

Ensayo de viga semicircular dinámico: Su aplicación para la caracterización reológica de mezclas asfálticas

Marina Cauhape Casaux,
marina_cc02@yahoo.com.ar

Silvia Angelone,
sangelon@fceia.unr.edu.ar

Fernando Martínez,
fermar@fceia.unr.edu.ar

Las mezclas asfálticas empleadas en pavimentos, deben ser diseñadas de forma tal que en su vida en servicio los diferentes medios de transporte puedan desplazarse en condiciones de seguridad y confort y además, sean capaces de transmitir los esfuerzos generados por las cargas del tránsito hacia la fundación a través de la estructura de pavimento. Cumplen por lo tanto un rol fundamental, y por ello, resulta entonces, sumamente relevante, desarrollar conocimientos científicos que permitan caracterizarlas correctamente. En este trabajo se plantea una metodología de ensayo para caracterizar mezclas asfálticas mediante una configuración de viga semicircular en flexión, conocida por sus siglas en inglés como SCB (Semi Circular Bending). La misma se ha utilizado ampliamente para caracterizar propiedades de fractura y fatiga. En este caso, se aplica la misma configuración con condiciones de carga dinámica para caracterizar las propiedades reológicas de mezclas asfálticas (módulo dinámico y ángulo de fase), teniendo presente que la misma aún no ha sido utilizada con este fin. Se adopta una disposición experimental específica y protocolos de ensayo para su posterior análisis, así como la evaluación de la influencia de los distintos factores que afectan al módulo dinámico. Esta metodología podría resultar más eficiente en comparación con otras configuraciones experimentales puesto que permite evaluar tanto probetas compactadas en laboratorio como testigos extraídos del pavimento construido.

Palabras Clave: Propiedades Reológicas, Mezclas Asfálticas, SCB, Elementos Finitos.

The asphalt mixtures used in asphalt pavements must be designed in order to provide safe and comfortable surface conditions to the drivers during their service life. Also, they will be able to support the stress and strains due to the traffic loading. Thus, it is important to develop scientific knowledge in order to properly characterize their mechanical and rheological properties. In this paper an innovative experimental configuration is proposed to characterize the rheological behavior of asphalt mixtures using a semicircular bending geometry. This configuration, known as SCB in the literature, has been used to characterize the fatigue and fracture properties of different materials. The SCB configuration was applied with dynamic loading conditions for the determination of the dynamic modulus and the phase angle of two different asphalt mixtures. A specific experimental configuration and the testing protocol was developed for the analysis of the obtained results. This testing methodology could be more efficient compared to other testing geometries allowing the test of samples compacted in the laboratory or cored from in service pavements.

Keywords: Rheological Properties, Asphalt Mixtures, SCB, Finite Elements.

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente, las características reológicas de las mezclas asfálticas han sido determinadas en laboratorio a través de diferentes procedimientos experimentales evaluando las propie-

dades viscoelásticas (módulo dinámico y ángulo de fase) bajo diferentes condiciones de frecuencia y temperatura. Entre ellos pueden nombrarse a los ensayos dinámicos de compresión uniaxial y triaxial, ensayos de tracción-compresión, ensayos de tracción indirecta y vigas de dos y cuatro puntos. Los mismos

Ensayo de viga semicircular dinámico: Su aplicación para la caracterización reológica de mezclas asfálticas

han sido extensamente usados por diferentes investigadores.

En este trabajo se propone la determinación de las propiedades reológicas de las mezclas asfálticas a partir del empleo de la configuración de viga semicircular en flexión. La misma ha sido seleccionada debido a que presenta una serie de ventajas, 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 adaptarse para determinar un número importante de propiedades en las mezclas, sumado a que esta configuración permitiría ensayar tanto probetas elaboradas en laboratorio como testigos extraídos del pavimento.

Inicialmente, 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]. Su aplicación a mezclas asfálticas llegaría unos pocos años más adelante, donde diversos investigadores a nivel internacional aplicaron el ensayo SCB para la caracterización de mezclas asfálticas.

Ejemplo de ello son 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 se puede realizar fácilmente con probetas obtenidas en compactador giratorio o testigos extraídos del camino. En base a los resultados obtenidos y gracias a la simplicidad de la metodología del ensayo, fue generándose una plataforma adecuada para que otros investigadores caractericen las propiedades de fractura y fatiga de mezclas asfálticas en diferentes condiciones [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

En Europa, la norma EN 12697-44 [16], y en Estados Unidos, las normas AASHTO TP 105-13 [17] y ASTM D8044 [18] describen un procedimiento, utilizando el ensayo SCB, para evaluar las propiedades de fractura y propagación de fisuras de las mezclas asfálticas.

Más recientemente, siguiendo estos lineamientos, Saha et al [19], han aplicado 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.

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, el objetivo principal de este trabajo es aplicar el ensayo SCB para caracterizar el comportamiento reológico de mezclas asfálticas mediante el módulo dinámico IE^* 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 mecánicos. 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 promisoría si se considera la hipótesis de que el módulo dinámico IE^* es una propiedad fundamental y característica de cada mezcla asfáltica, y que por lo tanto puede ser determinada mediante cualquier metodología experimental.

2. CONFIGURACIÓN SCB

Para este estudio, en la configuración experimental propuesta, la probeta apoya sobre dos rodillos en la parte inferior y la carga se aplica en la parte superior de manera dinámica, quedando solicitada como una viga de tres puntos, pudiendo emplearse tanto probetas compactadas convencionalmente en laboratorio, así como testigos extraídos de pavimentos en servicio, adaptadas mediante un corte adicional en sentido diametral. Presenta la ventaja de desarrollar 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.

2.1 Geometría de la SCB

La configuración adoptada se presenta en la Figura 1(a). En ella, R es el radio de la muestra ($R = 75$ mm), d es el diámetro de los rodillos ($d = 20$ mm), L es la separación entre los rodillos ($L = 130$ mm), b es la longitud entre los puntos de me-

dición 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. Los LVDT se posicionan sobre ambas caras semicirculares de la probeta para así poder determinar las deformaciones que se produzcan al aplicar las cargas. La Figura 1(b) muestra una probeta instrumentada según esta configuración experimental observándose que la misma no tiene ninguna caladura provocada que induzca una propagación de fisuras.

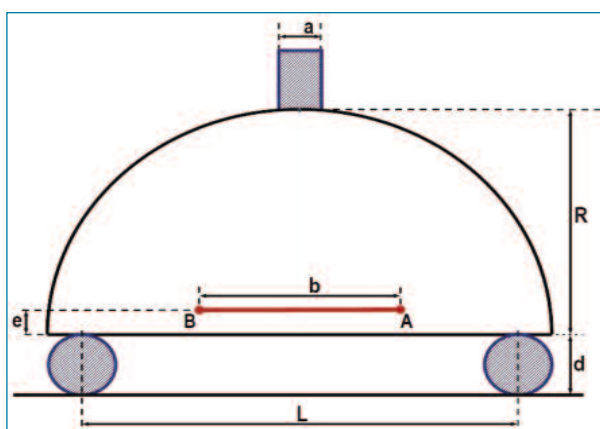


Figura 1(a). Configuración SCB adoptada



Figura 1(b). Probeta instrumentada para el ensayo propuesto

2.2 Cálculo del Módulo Dinámico

Para poder calcular el módulo dinámico, resulta necesario conocer la distribución de tensiones que se producen en la probeta. Para la configuración SCB propuesta en este trabajo, la mecánica analítica no contempla una solución que las determine y por ende, tampoco el cálculo del módulo dinámico $|E^*|$. Debido a ello, distintos autores han investigado y propuesto diferentes metodologías para poder determinarlas.

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:

$$M_r = 1.84 \frac{F}{V}$$

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, esta ecuación sólo es válida cuando el espacio entre rodillos es igual a $1.6 R$.

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

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

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 [19] llevan a cabo una serie de ensayos de fatiga empleando la geometría SCB. Proponen que la caracterización viscoelástica de las mezclas puede ser obtenida a través del módulo dinámico y el ángulo de fase. El módulo dinámico ESCB 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)

$$\sigma_t = \frac{P}{D.T}$$

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):

Ensayo de viga semicircular dinámico: Su aplicación para la caracterización reológica de mezclas asfálticas

$$\varepsilon_t = \frac{CMOD}{D}$$

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

$$\phi_{SCB} = \frac{t_i}{t_p} \cdot 360^\circ$$

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.

Basados en estos estudios, la presente investigación propone utilizar un Modelo de Elementos Finitos (MEF) para desarrollar una ecuación que permita el cálculo del módulo dinámico $|E^*|$. Para simplicidad del análisis, en la geometría SCB se introducen algunos supuestos. Se utiliza un modelo de elementos finitos 2D desarrollado en el Laboratorio Vial de la Universidad de Rosario [21]; el material se considera lineal, elástico e isotrópico; se encuentra bajo estado plano de tensiones; y los rodillos de carga son rígidos.

La Figura 2 muestra la malla de elementos finitos utilizada en el análisis y la ubicación de los puntos de medición A y B.

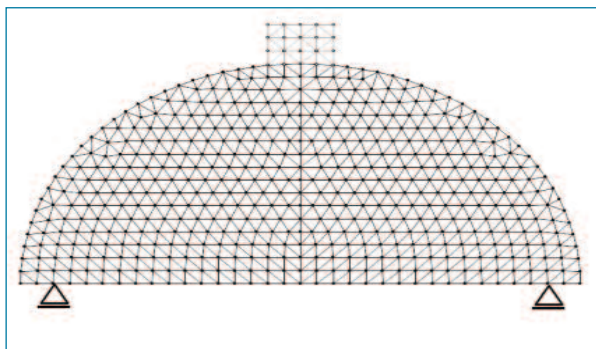


Figura 2. Modelo de elementos finitos

Basado en 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):

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

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.

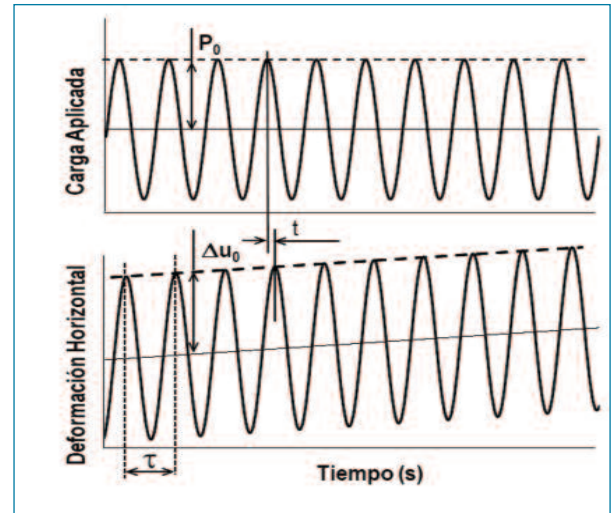


Figura 3. Carga aplicada y deformación horizontal resultante

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

$$\phi = \frac{t}{\tau} \cdot 360^\circ$$

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.

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 usualmente empleadas en Argentina. Una de ellas, identificada como CA30, fue formulada con un asfalto convencional mientras que la otra, identificada como AM3, fue elaborada con un asfalto modificado con polímero SBS. 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
Vacios (%)	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 extrajeron probetas de 100mm de diámetro, como se muestra en la Figura 4(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 4(b). Éstas se emplearon para la determinación del módulo dinámico a partir de la configuración SCB.

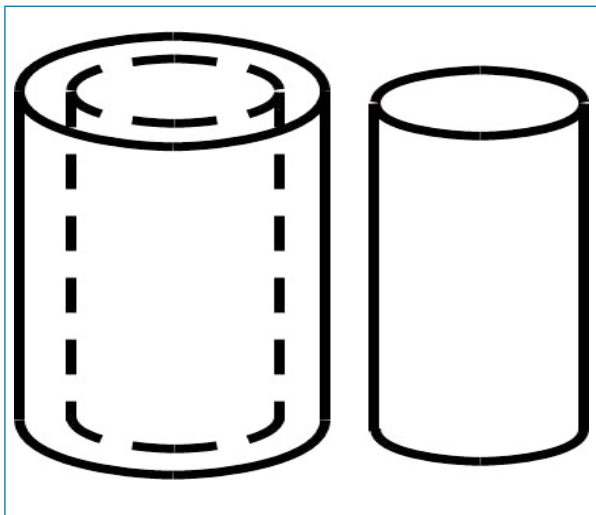


Figura 4 (a). Probetas empleadas para los ensayos de IE*I en compresión confinada

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

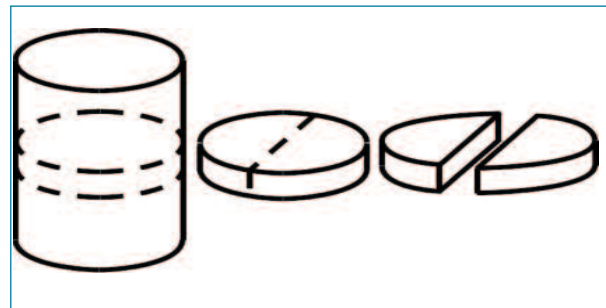


Figura 4 (b). Probetas empleadas para los ensayos de IE*I en la configuración SCB

de la Universidad de Rosario. La Figura 5 muestra la probeta armada para el ensayo de Compresión Uniaxial.

Las mediciones de IE*I 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), para 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 para evitar inducir daño a las muestras.



Figura 5. Probeta para ensayo de Compresión Uniaxial

Ensayo de viga semicircular dinámico: Su aplicación para la caracterización reológica de mezclas asfálticas

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Las Figuras 6(a) y (b) muestran una comparación de los resultados promedios de módulo dinámico obtenidos en dos probetas gemelas en el ensayo de Compresión Uniaxial ($IE^*_{COMPRESSION}$) y la configuración de viga semicircular (IE^*_{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 $\pm 25\%$.

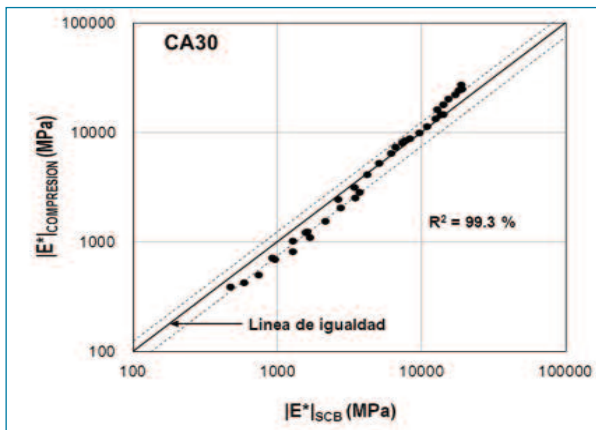


Figura 6(a). Comparación de resultados del módulo dinámico para la mezcla CA30

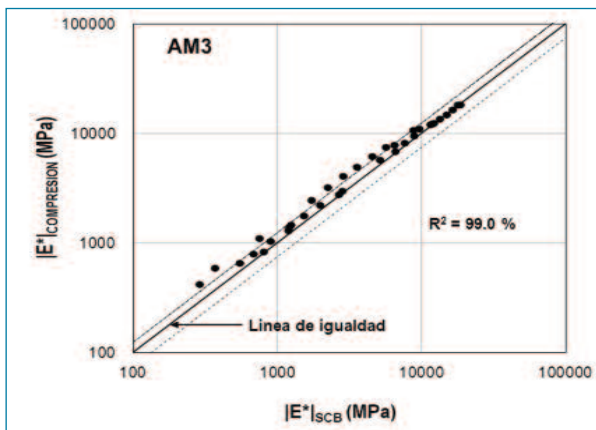


Figura 6(b). Comparación de resultados del módulo dinámico para la mezcla AM3

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 IE^* con la misma sensibilidad que el ensayo de Compresión Uniaxial.

En general, las diferencias relativas de los valores de IE^* 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 [22, 23]. 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. Las Figuras 7(a) y (b) muestran la comparación de los ángulos de fase promedio ϕ medidos en ensayos de Compresión Uniaxial ($\phi_{COMPRESSION}$) y con la geometría SCB (ϕ_{SCB}) para todas las frecuencias y temperaturas, para las mezclas CA30 y AM3.

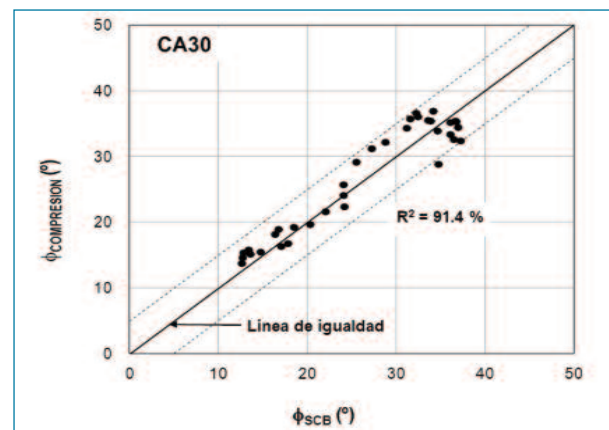


Figura 7(a). Comparación de ángulos de fase para la mezcla CA30

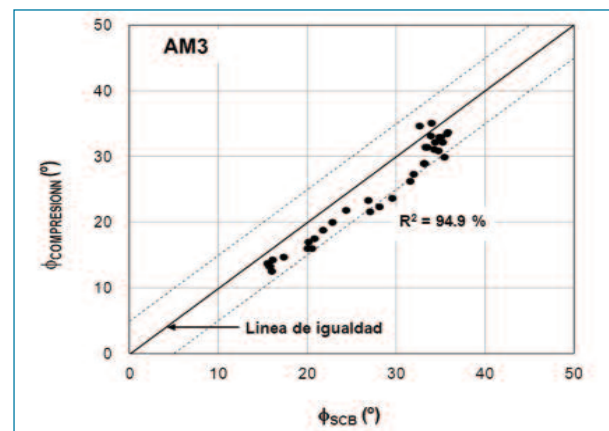


Figura 7(b). Comparación de ángulos de fase para la mezcla AM3

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.

5. CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA

5.1 Curvas maestras

A partir de los resultados experimentales obtenidos para las dos mezclas consideradas, 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):

$$f_R = aT.f$$

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):

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

donde C es la constante de Arrhenius del material (°K), T es temperatura de ensayo (°K) y T_R es la temperatura de referencia (°K).

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

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

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

Las curvas maestras para el ángulo de fase ϕ han sido modelizadas 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):

$$\phi = \kappa \cdot \{\Gamma - \lambda\}^\xi \cdot e^{-\rho \cdot \Gamma}$$

con (12):

$$\Gamma = [\log(f_R) - \text{Log}(f_{Rmin})]$$

donde κ , λ , ξ y ρ son parámetros de ajuste del modelo y f_{Rmin} es la frecuencia reducida mínima.

Los parámetros de ajuste y el coeficiente de Arrhenius se obtuvieron 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.

Las Figuras 8(a) y (b) muestran la comparativa de las curvas maestras de $|E^*|$ para las mezclas CA30 y AM3 obtenidas a partir de las dos configuraciones propuestas.

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.

Las Figuras 9(a) y (b) muestran las curvas maestras de

Ensayo de viga semicircular dinámico: Su aplicación para la caracterización reológica de mezclas asfálticas

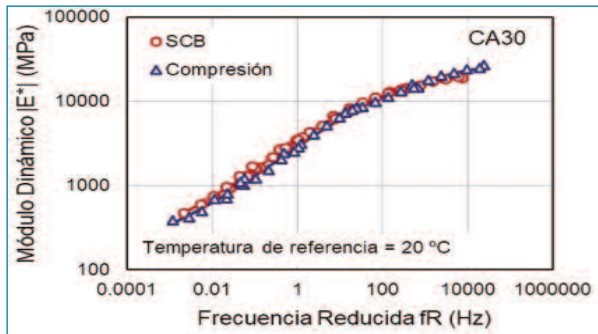


Figura 8(a). Curvas maestras de $|E^*|$ para la mezcla CA30

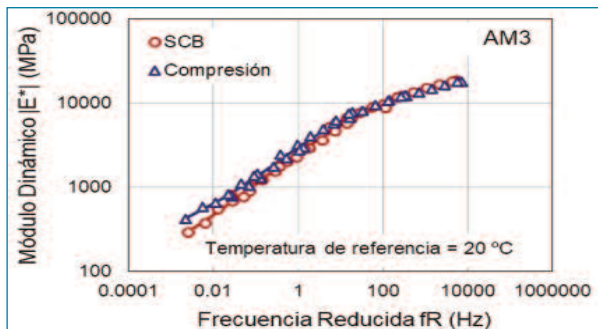


Figura 8(b). Curvas maestras de $|E^*|$ para la mezcla AM3

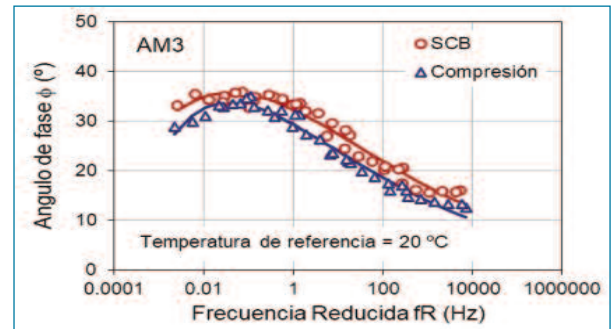


Figura 9(b). Curvas maestras de ϕ para la mezcla AM3

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. [24] y Geng et al. [25], 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.

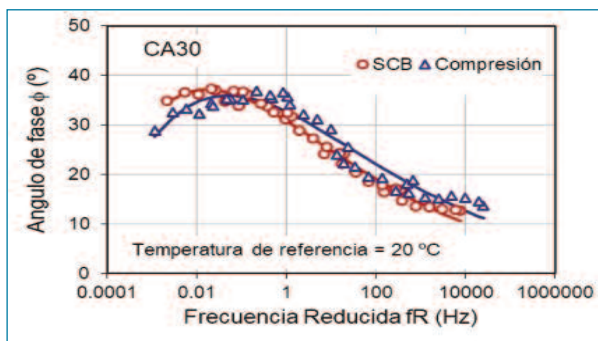


Figura 9(a). Curvas maestras de ϕ para la mezcla CA30

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 la mezcla 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.

5.2 Modelos reológicos

Los valores de módulo complejo E^* para las mezclas CA30 y AM3 han sido 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 10). [26, 27]

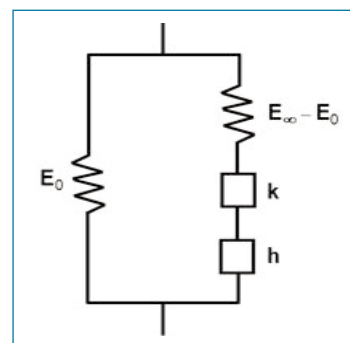


Figura 10. Modelo de Huet-Sayegh

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):

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

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 [28].

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

$$\tau = aT \cdot \tau_0$$

Los coeficientes h , k y ψ del modelo H-S, el parámetro CH-S de Arrhenius y el tiempo característico τ_0 se ajustaron 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. 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.

Los diagramas de Black son gráficos que muestran la variación del ángulo de fase ϕ en función del módulo dinámico $|E^*|$. En estos gráficos, 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.

En las Figuras 11(a) y (b) se presentan los diagramas de Black para las mezclas en estudio. Se muestran los valores experimentales promedio y los de los modelos H-S resultantes.

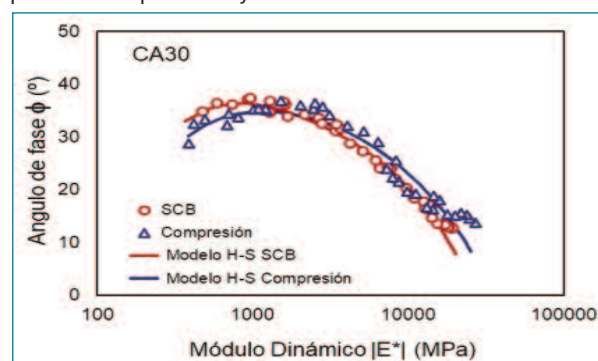


Figura 11(a). Diagrama de Black para la mezcla CA30

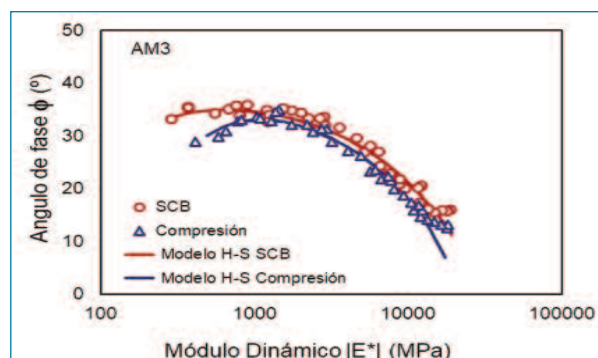


Figura 11(b). Diagrama de Black para la mezcla AM3

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

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
τ_0 (s)	$8.41 \cdot 10^{-2}$	$4.38 \cdot 10^{-3}$	$1.32 \cdot 10^{-3}$	$7.81 \cdot 10^{-2}$

Ensayo de viga semicircular dinámico: Su aplicación para la caracterización reológica de mezclas asfálticas

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 IE^*I y el ángulo de fase de dos mezclas asfálticas diferentes.

Utilizando un modelo de elementos finitos pudo desarrollarse una ecuación para el cálculo de IE^*I , 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 IE^*I 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 IE^*I 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. Maas-tricht, 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). Evalua-

- tion 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] 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.
- [17] 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).
- [18] 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.
- [19] 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.
- [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] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] CauhapéCasaux, M. Angelone, S., & Martinez, F. (2017). Evaluacion del comportamiento viscoelastico de mezclas asfálticas mediante modelos mecanicos (Evaluation of the viscoelastic behavior of asphalt mixtures by mechanical models). Proceedings of the XIX° Congreso Ibero Americano del Asfalto, Medellin, Colombia.