulta insuficiente para caracterizar el comportamiento Visco-Elástico Lineal de las mezclas asfálticas (VEL) porque no toma en cuenta el desfase que se observa entre las tensiones aplicadas y las deformaciones resultantes en este tipo de materiales 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 [15]. 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.

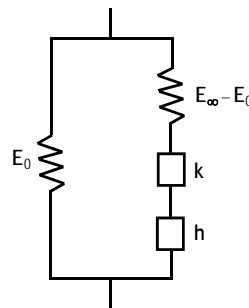


Figura 1. Modelo de Huet-Sayegh (H-S)

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

$$E^*(i\omega) = E_0 + \frac{E_{\infty} - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (10)$$

donde E_{∞} , 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, ω es la frecuencia angular de excitación de la tensión sinusoidal, τ es el tiempo característico dependiente de la temperatura, h , k , δ son parámetros de ajuste del modelo e i es la unidad de los números imaginarios ($i = (-1)^{1/2}$).

A partir de la ecuación (10) que utiliza álgebra compleja, es posible hallar por descomposición las componentes E_1 y E_2 del módulo complejo que resultan:

$$E_1 = E_0 + \frac{E'_1}{\left[\frac{E_1}{(E_\infty - E_0)}\right]^2 + \left[\frac{E_2}{(E_\infty - E_0)}\right]^2} \quad E_2 = -\frac{E'_2}{\left[\frac{E_1}{(E_\infty - E_0)}\right]^2 + \left[\frac{E_2}{(E_\infty - E_0)}\right]^2} \quad (11,12)$$

con:

$$E'_1 = [E_\infty - E_0] \cdot \left\{ 1 + \left[\delta(\omega\tau)^{-k} \cdot \cos\left(\frac{k\pi}{2}\right) \right] + \left[(\omega\tau)^{-h} \cdot \cos\left(\frac{h\pi}{2}\right) \right] \right\} \quad (13)$$

$$E'_2 = [E_\infty - E_0] \cdot \left\{ -\delta(\omega\tau)^{-k} \cdot \text{sen}\left(\frac{k\pi}{2}\right) - \left[(\omega\tau)^{-h} \cdot \text{sen}\left(\frac{h\pi}{2}\right) \right] \right\} \quad (14)$$

Con los datos experimentales de $|E^*|$ y ϕ 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_∞ , E_0 , τ , h , k y δ . Luego, el módulo dinámico $|E^*|$ y el ángulo de fase ϕ resultan:

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (15)$$

$$\phi = \arctan \frac{E_2}{E_1} \quad (16)$$

La variación de τ 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 [16, 17, 18].

3 Materiales y procedimientos experimentales

3.1 Mezcla asfáltica templada con emulsión bituminosa (MTE)

Para este estudio se ha diseñado una Mezcla templada con emulsión (MTE) siguiendo las recomendaciones de la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía [13] 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.

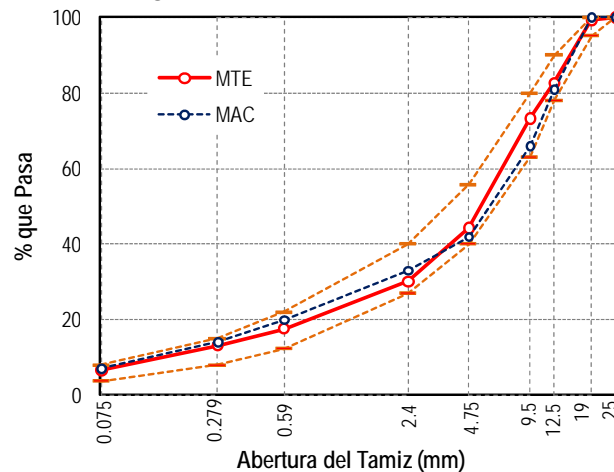


Figura 2. Curva granulométrica de la MTE

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 mecánicos básicos (Estabilidad y Fluencia Marshall) siguiendo los mismos lineamientos que se emplean en el caso de mezclas en caliente. 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 [12], se ha adoptado un porcentaje igual al 5% sobre el total de la mezcla. Al terminar la compactación, las probetas han resultado con un contenido de humedad remanente inferior al 1.5% y han sido curadas al aire hasta peso constante, condición que se alcanzó a las 120 horas aproximadamente como se muestra en la Figura 3.

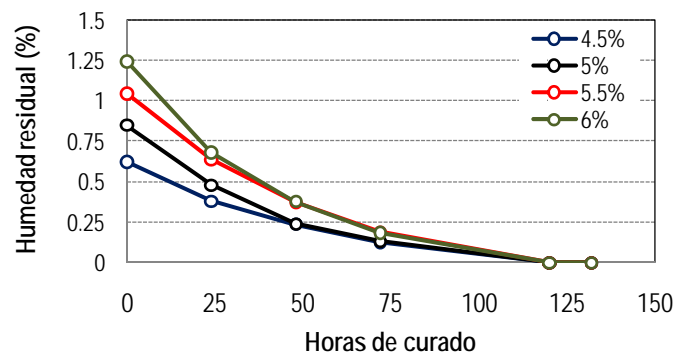


Figura 3. Evolución de la humedad residual en función del tiempo de curado

Adicionalmente y con fines comparativos se ha considerado una mezcla asfáltica en caliente (MAC) del tipo concreto asfáltico denso formulado con agregados graníticos y un ligante convencional (calificado como cemento asfáltico 70-100 por la Norma IRAM 6604 de Argentina) analizada en un trabajo previo [19]. La curva granulométrica de la misma (MAC) se muestra en la Figura 2 con un ligante asfáltico que tiene una Penetración a 25°C de 82 1/10 mm y un Punto de Ablandamiento (Anillo y Bola) igual a 46.1°C.

La misma fue seleccionada para las comparaciones de resultados por cuanto presenta características similares a las de la MTE. La Tabla 1 resume las principales propiedades volumétricas y mecánicas de estas mezclas.

Tabla 1. Propiedades de las mezclas consideradas

Mezcla	Ligante asfáltico (%)	DM (Kg/dm ³)	DTM (Kg/dm ³)	Vacíos (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidad (kN)	Fluencia (mm)	E/F (kN/mm)
MTE	5.0	2.428	2.550	4.8	16.9	71.7	3.77	3.2	1.21
MAC	5.1	2.546	2.618	2.8	15.7	82.5	9.92	3.1	3.20

DM: Densidad Marshall / DTM: Densidad Teórica Máxima / E/F: Relación Estabilidad/Fluencia

3.2 Procedimiento experimental para la determinación de $|E^*|$ y ϕ

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 [20]. 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 4 temperaturas (T) (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

Los resultados experimentales del módulo dinámico $|E^*|$ y ángulo de fase ϕ para las dos probetas ensayadas de cada una de las mezclas así como los respectivos valores promedios se presentan en la

Tabla 2. Los mismos han sido utilizados para el ajuste de los modelos sigmoideal y H-S como se describe a continuación.

Tabla 2. Resultados experimentales obtenidos

Temp. (°C)	Frec. (Hz)	MTE						MAC					
		$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)
		Prob. 9		Prob. 11		Promedio		Prob. 33		Prob. 34		Promedio	
0	5	9643	18.6	11362	17.2	10503	17.9	17343	8.0	18107	8.6	17725	8.3
0	4	9493	20.9	9856	19.7	9675	20.3	17074	10.6	17919	9.2	17497	9.9
0	2	8358	25.1	8819	19.9	8589	22.5	16160	12.1	17251	12.1	16706	12.1
0	1	7235	27.5	8102	20	7669	23.8	15129	13.6	16443	14.5	15786	14.1
0	0.5	6309	28.9	7173	21.5	6741	25.2	13986	15.2	15482	16.8	14734	16.0
0	0.25	5323	30	6195	23.3	5759	26.7	12742	16.4	14359	18.8	13551	17.6
0	0.1	3925	32.8	4806	28.2	4366	30.5	10978	18.9	12638	21	11808	20.0
10	5	6789	29.2	6457	26.6	6623	27.9	13395	18.2	14172	16.9	13784	17.6
10	4	6319	33.8	6268	27.7	6294	30.8	12700	19.4	14312	18.2	13506	18.8
10	2	4999	35.5	5293	28.9	5146	32.2	10936	22.1	12620	21.3	11778	21.7
10	1	3934	39.7	4297	30.9	4116	35.3	9240	24.9	10518	23.3	9879	24.1
10	0.5	3261	41.9	3632	32.1	3447	37.0	7560	27.4	8821	26	8191	26.7
10	0.25	2671	42	2746	35.3	2709	38.7	6361	27.9	7293	29	6827	28.5
10	0.1	1404	45	2016	38.1	1710	41.6	4652	28.1	5398	33.2	5025	30.7
20	5	3257	37.5	3252	35.4	3255	36.5	6910	23.9	7598	31.2	7254	27.6
20	4	2715	40.7	3096	37.4	2906	39.1	6619	26	7397	30.5	7008	28.3
20	2	2114	41.8	2333	37.7	2224	39.8	5274	28.3	6010	28.6	5642	28.5
20	1	1431	44.4	1754	38.3	1593	41.4	4232	32.1	4733	33.8	4483	33.0
20	0.5	1098	45.3	1248	37.7	1173	41.5	3309	34.2	3515	35.8	3412	35.0
20	0.25	762	45.9	1090	39.6	926	42.8	2568	36.1	2568	37.5	2568	36.8
20	0.1	639	45.4	712	39.9	676	42.7	1754	38	1744	37.9	1749	38.0
30	5	1088	40.4	1632	38.1	1360	39.3	3010	35.6	2734	39.9	2872	37.8
30	4	1056	39.5	1570	39.9	1313	39.7	2885	34.5	2367	41	2626	37.8
30	2	776	39.8	972	37.6	874	38.7	2140	37.1	1859	37.9	2000	37.5
30	1	528	40.3	644	41.3	586	40.8	1542	40.3	1303	37.3	1423	38.8
30	0.5	358	41.9	620	41.3	489	41.6	1192	37.2	1043	33.9	1118	35.6
30	0.25	288	40.5	505	40.8	397	40.7	829	38.4	724	32.7	777	35.6
30	0.1	212	39.5	283	39.9	248	39.7	555	35.8	491	31.3	523	33.6
40	5	476	41.3	555	38.2	516	39.8	954	38.9	930	35.6	942	37.3
40	4	401	39.7	527	37.4	464	38.6	851	38.7	781	35.8	816	37.3
40	2	372	39.7	457	36.7	415	38.2	610	33	595	32.4	603	32.7
40	1	358	39.5	304	35.4	331	37.5	482	29.8	422	31.5	452	30.7
40	0.5	286	38.6	277	38.2	282	38.4	378	27.2	297	31.5	338	29.4
40	0.25	156	37.2	214	34.3	185	35.8	294	24.9	289	27.6	292	26.3
40	0.1	86	35.7	94	35.7	90	35.7	237	20.1	270	25.5	254	22.8

4.1 Caracterización reológica mediante un modelo sigmoideal

Los resultados experimentales de ambas mezclas han sido considerados para obtener las respectivas curvas maestras de variación de $|E^*|$ de acuerdo al modelo sigmoideal de la Ecuación (7) a través de un proceso de optimización usando la función Solver de la hoja de cálculo Excel.

La Figura 4(a) muestra las curvas maestras de variación de $|E^*|$ en función de la frecuencia para una temperatura de referencia de 25°C en tanto que la Figura 4(b) presenta 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 ambas mezclas asfálticas consideradas. De igual manera la Figura 5(a) muestra la variación del ángulo de fase ϕ función de la frecuencia para una temperatura de referencia de 25°C mientras que la Figura 5(b) hace lo propio en función de la temperatura a la frecuencia de referencia de 10 Hz.

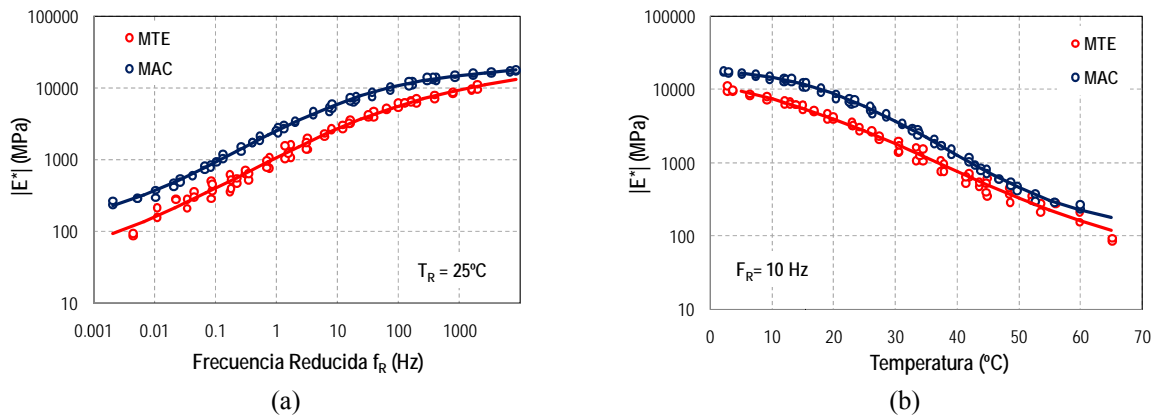


Figura 4. Variación del módulo dinámico $|E^*|$ en función de la frecuencia y la temperatura

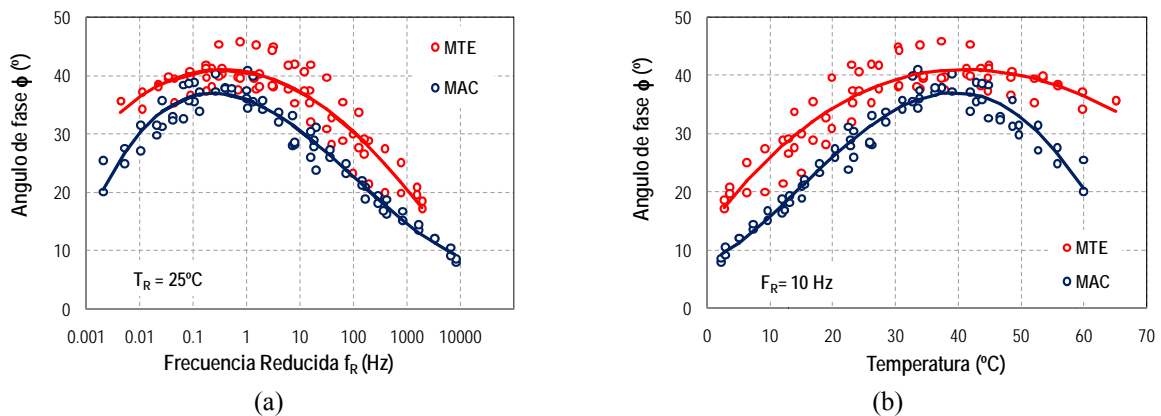


Figura 5. Variación del ángulo de fase ϕ en función de la frecuencia y la temperatura

La MTE presenta un comportamiento visco-elástico de similares características a una mezcla en caliente convencional: los módulos dinámicos son mayores a menores temperaturas o mayores frecuencias y menores para los casos contrarios. De igual manera, los ángulos de fase también responden a un comportamiento equivalente al de las mezclas en caliente con un aumento de los ángulos de fase para una reducción de la frecuencia o un incremento de la temperatura hasta un valor máximo para luego decrecer cuando se reduce la frecuencia o se aumenta la temperatura.

Los módulos dinámicos de la MTE son menores que los de la MAC para todas las frecuencias y temperaturas consideradas experimentalmente. En valores promedios los valores de $|E^*|$ para la MTE son aproximadamente el 48% de los correspondientes a la MAC. Para los ángulos de fase, los valores de ϕ para la MTE son mayores que los de la MAC en un 25% indicando que la MAC presenta en general, un comportamiento más elástico que la MTE.

La Figura 6 muestra la variación del coeficiente de traslación a_T en función de la temperatura observándose que la curva representativa para la MAC resulta más empinada que la correspondiente a la MTE. Dado que este coeficiente representa la susceptibilidad térmica de la mezcla, resulta que la MTE es menos susceptible a las variaciones de temperatura que la MAC.

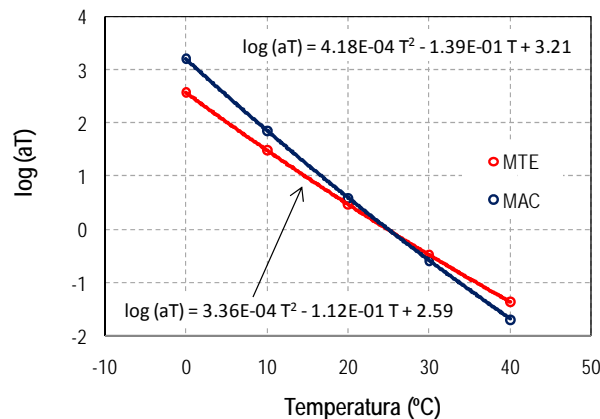


Figura 6. Variación del coeficiente aT en función de la temperatura

A fin de posibilitar la aplicación de estos resultados para el diseño estructural de pavimentos basados en principios mecánicos, la Tabla 3 presenta los parámetros resultantes para la MTE y la MAC del modelo sigmoidal de la Ecuación (8).

Tabla 3. Parámetros para el modelo sigmoidal de ambas mezclas analizadas

Mezcla	E_0	E_∞	β	γ	C_A
MTE	19	21740	-0.290	-0.573	19385
MAC	89	21081	-0.457	-0.755	24090

4.2 Caracterización reológica mediante el modelo de Huet-Sayegh (H-S)

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 7(a) y (b) muestran la comparación entre valores medidos y resultantes de los modelos H-S de ambas mezclas analizadas para los módulos dinámicos $|E^*|$ y ángulos de fase ϕ respectivamente, de todas las combinaciones de frecuencias y temperaturas cubiertas por la experiencia.

El análisis de estas figuras muestra que los valores resultantes de los modelos para las mismas condiciones empleadas en las determinaciones experimentales se sitúan ajustadamente y a ambos lados de la línea de igualdad siendo esta tendencia mucho más marcada para el módulo dinámico $|E^*|$ que para el ángulo de fase ϕ . Entonces, puede considerarse que los modelos H-S ajustados son suficientemente adecuados para describir el comportamiento reológico de estos materiales.

La Figura 8(a) muestra la variación del ángulo de fase ϕ en función de $|E^*|$ (Diagrama de Black) en la cual se observa que la MTE al igual que la MAC se comportan como materiales termo-reológicamente simples debido a la superposición de los datos obtenidos a diferentes temperaturas (0 a 40°C) y frecuencias (5 a 0.1 Hz) lo que posibilita el trazado de curvas maestras. Por otra parte, la MAC presenta un mayor comportamiento elástico a menores valores de $|E^*|$ aunque la situación es levemente inversa para los valores altos del módulo dinámico.

La Figura 8(b) muestra la variación de la componente viscosa E_2 en función de la componente elástica E_1 de $|E^*|$ (Diagrama Cole-Cole). Ambas mezclas presentan trazado similares con una marcada diferencia en el valor máximo de E_1 para $E_2 = 0$. La Tabla 4 presenta los valores de los parámetros que definen los respectivos modelos H-S de la MTE y la MAC.

Tabla 4. Parámetros del modelo H-S para las mezclas analizadas

Mezcla	E_∞ (MPa)	E_0 (MPa)	δ	k	h	C_A (°K)	τ_0 (s)
MTE	17230	22	1.01	0.48	0.48	17644	2.043×10^{-3}
MAC	21360	111	1.00	0.47	0.47	23122	6.710×10^{-3}

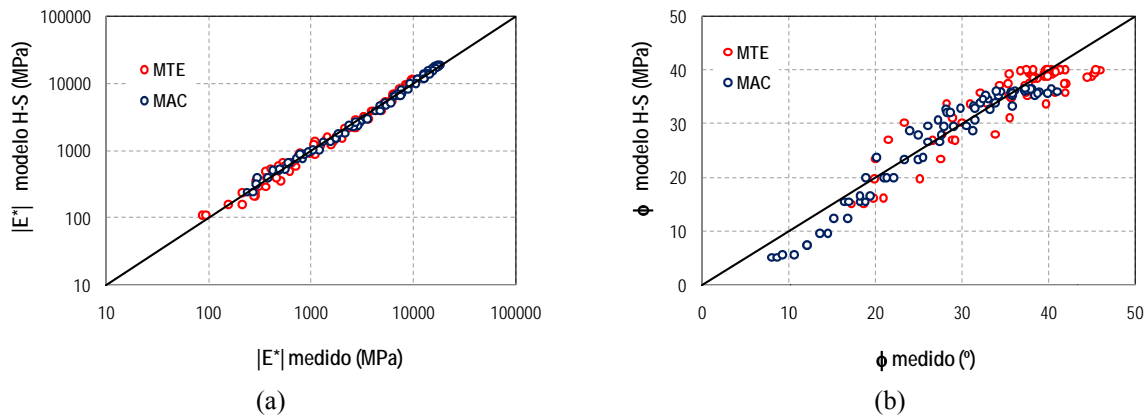


Figura 7 Comparación de valores medidos y modelados de $|E^*|$ y ϕ

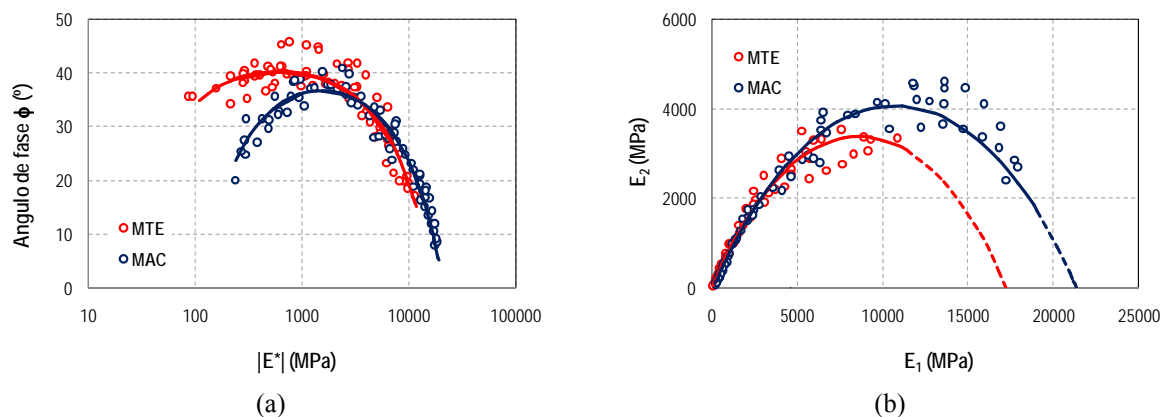


Figura 8 Diagrama de Black y Cole-Cole para las mezclas analizadas

Los parámetros δ , h y k se vinculan a las características de fluencia de los elementos de respuesta parabólica respecto al tiempo del modelo observándose que la mezcla MTE presenta muy similares valores a los de la MAC, situación que podría explicarse a partir de la similitud de propiedades del residuo asfáltico de la MTE respecto al ligante 70-100 de la MAC [21].

5. Conclusiones

En este trabajo se han determinado las propiedades visco-elásticas de una mezcla templada con emulsión bituminosa (MTE) utilizando la metodología experimental de tracción indirecta con cargas sinusoidales a diferentes frecuencias y temperaturas. Con fines comparativos, los mismos han sido contrastados con los obtenidos para una mezcla asfáltica convencional en caliente (MAC) y en ambos casos, se han empleado el modelo sigmoideal y el modelo de Huet-Sayegh para describir el comportamiento reológico de las mismas.

La MTE presenta un comportamiento visco-elástico de similares características a una mezcla en caliente convencional: los valores de $|E^*|$ son mayores a menores temperaturas o mayores frecuencias y menores para los casos contrarios. Ambas mezclas presentan un comportamiento termo-reológicamente simple permitiendo la utilización del principio de superposición frecuencia - temperatura y el trazado de curvas maestras de comportamiento.

Los ángulos de fase también muestran un comportamiento equivalente al de las mezclas en caliente con un aumento de los ángulos de fase para una reducción de la frecuencia o un incremento de la temperatura hasta un valor máximo para luego decrecer cuando se reduce la frecuencia o se aumenta la temperatura.

Los módulos dinámicos de la MTE son menores que los de la MAC para todas las frecuencias y temperaturas consideradas experimentalmente.

Finalmente, se presentan los parámetros que definen los modelos reológicos de ambas mezclas a fin de posibilitar e impulsar, al menos como una primera aproximación, la consideración de las mezclas templadas con emulsión en metodologías de diseño de pavimentos basadas en principios mecanísticos.

6. Referencias bibliográficas

- [1] Rubio, M.C., Martínez, G., Baena, L. & Moreno, F. (2012). *Warm mix asphalt: an overview*. Journal of Cleaner Production 24, pp. 76-84.
- [2] López, C., Thenoux, G., Sandoval, G., Armijos, V., Ramírez, A., Guisado, F. & Moreno, E. (2017). *Study of warm mix asphalt with super stabilized emulsion. Estudio de mezclas asfálticas templadas con emulsión superestabilizada*. Revista Ingeniería de Construcción RIC, Vol. 32 N°1, pp. 57-64.
- [3] Pandey, Y., Shri M.P., Yadav, A. & Tare, V. (2015). *Comparative Study of Emulsion Based Half Warm Mix and Cold Mix for Construction of SDBC and DBM*. International Journal for Scientific Research and Development 3.3, pp 2933-2935.
- [4] Dinis Almeida, M., Castro Gomes, J. & Antunes, M. (2010). *Mix Design Criteria for Half Warm Asphalt Recycling (HWMR) - Case Study*. 16th International Road Federation World Meeting 2010, Lisbon, Portugal.
- [5] García Santiago, J. L. & Lucas Ochoa, F. J. (2014). *Mezclas templadas con reutilización del RAP con tasa alta y tasa total. Aplicación, experiencias reales y resultados*. Revista Asfalto de la Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas, Número 14, Volumen IV, Tercer trimestre, pp 51-65.
- [6] García Prieto, A., Soto Sánchez, J. A. & Carvalho, T. (2009). *Fabricación y puesta en obra de un reciclado templado con emulsión bituminosa*. XV CILA, Lisboa, Portugal. pp 1075-1083.
- [7] García Prieto, A., Soto Sánchez, J. A. & Viera, L. (2009). *Fabricación y puesta en obra de una mezcla drenante templada con emulsión bituminosa*. XV CILA, Lisboa, Portugal. pp 1085-1093.
- [8] Guillermo José Colombo, G. J., Balige, M., Bisio, A. & Devoto, M. (2009). *Pavimentación con mezclas asfálticas de bajas emisiones*. XV CILA, Lisboa, Portugal. pp 985-994.
- [9] Lizárraga, J. M., Jiménez del Barco-Carrión, A., Ramírez, A., Díaz, P., Moreno-Navarro, F. & Rubio, M. C. (2017). *Mechanical performance assessment of half warm recycled asphalt mixes containing up to 100 % RAP*. Materiales de Construcción, Vol. 67, Issue 327, pp 1-10.
- [10] Swaroopa, S., Sravani A & Jain, P K. (2015). *Comparison of mechanistic characteristics of cold, mild warm and half warm mixes for bituminous road construction*. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences. Vol. 22, pp. 85-92.
- [11] Miranda Pérez, L., García Santiago, J. L., Uguet, N., Andaluz, D., Colás Victoria, M. del M., Lucas, F. J. & Gil, S. (2013). *Mezclas templadas con emulsión bituminosa*. Revista Carreteras Número Extraordinario, 4ª. Época. Asociación Española de la Carretera (AEC), pp. 30-36.
- [12] Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas (ATEB). (2014). *Mezclas templadas con emulsión bituminosa*. Monografía
- [13] Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía. (2012). *Recomendaciones para la redacción de: pliegos de especificaciones técnicas para el uso de mezclas bituminosas a bajas temperaturas*.
- [14] NCHRP 1-37a.(2004). *Mechanistic-Empirical design of new and rehabilitated pavement structures*. Draft Report. Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC.,.
- [15] Sayegh, G. (1967). *Viscoelastic properties of bituminous mixtures*. Proc. Second International Conferences on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, USA.,.
- [16] Yusoff, N. I., Shaw, M. T & Airey, G (2011). *Modelling the linear viscoelastic rheological properties of bituminous binders*. Construction and Building Materials 25, pp. 2171–2189.
- [17] Olard, F. (2003). *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.
- [18] Cauhapé Casaux, M., Angelone, S. & Martínez, F. (2017). *Evaluación del comportamiento visco elástico de mezclas asfálticas mediante modelos mecánicos*. XIX CILA. Medellín, Colombia.
- [19] Martínez, F., Angelone, S., Andreoni, R. y Martinuzzi, R. (2007). *Caracterización de mezclas asfálticas modificadas con adición de caucho reciclado de neumáticos descartados*. XIV CILA, La Habana, Cuba.
- [20] Martínez, F. & Angelone, S. (2010). *Validación del módulo dinámico de mezclas asfálticas usando el ensayo de tracción indirecta*. XXXVI Reunión del Asfalto. Comisión Permanente del Asfalto, Buenos Aires.
- [21] Carret, J. C., Di Benedetto, H. & Sauzéat, C. (2018). *Characterization of asphalt mixes behaviour from dynamic tests and comparison with conventional cyclic tension–compression tests*. Applied Sciences, 8 (11).