

CARACTERIZACION REOLOGICA DE MEZCLAS ASFALTICAS. DETERMINACION DEL MODULO DINAMICO A PARTIR DEL ENSAYO DE VIGA SEMICIRCULAR EN FLEXION

Marina Cauhape Casaux¹, Luis Zorzutti², Fernando Martínez³, Silvia Angelone⁴

¹ Lab. Vial IMAE-FCEIA-UNR, Riobamba y Berutti. Rosario, mccasaux@fceia.unr.edu.ar

² Lab. Vial IMAE-FCEIA-UNR, Riobamba y Berutti. Rosario, luis.zorzutti@hotmail.com

³ Lab. Vial IMAE-FCEIA-UNR, Riobamba y Berutti. Rosario, fermar@fceia.unr.edu.ar

⁴ Lab. Vial IMAE-FCEIA-UNR, Riobamba y Berutti. Rosario, sangelon@fceia.unr.edu.ar

Resumen

Históricamente, las características reológicas de mezclas asfálticas han sido determinadas en laboratorio a través de diferentes procedimientos experimentales evaluando las propiedades viscoelásticas (módulo dinámico y ángulo de fase) bajo diferentes condiciones de frecuencia y temperatura. Entre ellos, ensayos dinámicos de compresión uniaxial y triaxial, ensayos de tracción-compresión, ensayos de tracción indirecta y vigas de dos y cuatro puntos. Este trabajo propone determinar las propiedades reológicas de mezclas asfálticas a partir del empleo de la configuración de viga semicircular en flexión. Entre sus ventajas pueden nombrarse la simpleza de la geometría de la probeta, la forma de aplicación de cargas, la posibilidad de emplear equipos que no son específicos para este ensayo y pueden estar presentes en laboratorios y la posibilidad de ensayar probetas elaboradas en laboratorio y testigos calados del pavimento. Como complemento, se utiliza un modelo de elementos finitos 2D para el desarrollo de una ecuación de cálculo del módulo dinámico a partir de la carga aplicada y los desplazamientos resultantes en la muestra. Para la evaluación del procedimiento propuesto se estudian diferentes mezclas asfálticas evaluadas bajo diferentes condiciones de ensayo (temperatura y frecuencias de carga) y se presentan y discuten los resultados obtenidos.

Palabras Clave: propiedades reológicas, mezclas asfálticas, SCB, MEF.

1 Introducción

El estudio de la reología de las mezclas asfálticas es un tema que ha sido motivo de investigación desde hace muchos años. Diferentes investigadores a partir de procedimientos experimentales de laboratorio tales como ensayos dinámicos de compresión uniaxial y triaxial, ensayos de tracción-compresión, ensayos de tracción indirecta y ensayos de flexión en vigas de dos y cuatro puntos han evaluado las propiedades viscoelásticas (módulo dinámico y ángulo de fase) de las mezclas cuando se las somete a diferentes condiciones de frecuencia y temperatura.

En particular este trabajo propone una nueva metodología para la determinación de las propiedades reológicas de las mezclas asfálticas a partir del empleo de la configuración de viga semicircular en flexión. La elección de esta configuración se basa en una serie de ventajas que presenta la misma, tales como, la simpleza de la geometría de la probeta y la forma de aplicación de cargas, la posibilidad de emplear equipos que no son específicos para este ensayo y pueden estar presentes en los laboratorios, la posibilidad de poder adaptarse para determinar un número importante de propiedades en las mezclas y finalmente la posibilidad de ensayar tanto probetas elaboradas en laboratorio como testigos calados del pavimento.

En un comienzo, este ensayo de viga semicircular en flexión o SCB por sus siglas en idioma inglés (Semi Circular Bending) fue empleado para evaluar la resistencia a fractura en rocas [1, 2]. Años más tarde, diversos investigadores a nivel internacional aplicaron el ensayo SCB para la caracterización de mezclas asfálticas. Como ejemplo de ello pueden mencionarse las investigaciones llevadas a cabo por Krans et al [3] respecto a la resistencia a la fatiga, y Van de Ven et al [4] sobre la propagación de fisuras y la resistencia a la tracción. Más adelante, Mull et al [5] emplearon el ensayo SCB en probetas entalladas con carga monotónica para evaluar la resistencia a fractura de mezclas asfálticas modificadas con polvo de neumático. En Estados Unidos, Molenaar et al [6] investigaron la resistencia al agrietamiento y la fractura de mezclas asfálticas y concluyeron que el SCB es un ensayo simple y de bajo costo que puede realizarse fácilmente con probetas obtenidas en compactador giratorio o testigos calados del camino. Los resultados obtenidos y la simplicidad de la metodología del ensayo, promovieron la generación de una plataforma adecuada para que otros investigadores la apliquen en la caracterización de las propiedades de fractura y fatiga de mezclas asfálticas bajo diferentes condiciones [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Más recientemente, siguiendo estos lineamientos, Saha et al [16], aplicaron este ensayo bajo condiciones dinámicas, con cargas sinusoidales, para analizar la relación entre la fatiga y las propiedades de propagación de fisuras de las mezclas asfálticas. Respecto a normativas disponibles, en Europa, la norma EN 12697-44 [17], y en Estados Unidos, las normas AASHTO TP 105-13 [18] y ASTM D8044 [19] describen un procedimiento, utilizando el ensayo SCB, para evaluar las propiedades de fractura y propagación de fisuras de las mezclas asfálticas.

Sin embargo, en todos los estudios analizados el empleo del ensayo SCB se limita a la determinación de propiedades tales como fatiga, fisuración y resistencia a la tracción. Por ello y basado en la versatilidad de esta configuración, se plantea como principal objetivo de este trabajo la aplicación del ensayo SCB para caracterizar el comportamiento reológico de mezclas asfálticas mediante el módulo dinámico $|E^*|$ y ángulo de fase ϕ , y analizar si los resultados obtenidos son aptos para su aplicación en procedimientos de diseño de pavimentos flexibles basados en principios mecanísticos. Se estudian dos mezclas asfálticas, formuladas con dos tipos de ligantes asfálticos. Se propone además realizar el ensayo convencional en Compresión Uniaxial para validar la confiabilidad de la configuración SCB para el objetivo propuesto.

Cabe destacar que la utilización de la configuración de ensayo de una viga semicircular en flexión para la caracterización reológica de mezclas asfálticas resulta muy promisoria si se considera la hipótesis de que el módulo dinámico $|E^*|$ es una propiedad fundamental y característica de cada mezcla asfáltica, y que por lo tanto puede ser determinada mediante cualquier metodología experimental.

2 Desarrollo Teórico

2.1 Configuración SCB

La configuración experimental propuesta para este estudio consiste en una probeta apoyada sobre dos rodillos en su parte inferior y una carga dinámica aplicada en la parte superior de la misma, quedando de esta manera solicitada como una viga de tres puntos, pudiendo utilizarse tanto probetas compactadas convencionalmente en

laboratorio, así como testigos calados de pavimentos en servicio, adaptadas mediante un corte adicional en sentido diametral. Presenta como ventaja el desarrollo de un estado uniaxial de tensiones en la parte media inferior de la muestra lo que a priori, significa una mayor simplicidad y eficiencia en la interpretación de las mediciones experimentales.

2.2 Geometría de la SCB

La configuración adoptada se presenta en la Figura 1(a). En ella, R es el radio de la muestra ($R = 75 \text{ mm}$), d es el diámetro de los rodillos ($d = 20 \text{ mm}$), L es la separación entre los rodillos ($L = 130 \text{ mm}$), b es la longitud entre los puntos de medición A y B ($b = 60 \text{ mm}$), e es la distancia vertical para la ubicación de los LVDT ($e = 8 \text{ mm}$) y a es el ancho de la placa de aplicación de carga ($a = 12,7 \text{ mm}$). La probeta no presenta muesca en su base. Para poder determinar las deformaciones que se produzcan al aplicar las cargas se posicionan sobre ambas caras semicirculares de la probeta dos LVDT. La Figura 1(b) muestra una probeta instrumentada según esta configuración experimental

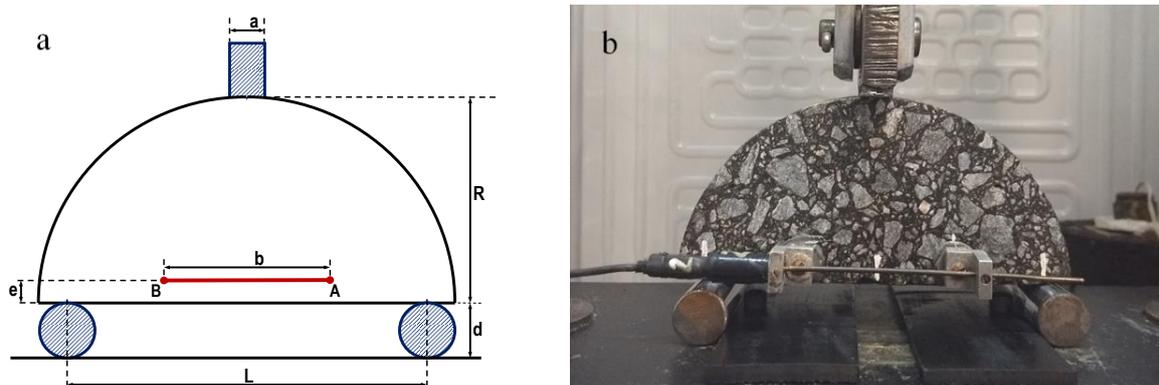


Figura 1. Configuración SCB adoptada

2.3 Cálculo del Módulo Dinámico a partir de la SCB

A partir del conocimiento de la distribución de tensiones que se producen en la probeta es posible calcular el módulo dinámico. Para el caso de la configuración SCB que se propone, la mecánica analítica no contempla una solución que determine estas tensiones y por ende, tampoco el cálculo del módulo dinámico $[E^*]$. Para poder determinarlas, distintos autores han investigado y propuesto diferentes metodologías.

Molenaar et al. [6] determinaron el módulo resiliente de mezclas asfálticas a partir de la aplicación de combinaciones de valores de frecuencia/temperatura usuales a una configuración SCB. Como resultado de estas evaluaciones, propusieron la Ecuación (1) para el cálculo del valor del módulo resiliente que caracteriza las propiedades viscoelásticas de las mezclas asfálticas:

$$M_r = 1.84 \frac{F}{V} \quad (1)$$

donde M_r es el módulo resiliente, F es la carga por unidad de ancho del espécimen en falla y V es la deformación vertical. Sin embargo, la validez de esta ecuación queda limitada a valores del espacio entre rodillos iguales a $1.6 R$.

Huang et al. [20], evalúan por medio de elementos finitos y proponen la Ecuación (2) para el cálculo del módulo de rigidez E:

$$E = 1.997 \left[e^{1.175 \sqrt{(2R)}} - 1 \right] \frac{P}{d} \quad (2)$$

donde d es la deformación vertical en el punto medio de la superficie inferior de la probeta y P es la carga aplicada.

Saha and Biligiri [16] emplean la geometría SCB en una serie de ensayos de fatiga. Proponen que la caracterización viscoelástica de las mezclas puede ser obtenida a través del módulo dinámico y el ángulo de fase. El módulo dinámico E_{SCB} puede calcularse como la relación entre la tensión de tracción σ_t respecto a la deformación ε_t . La tensión de tracción es obtenida a partir de la carga aplicada como se indica en la Ecuación (3)

$$\sigma_t = \frac{P}{D.T} \quad (3)$$

donde P es la carga vertical, D es el diámetro de la probeta y T es el espesor de la probeta.

La deformación de tracción ε_t se calcula a partir de la Ecuación (4) utilizando el desplazamiento de la apertura de la punta de la grieta (en inglés CMOD, crack mouth opening displacement):

$$\varepsilon_t = \frac{CMOD}{D} \quad (4)$$

El ángulo de fase ϕ_{SCB} se obtiene a partir de la Ecuación (5):

$$\phi_{SCB} = \frac{t_i}{t_p} .360^\circ \quad (5)$$

donde t_i es el tiempo de retardo entre un ciclo de carga y deformación y t_p es el tiempo para un ciclo de carga.

2.4 Modelización de la SCB empleando Elementos Finitos

Teniendo como base los estudios descriptos en 2.3, se propone desarrollar una ecuación que permita el cálculo del módulo dinámico $|E^*|$ a partir del empleo de un Modelo de Elementos Finitos (MEF). El modelo elegido se corresponde con uno de tipo 2D que fuera desarrollado en el Laboratorio Vial de la Universidad de Rosario [21]. Se introducen además algunos supuestos en la geometría SCB de manera de dar simplicidad al análisis: el material se considera lineal, elástico e isotrópico; se encuentra bajo estado plano de tensiones; y los rodillos de carga son rígidos. En la Figura 2 muestra la malla de elementos finitos utilizada en el análisis y la ubicación de los puntos de medición A y B.

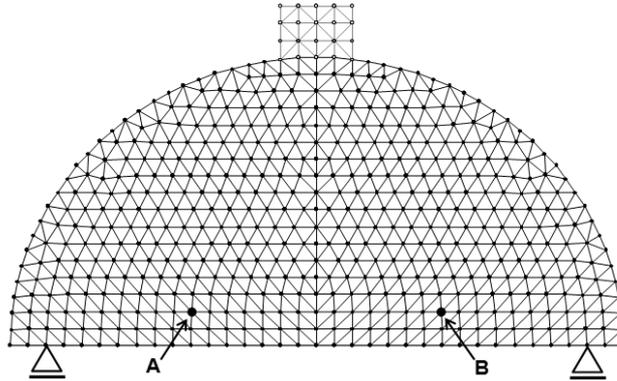


Figura 2. Modelo de elementos finitos

A partir de los resultados obtenidos con el MEF y de acuerdo con el principio de correspondencia elástico-viscoelástico aplicado a la geometría SCB con cargas sinusoidales en estado de equilibrio, el módulo dinámico $|E^*|$ se calcula de acuerdo a la Ecuación (6):

$$|E^*| = 1237 \frac{P_0}{\Delta u_0 \cdot t} \quad (6)$$

donde $|E^*|$ es el módulo dinámico, P_0 es la amplitud de la carga sinusoidal aplicada y Δu_0 es la amplitud de la deformación horizontal resultante medida como se muestra en la Figura 3.

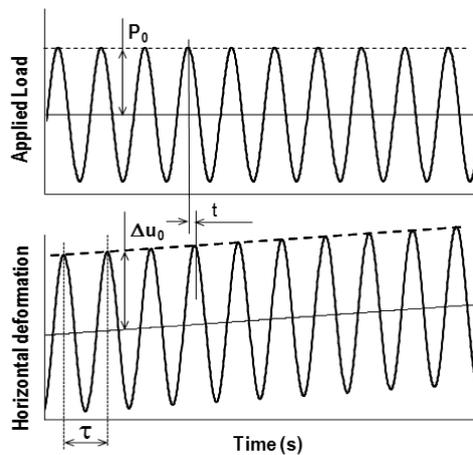


Figura 3. Carga aplicada y deformación horizontal resultante

El ángulo de fase ϕ entre carga y deformación se calcula de acuerdo a la Ecuación (7):

$$\phi = \frac{t}{\tau} \cdot 360^\circ \quad (7)$$

donde ϕ es el ángulo de fase, t es el intervalo de tiempo entre un ciclo de carga y deformación y τ es el período para un ciclo de carga.

2.5 Caracterización reológica: Curvas Maestras de Módulo Dinámico

En base a los resultados experimentales, es posible desarrollar curvas que permitan representar el comportamiento del módulo dinámico y del ángulo de fase utilizando el principio de superposición frecuencia-temperatura. Para desarrollar estas curvas,

denominadas Curvas Maestras, los valores de $|E^*|$ calculados a varias temperaturas se desplazan horizontalmente a lo largo del eje de frecuencia en una escala logarítmica para formar una curva que se corresponde a una única temperatura de referencia T_R . La ecuación de desplazamiento empleada para realizar esta traslación entre la frecuencia de ensayo y la frecuencia de referencia f_R , empleando una escala logarítmica, es (8):

$$f_R = aT.f \quad (8)$$

donde f_R es la frecuencia reducida, f es la frecuencia de ensayo y aT es el factor de desplazamiento.

Para determinar el factor de desplazamiento aT en función de la temperatura se ha adoptado una ecuación del tipo Arrhenius de la forma (9):

$$\ln(aT) = C \cdot \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right] \quad (9)$$

donde C es la constante de Arrhenius del material ($^{\circ}K$), T es temperatura de ensayo ($^{\circ}K$) y T_R es la temperatura de referencia ($^{\circ}K$).

Las curvas maestras de $|E^*|$ se han modelizado considerando una función sigmoideal de la forma que se expresa en la Ecuación (10):

$$\ln(|E^*|) = \alpha + \frac{\beta}{1 + e^{[\gamma + \delta \cdot \log(f_R)]}} \quad (10)$$

con α , β , γ y δ , parámetros de ajuste del modelo.

Las curvas maestras para el ángulo de fase ϕ se han modelizado empleando el mismo concepto aplicado para obtener las curvas maestras de $|E^*|$, empleando el factor de desplazamiento. En este caso la ecuación para el ángulo de fase toma la forma de (11):

$$\phi = \kappa \cdot \{\Gamma - \lambda\}^{\xi} \cdot e^{-\rho \cdot \Gamma} \quad (11)$$

con (12):

$$\Gamma = [\log(f_R) - \text{Log}(f_{R_{\min}})] \quad (12)$$

donde κ , λ , ξ and ρ son parámetros de ajuste del modelo y $f_{R_{\min}}$ es la frecuencia reducida mínima.

Los parámetros de ajuste y el coeficiente de Arrhenius se obtienen simultáneamente, minimizando la suma de los errores cuadrados entre los valores experimentales y del modelo empleando la función Solver en una hoja de cálculo de Excel.

2.6 Caracterización reológica: Modelos reológicos

Los valores de módulo complejo E^* para las mezclas asfálticas pueden ser modelizados empleando el modelo mecánico de Huet-Sayegh (modelo H-S). En el mismo, el comportamiento real de un material visco-elástico es asimilado a un conjunto de elementos mecánicos ideales simples, como resortes y amortiguadores de respuesta parabólica vinculados en serie o paralelo (Figura 4). [22, 23]

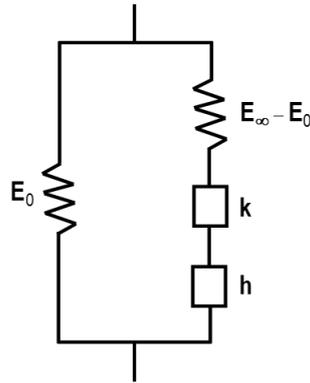


Figura 4. Modelo de Huet-Sayegh

El modelo es una función de la frecuencia angular ω y el tiempo característico τ , ajustado para una temperatura de referencia de acuerdo con el principio de superposición frecuencia-temperatura presentado anteriormente. La formulación matemática del modelo H-S es el que se indica en la Ecuación (13):

$$E^* = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \psi(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (13)$$

donde E_∞ es el módulo instantáneo para tiempos de carga muy cortos, E_0 es el módulo estático para tiempos de carga muy largos, i es el número imaginario ($i = (-1)^{1/2}$), y h , k y ψ son parámetros de ajuste con ($1 > h > k > 0$). Este modelo ya ha sido presentado con mayor detalle en publicaciones anteriores [24].

El tiempo característico τ fue calculado a partir de la Ecuación (14):

$$\tau = aT \cdot \tau_0 \quad (14)$$

donde τ_0 es el tiempo característico a la temperatura de referencia T_R . El factor de desplazamiento aT se calcula utilizando una ecuación de Arrhenius como en la construcción de curvas maestras de $|E^*|$ por medio de la Ecuación (15):

$$\ln(aT) = C_{H-S} \cdot \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right] \quad (15)$$

Los coeficientes h , k y ψ del modelo H-S, el parámetro CH-S de Arrhenius y el tiempo característico τ_0 se ajustan utilizando el método de mínimos cuadrados entre los valores estimados y medidos de las componentes elástica (E_1) y viscosa (E_2) de E^* en el espacio logarítmico.

Finalmente para completar el análisis se desarrollan los diagramas de Black. Éstos son gráficos que muestran la variación del ángulo de fase ϕ en función del módulo dinámico $|E^*|$. En ellos, la frecuencia y la temperatura se eliminan, lo que permite que todos los datos dinámicos se presenten en un único gráfico. Una curva suave en un diagrama de Black es un indicador de la validez del principio de superposición frecuencia-temperatura y un signo de la calidad de los valores experimentales. A partir de este diagrama es posible detectar la presencia de inconsistencias en los datos reológicos causados por irregularidades en los ensayos.

3 Materiales y Procedimientos

3.1 Mezclas asfálticas

Para validar el empleo de la configuración SCB para la determinación de las características viscoelásticas de mezclas asfálticas se consideran dos mezclas

densas: una mezcla CA30, formulada con un asfalto convencional y una mezcla AM3, elaborada con un asfalto modificado con polímero SBS, ambas usualmente empleadas en Argentina. Sus propiedades principales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características principales de las mezclas asfálticas empleadas

	CA30	AM3
Contenido de asfalto en peso (%)	4.7	4.7
Contenido de asfalto en volumen (%)	11.6	11.5
Vacíos (%)	5.1	4.9
Densidad Teórica Máxima (kg/dm ³)	2.597	2.588
Densidad Marshall (kg/dm ³)	2.464	2.460
VAM (%)	16.7	16.4
RBV (%)	69.5	70.1
Estabilidad Marshall (KN)	15.0	13.6
Fluencia (mm)	4.1	4.8

3.2 Preparación de muestras y condiciones de ensayo

Se compactaron en compactador giratorio probetas de 150mm de diámetro por 150mm de altura. A partir de éstas se obtuvieron dos tipos de probetas. Por un lado, se calaron probetas de 100mm de diámetro, como se muestra en la Figura 5(a), las que fueron empleadas para determinar el módulo dinámico en Compresión Uniaxial. Por otra parte, se cortaron "rodajas" de 50mm de espesor que luego fueron divididas diametralmente para formar las probetas semicirculares como se muestra en la Figura 5(b). Éstas se emplearon para la determinación del módulo dinámico a partir de la configuración SCB.

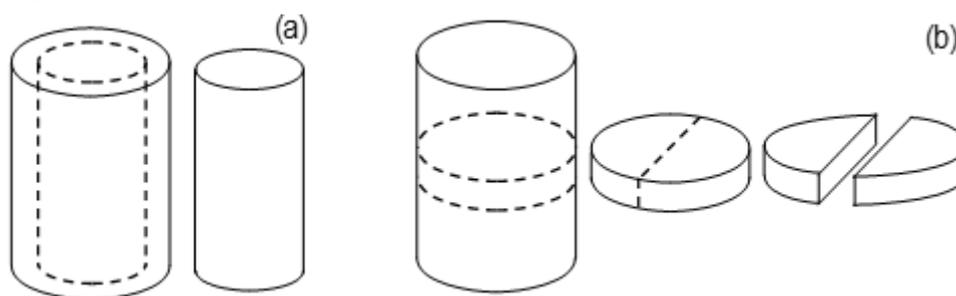


Figura 5. Probetas empleadas para los ensayos de $|E^*|$

Los ensayos de Compresión Uniaxial y SCB con aplicación de cargas sinusoidales fueron llevados a cabo empleando una máquina servo-neumática, desarrollada en el Laboratorio Vial de la Universidad de Rosario. La Figura 6 muestra la probeta armada para el ensayo de Compresión Uniaxial.

Las mediciones de $|E^*|$ se determinaron para 7 frecuencias (5, 4, 2, 1, 0.5, 0.25 y 0.10 Hz) y 5 temperaturas (0, 10, 20, 30 y 40°C), de manera de obtener una caracterización viscoelástica completa de las mezclas asfálticas. Para cada temperatura, se usó la carga más baja compatible con la capacidad del sistema de adquisición de datos de manera de evitar inducir daño a las muestras.



Figura 6. Probeta para ensayo de Compresión Uniaxial

4 Resultados obtenidos

La Figura 7 muestra una comparación de los resultados de módulo dinámico obtenidos en dos probetas gemelas en el ensayo de Compresión Uniaxial ($|E^*|_{UC}$) y la configuración de viga semicircular ($|E^*|_{SCB}$) para todas las frecuencias y temperaturas, en escala logarítmica, para las dos mezclas consideradas en este estudio. Además, se indica la línea de igualdad a 45° y una banda paralela que expresa una diferencia relativa de $\pm 25\%$.

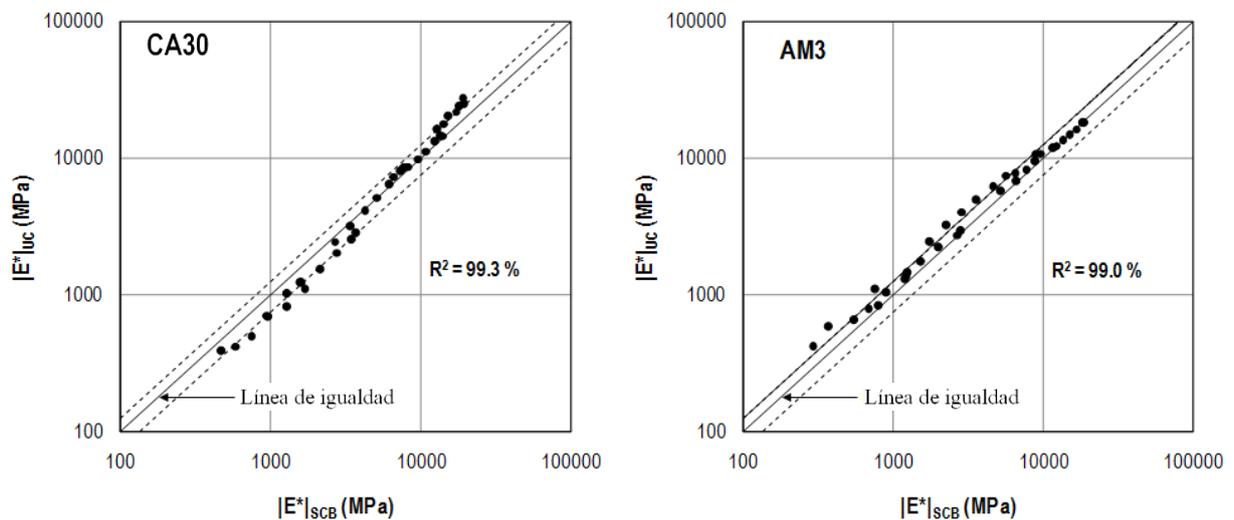


Figura 7. Comparación de resultados del módulo dinámico para la mezcla CA30 y AM3

Como puede observarse, los datos se distribuyen a lo largo de la línea de igualdad, con valores de R^2 del 99.3% para la mezcla CA30 y del 99.0% para la mezcla AM3, lo que demuestra que la configuración de SCB podría considerarse adecuada para la determinación de $|E^*|$ con la misma sensibilidad que el ensayo de Compresión Uniaxial.

En general, las diferencias relativas de los valores de $|E^*|$ medidos con ambos procedimientos fueron inferiores al 25% y están en el mismo orden de magnitud que los obtenidos en otras predicciones de módulo dinámico utilizando ecuaciones y modelos predictivos aceptados por la comunidad científico-técnica [25, 26]. Estas diferencias podrían considerarse muy aceptables, puesto que se ha observado que resultados de ensayo de muestras gemelas analizadas en laboratorio con el mismo procedimiento experimental pueden presentar una diferencia del orden del 20 al 30% entre ambas. En consecuencia, puede establecerse que mediante ambas metodologías de ensayo puede determinarse la misma propiedad dentro de un rango de diferencias aceptable para poder ser aplicado con fines prácticos en los procedimientos de diseño de pavimentos.

Durante los ensayos de módulo dinámico, también se midió el ángulo de fase ϕ entre las cargas y la deformación. La Figura 8 muestra la comparación de los ángulos de fase promedio ϕ medidos en ensayos de Compresión Uniaxial (ϕ_{UC}) y con la geometría SCB (ϕ_{SCB}) para todas las frecuencias y temperaturas, para las mezclas CA30 y AM3.

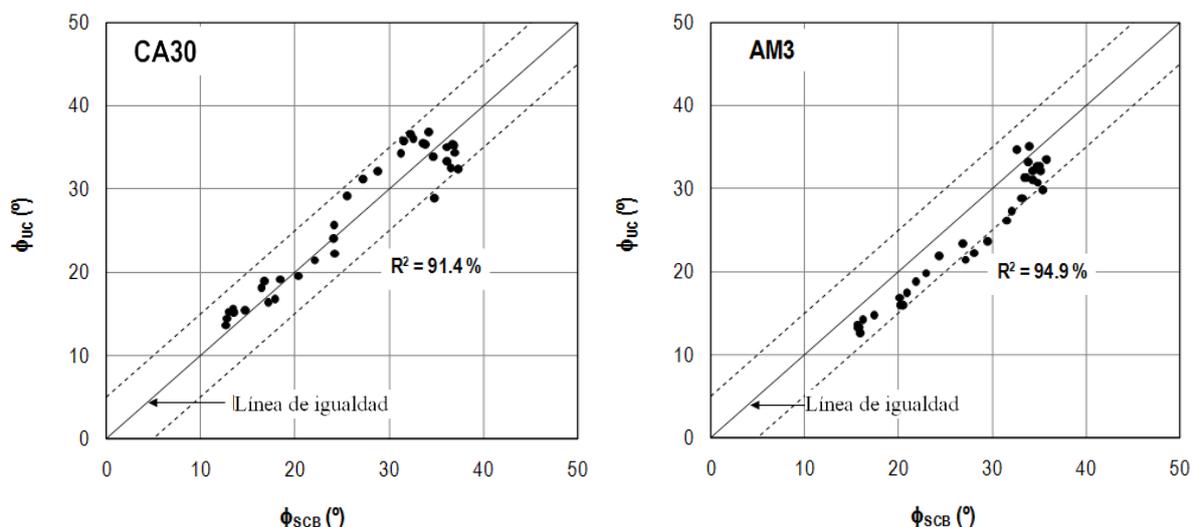


Figura 8. Comparación de ángulos de fase para las mezclas CA30 y AM3

En estas figuras, se indica la línea de igualdad y un rango de diferencias absolutas igual a $\pm 5^{\circ}$. Los resultados obtenidos presentan un coeficiente de correlación R^2 igual al 91,4% para la mezcla CA30 y un R^2 igual al 94,9% para la mezcla AM3.

Las diferencias absolutas entre los datos analizados son menores a 5° para el 94% de los datos para la mezcla CA30 y 86% para la mezcla AM3. Sin embargo, se pudo observar una ligera tendencia a medir ángulos de fase más pequeños con la configuración de SCB para la mezcla AM3.

Analizando estas comparaciones experimentales entre valores determinados por ambos métodos, la configuración SCB con cargas sinusoidales podría considerarse como un procedimiento prometedor para la determinación del módulo dinámico $|E^*|$ y el ángulo de fase ϕ de mezclas asfálticas.

La Figura 9 muestra la comparativa de las curvas maestras de $|E^*|$ para las mezclas CA30 y AM3 obtenidas a partir de las dos configuraciones propuestas en función de la frecuencia para una temperatura de referencia de 20°C .

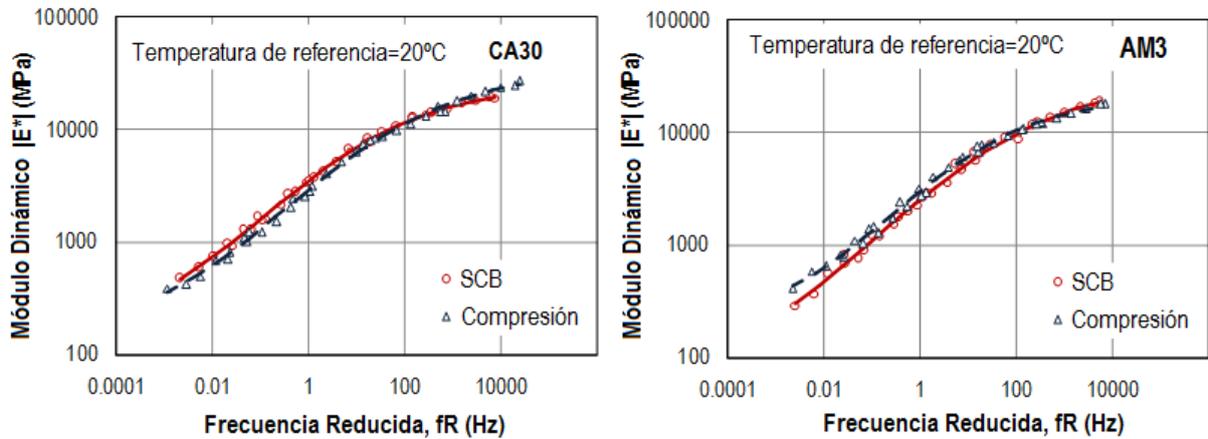


Figura 9. Curvas maestras de $|E^*|$ para las mezclas CA30 y AM3

Para las mezclas propuestas, las curvas maestras obtenidas para ambas configuraciones de ensayo son muy similares. Para la mezcla CA30, la configuración SCB resulta en menores valores $|E^*|$ a altas frecuencias y mayores valores de $|E^*|$ a bajas frecuencias. Por el contrario, para la mezcla AM3, esta configuración tiende a producir valores mayores de $|E^*|$ a altas frecuencias y menores valores de $|E^*|$ a bajas frecuencias.

La Figura 10 muestra las curvas maestras de ϕ para ambas mezclas, comparando las configuraciones de Compresión Uniaxial y SCB aplicadas. La tendencia observada para la variación del valor del ángulo de fase es consistente con los hallazgos reportados por Biligiri et al. [27] y Geng et al. [28], con valores más bajos a altas frecuencias y más altos a bajas frecuencias. Para ambas mezclas y con ambas configuraciones de ensayo, se observan ángulos de fase que oscilan entre 10 y 40°. Los resultados obtenidos mediante SCB y Compresión Uniaxial son muy similares entre sí, observándose diferencias menores a 5° para ambas mezclas consideradas en esta evaluación.

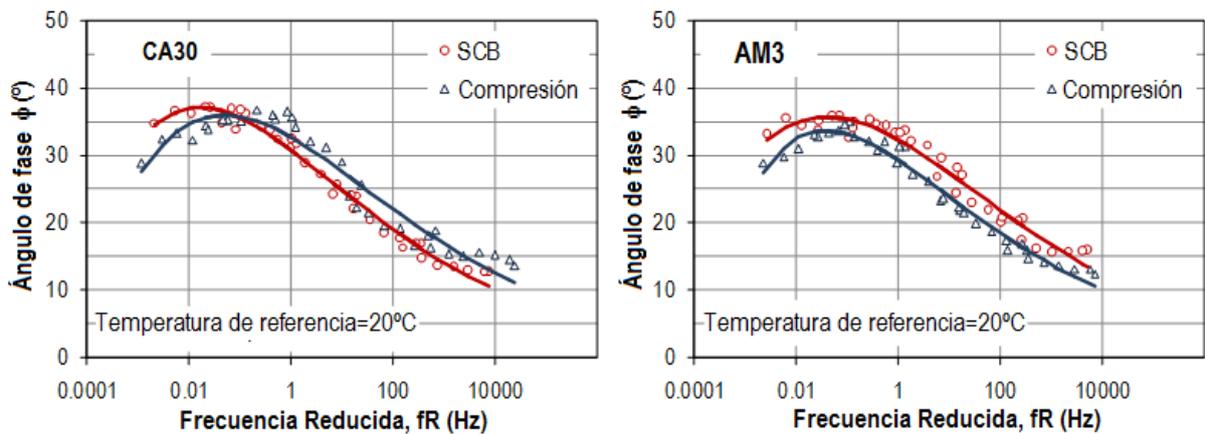


Figura 10. Curvas maestras de ϕ para las mezclas CA30 y AM3

Analizando las mezclas en forma individual, en el caso de la CA30, la configuración SCB muestra una tendencia con valores más altos que la configuración de Compresión Uniaxial, principalmente para el rango de alta frecuencia. De la misma manera que se observó en el módulo dinámico, para las

mezclas AM3, la tendencia es la opuesta, con valores más altos para SCB en comparación con los medidos en Compresión Uniaxial.

Basado en estas observaciones, podría concluirse que la configuración de SCB puede producir curvas maestras para describir el comportamiento viscoelástico igualmente válidas a las obtenidas por medio de ensayos de Compresión Uniaxial para ser aplicadas con fines prácticos en la evaluación comparativa de mezclas asfálticas o en procedimientos de diseño de pavimentos mecánicos.

Siguiendo con el análisis se presentan los valores de módulo complejo E^* para las mezclas CA30 y AM3, empleando el modelo mecánico de Huet-Sayegh (modelo H-S). Los parámetros resultantes del modelo H-S y el tiempo característico τ para los resultados experimentales promedio obtenidos con la configuración SCB y la de Compresión Uniaxial para las dos mezclas analizadas se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros del modelo H-S

	CA30		AM3	
	SCB	Compresión	SCB	Compresión
E_∞ (MPa)	26573	35931	33601	22114
E_0 (MPa)	121	119	39	164
CH-S	21560	24990	21643	22542
ψ	4.38	1.94	1.30	4.11
k	0.33	0.27	0.23	0.34
h	0.64	0.51	0.46	0.61

En la Figura 11 se presentan los diagramas de Black para las mezclas en estudio. Se muestran los valores experimentales promedio y los del modelo H-S resultantes.

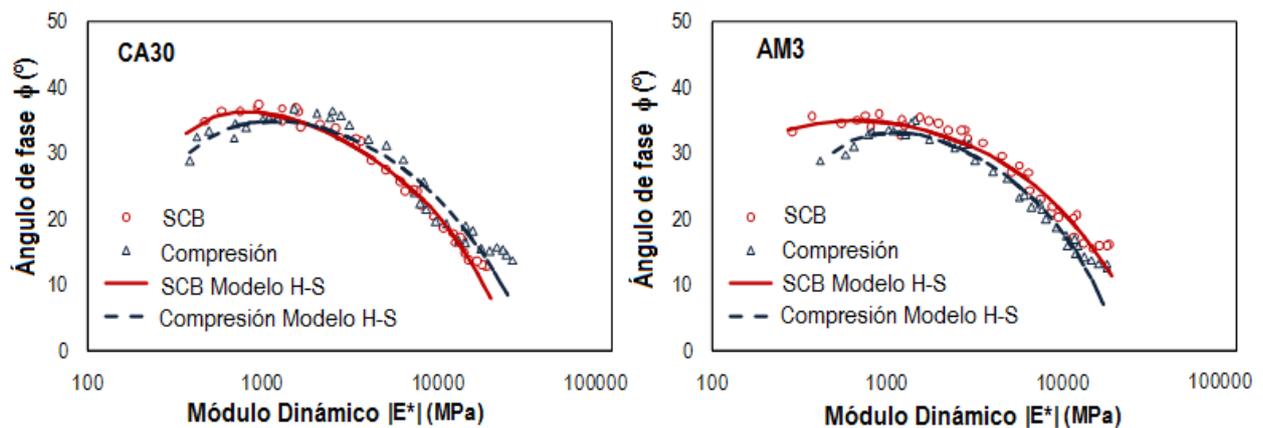


Figura 11. Diagrama de Black para las mezclas CA30 y AM3

Para las mezclas consideradas en este trabajo, se observa una buena correlación entre las curvas del modelo H-S y los resultados de ensayo obtenidos a partir de la configuración SCB y los correspondientes al ensayo uniaxial en compresión, con las mismas tendencias para ambas; se ajustan ubicándose sobre una banda estrecha a ambos lados de las curvas del modelo H-S, describiendo curvas suaves y sin interrupciones.

Basándose en estas observaciones, puede decirse que la geometría SCB es capaz de producir resultados experimentales que pueden ser modelizados con la misma sensibilidad que otros obtenidos por procedimientos de ensayo más convencionales utilizados para la caracterización reológica de mezclas asfálticas con fines prácticos.

6 Conclusiones

En este trabajo, se ha investigado el empleo de la configuración de SCB para la determinación del módulo dinámico $|E^*|$ y el ángulo de fase de dos mezclas asfálticas diferentes.

Utilizando un modelo de elementos finitos pudo desarrollarse una ecuación para el cálculo de $|E^*|$, para la geometría específica adoptada: diámetro de rodillos, distancia entre rodillos, base de medida, ubicación vertical del LVDT y ancho de aplicación de carga.

El equipamiento necesario para llevar a cabo el ensayo es relativamente simple, pudiendo ser empleados otros equipos de ensayo de módulo dinámico con algunas adaptaciones.

Se ha encontrado un muy buen ajuste entre los resultados obtenidos en los ensayos de Compresión Uniaxial y la configuración SCB, tanto para el módulo dinámico $|E^*|$ como para el ángulo de fase ϕ para un amplio rango de temperaturas y frecuencias consideradas en las determinaciones experimentales con coeficientes de regresión R^2 superiores al 90% en todos los casos.

Las curvas maestras obtenidas para el módulo dinámico $|E^*|$ y el ángulo de fase ϕ en ambos procedimientos de ensayo y para las dos mezclas asfálticas fueron muy similares. Lo mismo puede concluirse respecto al ajuste con el modelo de Huet-Sayegh y los resultados experimentales promedio obtenidos con la configuración SCB y la Compresión Uniaxial.

Por lo tanto, puede concluirse que la configuración de SCB ha sido verificada como una metodología simple y prometedora para la caracterización de la respuesta viscoelástica de las mezclas asfálticas. Sin embargo, esta conclusión está basada únicamente en los resultados obtenidos en dos mezclas asfálticas convencionales que se usan comúnmente en Argentina. Resta entonces, verificar su aplicabilidad a otro tipo de mezclas (mezclas porosas, SMA, mezclas con RAP o con subproductos de desechos).

Dado que este estudio forma parte de un proyecto de investigación en curso en la Universidad de Rosario, se considerarán otros resultados experimentales en un futuro próximo para verificar o volver a calibrar el procedimiento propuesto.

7 Referencias

- [1] Chong K.P., & Kuruppu M.D. (1984). New specimen for fracture toughness determination for rock and other materials. *International Journal of Fracture*, No. 26, 59-62.
- [2] Lim I.L., & Johnston I.W. (1993). Stress intensity factors for semi-circular specimens under Three-Point Bending. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.44, No.3,363-382.
- [3] Krans, R. L., Tolman, F., & Van de Ven M. F. C. (1996). Semi-Circular Bending test: A practical crack growth test using asphalt concrete cores. *International RILEM conference on reflective cracking in pavements*, 3rd. Maastricht, The Netherlands: RILEM.

- [4] Van de Ven, M., Smit, A. & Krans, R. (1997). Possibilities of a Semi-Circular Bending Test. Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements, Seattle, Washington: International Society for Asphalt Pavements.
- [5] Mull, M. A., Stuart, K. & Yehia, A. (2002). Fracture resistance characterization of chemically modified crumb rubber asphalt pavement. *Journal on Material Science*, 37(3),557–66.
- [6] Molenaar A.A.A., Scarpas A., Liu X. & Erkens S.M.J.G. (2002). Semi-circular bending test; simple but useful? *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 71, 794–815.
- [7] Wu, Z., Mohammad, L., Wang, L., & Mull, M. (2005). Fracture resistance characterization of Superpave mixtures using the semi-circular bending test. *Journal ASTM International (JAI)*; 2(3), 127–41
- [8] Arabandi,M. & Ferdowsi, B. (2009). Evaluating the Semi-Circular Bending test for HMA Mixtures. *Journal IJE Transactions A. Basics*, 22(1), 47-58.
- [9] Li, X. J., &Marasteanu, M.O. (2010) Using semicircular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete. *Experimental Mechanics*; 50, 867–876.
- [10] Shu, X., Huang, B., &Vukosavljevic, D. (2010). Evaluation of cracking resistance of recycled asphalt mixture using semi-circular bending test. *Paving materials and pavement analysis (GSP 203)*, 58–65.
- [11] Huang, B., Shu, X., &Vukosavljevic, D. (2010). Laboratory investigation of cracking resistance of hot-mix asphalt field mixtures containing screened reclaimed asphalt pavement. *Journal Materials in Civil Engineering*; 23(11),1535–1543.
- [12] Li, X. J., &Marasteanu, M. O. (2010). The fracture process zone in asphalt mixture at low temperature. *Engineering Fracture Mechanics*; 77(7), 1175–1190.
- [13] Biligiri, K., Said, S., & Hakim, H. (2012). Asphalt Mixtures' Crack Propagation Assessment using Semi-Circular Bending Tests. *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 5, Issue Number 4, 209-217.
- [14] Elseifi, M. A., Mohammad, L. N., Ying, H., & Cooper III, S. (2012). Modeling and evaluation of the cracking resistance of asphalt mixtures using the semi-circular bending test at intermediate temperatures. *Road Materials and Pavement Design*; Volume 13, Issue sup1: Papers from the 87th Association of Asphalt Paving Technologists' Annual Meeting, 124-139.
- [15] Huang, B., Shu, X., & Zuo, G. (2013). Using notched semicircular bending fatigue test to characterize fracture resistance of asphalt mixtures. *Engineering Fracture Mechanics*, 109, 78–88
- [16] Saha, G., & Biligiri, K. P. (2017). Stato-dynamic response analyses through semi-circular bending test: Fatigue life prediction of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*. No. 150, 664-672.
- [17] European Committee for Standardization (2010). EN 12697-44: Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 44: Crack propagation by semi-circular bending test.
- [18] American Association of State and Highway Transportation Officials. (2013). AASHTO TP 105-13 Standard method of test for determining the fracture energy of asphalt mixtures using the semicircular bend geometry (SCB).
- [19] American Society of Testing Materials. (2016). ASTM D8044 – 16: Standard Test Method for Evaluation of Asphalt Mixture Cracking Resistance using the Semi-Circular Bend Test (SCB) at Intermediate Temperatures.
- [20] Huang, L., Cao, K., & Zeng, M. (2009). Evaluation of Semicircular Bending Test for Determining Tensile Strength and Stiffness Modulus of Asphalt Mixtures. *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 37, No. 2, 122-128.
- [21] Giovanon, O. (2007). Software for Finite Element calculations. Road Laboratory, Institute of Applied Mechanics and Structures, National University of Rosario. Argentina.
- [22] Huet, C. (1963). Étude, par une method d'impédance, du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés (Study of the viscoelastic behaviour of

bituminous mixes by method of impedance). Doctoral dissertation. Faculté des Sciences de l'Université de Paris, Paris.

[23] Pronk, A.C. (2005). The Huet-Sayegh Model: A Simple and Excellent Rheological Model for Master Curves of Asphaltic Mixes. Proceedings of the Conference: R. Lytton Symposium on Mechanics of Flexible Pavements, Baton Rouge, Louisiana, USA: American Society of Civil Engineers.

[24] Cauhapé Casaux, M. Angelone, S., & Martinez, F. (2017). Evaluación del comportamiento viscoelástico de mezclas asfálticas mediante modelos mecánicos (Evaluation of the viscoelastic behavior of asphalt mixtures by mechanical models). Proceedings of the XIX^o Congreso Ibero Americano del Asfalto, Medellín, Colombia.

[25] Andrei, D., Witczak, M., & Mirza, W. (1999) Development of a revised predictive model for the dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures. Design Guide for New & Rehabilitated Pavements. Appendix CC-4, D. (NCHRP Project 1-37A), Washington DC. National Research Council.

[26] Christensen, D. W., Pellinen, T. K., & Bonaquist, R. F. (2003). Hirsch model for estimating the modulus of asphalt concrete. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Volume 72, 97-121.

[27] Biligiri, K. P., Kaloush, K., & Uzan, J. (2010). Evaluation of asphalt mixtures' viscoelastic properties using phase angle relationships. International Journal of Pavement Engineering 11(2), 143-152.

[28] Geng, L. T., Ren, R. B., Wang, L. Z., & Gao, C. L. (2011). Master Curves of Dynamic Modulus and Phase Angle for High Modulus Asphalt Mixtures, Advanced Materials Research, Vols. 243-249, 4226-4230.