

**Horacio Delgado Alamilla**

Instituto Mexicano del Transporte, México  
hdelgado@imt.mx

**Mayra Flores Flores**

Instituto Mexicano del Transporte, México  
mflores@imt.mx

**José Antonio Gómez López**

Universidad Autónoma de Chihuahua, México  
jagomez@imt.mx

**Fecha de recepción:** 09 MARZO 2018 / **Fecha de aprobación:** 16 JULIO 2018

**Índices y Bases de Datos:**

latindex

UCRIndex

REDIB

Dialnet

DOAJ  
DIRECTORY OF  
OPEN ACCESS  
JOURNALS

revistas.ucr.ac.cr/index.php/materiales

lanamme.ucr.ac.cr

metodosymateriales.lanamme@ucr.ac.cr

**Políticas de Uso:**



Revista Métodos y Materiales por LanammeUCR se distribuye bajo:  
Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0  
Internacional. ISSN impreso: 2215-342X. ISSN electrónico: 2215-4558

# Propuesta de modificación de secuencia de ejecución del ensayo de módulo dinámico.

## PROPOSED MODIFICATION OF THE DYNAMIC MODULE TEST RUN SEQUENCE.

**Horacio Delgado Alamilla**

Instituto Mexicano del Transporte, México  
hdelgado@imt.mx

**José Antonio Gómez López**

Universidad Autónoma de Chihuahua, México  
jagomez@imt.mx

**Mayra Flores Flores**

Instituto Mexicano del Transporte, México  
mflores@imt.mx

**Fecha de recepción:** 09 MARZO 2018 / **Fecha de aprobación:** 16 JULIO 2018

### RESUMEN

En los últimos años se han desarrollado diferentes métodos de ensayo y metodologías para la caracterización de las propiedades reológicas de materiales asfálticos, de las cuales algunas se han ido incorporando a las metodologías de diseño y normativa de México. Sin embargo, la correcta determinación de propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica requiere de evaluaciones complejas, así como la necesidad de otras áreas de conocimientos cómo es la metrología, instrumentación y tratamiento de datos, aunado a una comprensión clara del comportamiento mecánico de un material viscoelástico. Tal es el caso del ensayo de módulo dinámico, el cual tiene como objetivo evaluar las propiedades viscoelásticas lineales de la mezcla asfáltica mediante la determinación de dos parámetros mecánicos el Módulo dinámico o complejo ( $|E^*|$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ).

El presente artículo ejemplifica la evaluación de las propiedades viscoelásticas de una mezcla asfáltica y el análisis de la información obtenida en ensayos. Indicando algunos de los errores generales en la ejecución del ensayo y además de justificar la secuencia de ejecución del ensayo propuesta por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) con respecto a la Norma AASHTO T 342, la cual no afecta la determinación de las propiedades viscoelásticas lineales de la mezcla asfáltica.

**PALABRAS CLAVE:** Módulo dinámico, ángulo de fase, viscoelasticidad, curva maestra.

### ABSTRACT

*In recent years, different test methods and procedures have been developed to evaluate the rheological properties of asphalt materials, some of which have been incorporated in design methodologies and standards in Mexico. However, the correct determination of mechanical properties of asphalt mix involves complex evaluations and the need for other areas of knowledge as metrology, instrumentation and data processing, combined with a clear understanding of the mechanical behavior of a viscoelastic material. This is the case for the dynamic modulus test, which aims to evaluate the linear viscoelastic properties of the asphalt mixture by determining two mechanical parameters, the dynamic or complex module ( $|E^*|$ ) and the phase angle ( $\delta$ ).*

*The present article illustrates the evaluation of the viscoelastic properties of an asphalt mixture and the analysis of the data obtained in tests. Indicating some of the general errors in the conduction of the test and to justify the test sequence proposed by the IMT regarding the AASHTO T 342 Standard, which does not alter the identification of the linear viscoelastic properties of the asphalt mixture.*

**KEYWORDS:** Dynamic modulus, phase angle, viscoelasticity, master curve.

## INTRODUCCIÓN

En México se han implementaron diferentes ensayos para la evaluación de la mezcla asfáltica, la mayoría de estos ensayos se han implantado en los laboratorios del país y utilizado en los procesos de diseño y control de calidad de la mezcla asfáltica. Sin embargo, de todos los ensayos propuestos, los ensayos de módulo dinámico (AASHTO T 342) y de fatiga (ASTM D 7460) han sido más difíciles de implantar. Las causas principales están asociadas al costo de los equipos y los conocimientos técnicos para la ejecución e interpretación de los ensayos. El ejemplo más claro está en el ensayo de Módulo dinámico (del cual es objeto este artículo), este ensayo evalúa las propiedades viscoelásticas lineales de la mezcla asfáltica y la correcta determinación de estas propiedades requiere conocimientos de metrología, instrumentación y tratamiento de datos, aunado a una comprensión clara del comportamiento viscoelástico de la mezcla asfáltica.

La evaluación del ensayo de módulo dinámico se realiza mediante la Norma AASHTO T 342 “Determinación del módulo dinámico de mezclas asfálticas en caliente”, este documento presenta un procedimiento de ejecución del ensayo, sin embargo, para ciertas condiciones de frecuencias y temperaturas es complicado cumplir con los requerimientos de calidad del ensayo como son la deformación acumulada por ciclo, los coeficientes de uniformidad de la deformación y ángulo de fase, e incumpliendo el principio de linealidad el cual es la base teórica del ensayo.

Por lo cual, es pertinente hacer una modificación a la secuencia de ejecución del ensayo la cual facilite la ejecución del ensayo, no afecte la determinación de las propiedades mecánicas (módulo dinámico y ángulo de fase), y asegurando que la determinación se realice en el rango viscoelástico lineal.

## ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO

Existen diferentes tipos de ensayos de laboratorio para la determinación del módulo dinámico de la mezcla asfáltica. Estos ensayos se pueden clasificar en dos grandes grupos: homogéneos y no homogéneos, para el caso del ensayo AASHTO T342, el ensayo se considera como homogéneo.

### Propiedades mecánicas de un material asfáltico

Las propiedades mecánicas de un material asfáltico pueden ser simuladas en laboratorio considerando dos parámetros básicos como son la amplitud de deformación ( $|\epsilon|$ ) y el número de ciclos de carga aplicados ( $N$ ), con los cuales se pueden identificar cuatro clases de comportamientos principales (Di Benedetto 1990):

- Para cargas que comprenden algunos cientos de ciclos y deformaciones «pequeñas» ( $<10^{-4}$ ) el comportamiento es considerado como **viscoelástico lineal**,
- Durante cargas de decenas de miles de ciclos y deformaciones «pequeñas» se desarrolla un tipo de daño, conocido como el fenómeno de «**fatiga**»,
- Para un número pequeño de cargas y deformaciones importantes, el comportamiento que se observa es fuertemente **no lineal**,
- Cuando ciclos de esfuerzos (compresión o tensión) son aplicados a partir de un esfuerzo nulo, deformaciones irreversibles no despreciables se producen para amplitudes de deformación cercanas a la ruptura. Su acumulación crea una «**deformación permanente**».

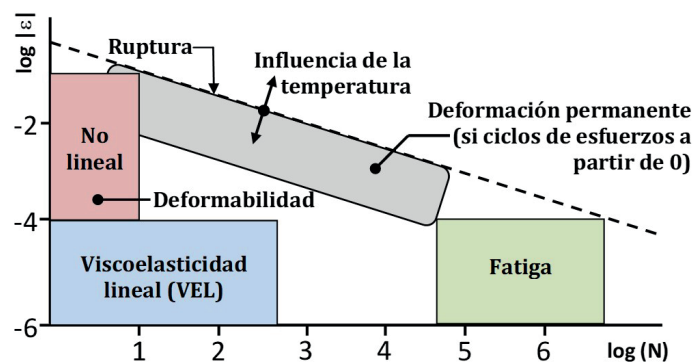


Figura 1. Comportamiento «tipo» de una mezcla asfáltica a temperatura controlada, ( $\epsilon$ ) deformación – ( $N$ ) Número de repeticiones de carga (Di Benedetto 1990).

## Descripción del ensayo

El ensayo de módulo dinámico es realizado mediante la aplicación de una sollicitación sinusoidal de compresión en una probeta cilíndrica sin confinamiento diametral a diferentes frecuencias y temperaturas. Las mediciones son realizadas en el rango de pequeñas deformaciones, para las cuales la mezcla asfáltica se comporta principalmente como un material viscoelástico lineal (Delgado y Arnaud 2011).

Aún y cuando la Norma de la AASHTO indica que el ensayo mide el módulo dinámico de la mezcla, en realidad el ensayo mide la norma del módulo complejo  $|E^*|$ , el cual es definido como la relación entre la amplitud compleja del esfuerzo sinusoidal de pulsación  $\omega$  aplicada al material,  $\sigma(t) = \sigma_0 \text{seno}(\omega t)$  y la amplitud compleja de la deformación sinusoidal resultante. Sin embargo, por cuestiones de practicidad, en el presente artículo se opta por denominar la medición como la determinación del Módulo Dinámico.

Teniendo en consideración el carácter viscoelástico del material, la deformación presenta un retardo con respecto al esfuerzo aplicado, el cual se traduce en un ángulo de desfase  $\delta$  entre las dos señales:  $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \text{seno}(\omega t - \delta)$ .

El módulo dinámico  $E^*(t)$  es definido por:

$$E^*(t) = \sigma^*(t) / \varepsilon^*(t) \quad [1]$$

En donde:

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \delta)}} = |E^*| e^{i\delta} \quad [2]$$



$|E^*|$  es el módulo dinámico,  $\delta$  es el ángulo de fase. Estos dos valores permiten describir la parte elástica y viscosa de la mezcla asfáltica. Para esto se utiliza la siguiente notación:

$$E^* = E_1 + i E_2 \quad [3]$$

$E_1$  es llamado módulo de elasticidad dinámica y es definido por  $E_1 = |E^*| \cos \delta$ ,  $E_2$  es llamado módulo de pérdida (parte viscosa) y es definido por  $E_2 = |E^*| \text{sen} \delta$ .

Los diferentes componentes del módulo dinámico varían con la frecuencia de sollicitación (Hz) y la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), a partir de esta combinación se obtendrán diversos valores de  $|E^*|$  y  $\delta$ , con los cuales podremos caracterizar el comportamiento viscoelástico lineal del material. Las frecuencias evaluadas van de 25 Hz hasta 0.1Hz y las temperaturas de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $54^{\circ}\text{C}$ .

## Principales representaciones.

Los resultados experimentales  $|E^*|$ ,  $\delta$ ,  $E_1$  y  $E_2$  son generalmente presentados mediante las siguientes representaciones clásicas.

## Curvas Isotérmicas

Estas curvas son obtenidas trazando la curva del módulo dinámico  $E^*$  (o ángulo de fase,  $\delta$ ) en función de la frecuencia para cada una de las temperaturas de ensayo  $T(^{\circ}\text{C})$ , en el caso del módulo esta gráfica es en escala bilogarítmica. La pendiente de las curvas isotérmicas permite estimar la susceptibilidad cinética del material asfáltico (variación del módulo con la velocidad de sollicitación).

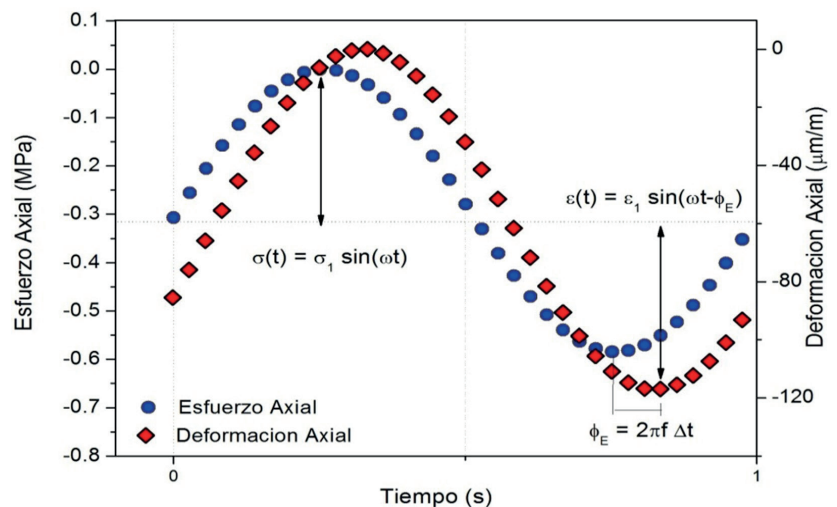


Figura 2. Gráfica de esfuerzo-deformación durante un ensayo de módulo complejo.

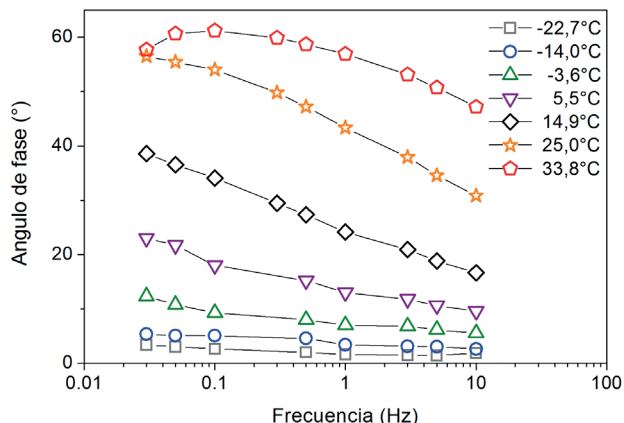
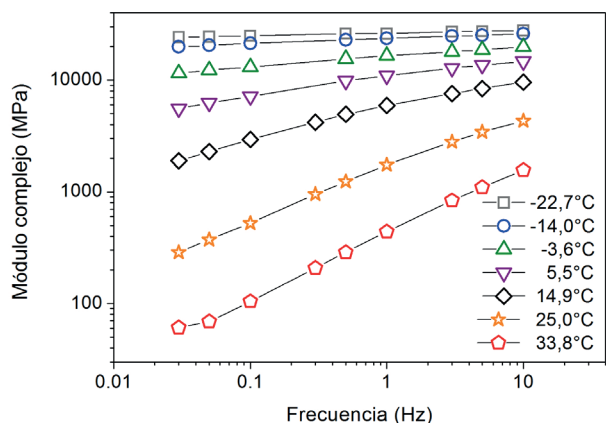


Figura 3. Curvas isotérmicas del módulo complejo (izq), ángulo de fase (der).

### Plano Cole-Cole (o Plano Complejo)

Esta representación traza en las abscisas la parte real del módulo dinámico  $E_1$  y la parte imaginaria  $E_2$  en la ordenada (Figura 4 izquierda). Esta curva puede ser utilizada para calibrar un modelo de comportamiento reológico. Debido a que el material obedece el principio de equivalencia frecuencia-temperatura, los puntos experimentales permiten definir una curva única y característica del material evaluado.

### Curva en el Espacio de Black.

Esta representación traza el logaritmo del módulo dinámico  $|E^*|$  (ordenada) en función del ángulo de fase (abscisa) correspondiente (Figura 4 derecha). Los valores del ángulo de fase son graficados en orden creciente de derecha a izquierda. Al igual que en la gráfica de Cole-Cole, cuando el material cumple con el principio de equivalencia-temperatura se define una curva única que es característica del material. Esta gráfica es utilizada para representar las zonas con valores de módulo bajo y en particular la disminución del ángulo de fase para las temperaturas altas.

### Principio de Equivalencia Tiempo-Temperatura (PETT)

Como se observa en los resultados, el módulo dinámico (ángulo de fase) es una función de dos variables independientes: la frecuencia y la temperatura:  $E^*(f, T)$ . Una de las propiedades de un material viscoelástico es el principio superposición (o equivalencia) Tiempo-Temperatura, el cual implica que se puede representar el valor del módulo dinámico (ángulo de fase) utilizando una sola variable reducida la cual depende de la frecuencia y temperatura del ensayo  $[\omega^*f(T)]$ . Para los valores de módulo dinámico, esta propiedad se traduce en la existencia de una curva única en la gráfica de Cole-Cole y de Black. Un mismo valor de módulo del material puede ser obtenido para diferentes pares (frecuencia  $\omega$ , temperatura  $T$ ):

$$E^*(f_1, T_1) = E^*(f_2, T_2) \text{ para } f_1 f(T_1) = f_2 f(T_2) \quad [4]$$

Utilizando esta propiedad de equivalencia es posible construir una curva para una temperatura de referencia  $T_R$  seleccionada

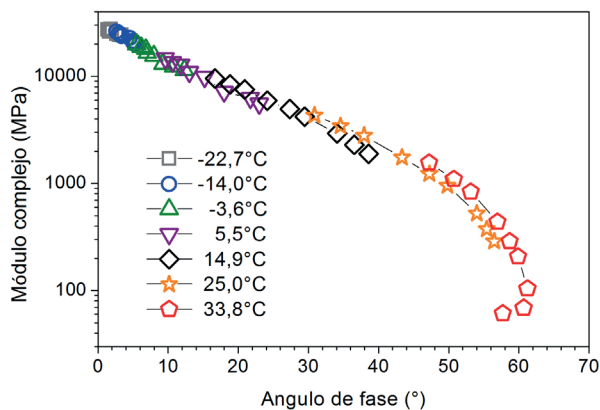
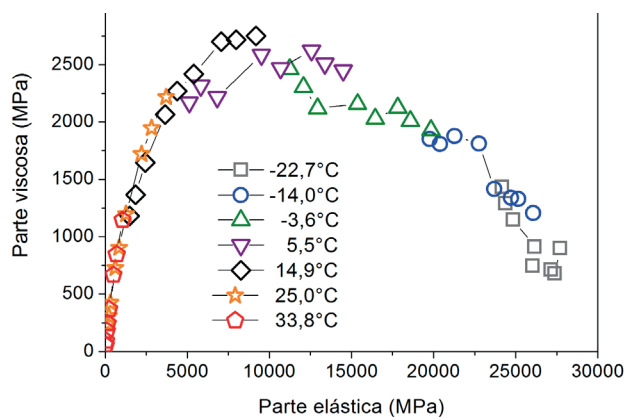


Figura 4. Plano de Cole-Cole (izquierda), diagrama de Black (derecha).



arbitrariamente. Para construir esta curva, es necesario trasladar, paralelamente al eje de las abscisas, cada isoterma  $T$  con relación a la isoterma de referencia  $T_R$ , hasta tener una superposición de los puntos de todas las isotermas. El valor del coeficiente de traslación de cada isoterma  $T$  en relación a  $T_R$  es  $\log(a_T)$ , donde  $a_T$  es una función de la temperatura que es un indicador de la susceptibilidad térmica de la mezcla asfáltica y que solo depende del tipo de material asfáltico utilizado.

La curva que se obtiene se llama «Curva Maestra». Esta curva es característica del material y permite determinar valores de módulo en frecuencias que no pueden ser obtenidas experimentalmente (Figura 5).

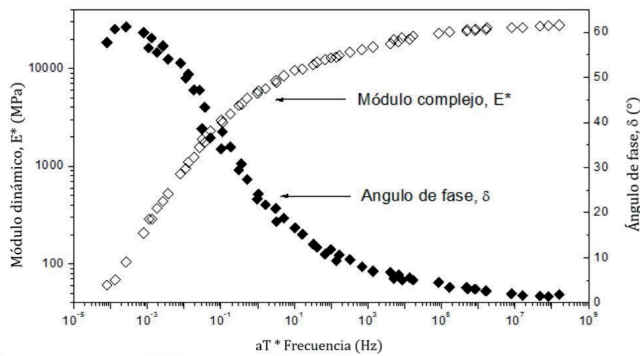


Figura 5. Construcción de la Curva Maestra

## ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO

Este estudio evalúa una mezcla asfáltica con un TN 3/4" (19 mm) en la curva granulométrica de diseño (Figura 6), el material pétreo utilizado es un basalto de buena calidad y el material asfáltico un PG 64-22. El contenido óptimo de asfalto de la mezcla asfáltica fue de 5.4% con respecto a la masa de la mezcla asfáltica compactada a 100 giros.

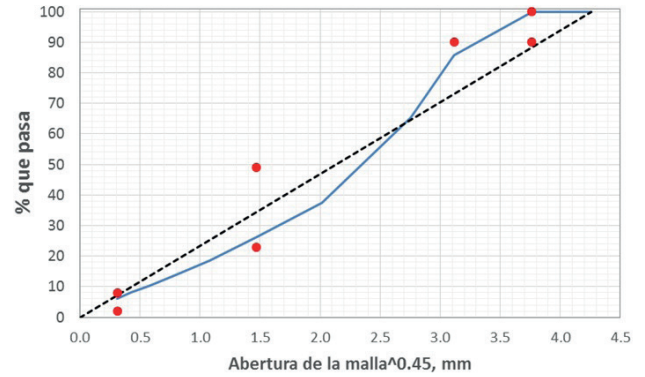


Figura 6. Granulometría de diseño

## REPETIBILIDAD DE LA MEDICIÓN DE MÓDULO DINÁMICO

Uno de los puntos importantes en el análisis de la información del ensayo es la repetibilidad de la medición. Es decir, si existe una dispersión importante en la realización de cada ensayo no se podría determinar si el error está asociado a un problema en la ejecución del ensayo o a la dispersión misma del ensayo. Hacer un análisis de repetibilidad de un ensayo de módulo dinámico es una tarea ardua y no es el objeto de este artículo. La Figura 7 presenta la evaluación de dos especímenes de mezcla asfáltica fabricados y evaluados bajo las mismas condiciones: temperatura de  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $30^{\circ}\text{C}$  y  $40^{\circ}\text{C}$ , frecuencias de 0.1Hz, 0.5Hz, 1Hz, 5Hz y 10 Hz), lo que da 30 puntos experimentales de análisis en cada mezcla. De esta evaluación se puede observar que no existen diferencias significativas en las mediciones realizadas en el ensayo de módulo dinámico, cuando el ensayo es realizado de manera adecuada.

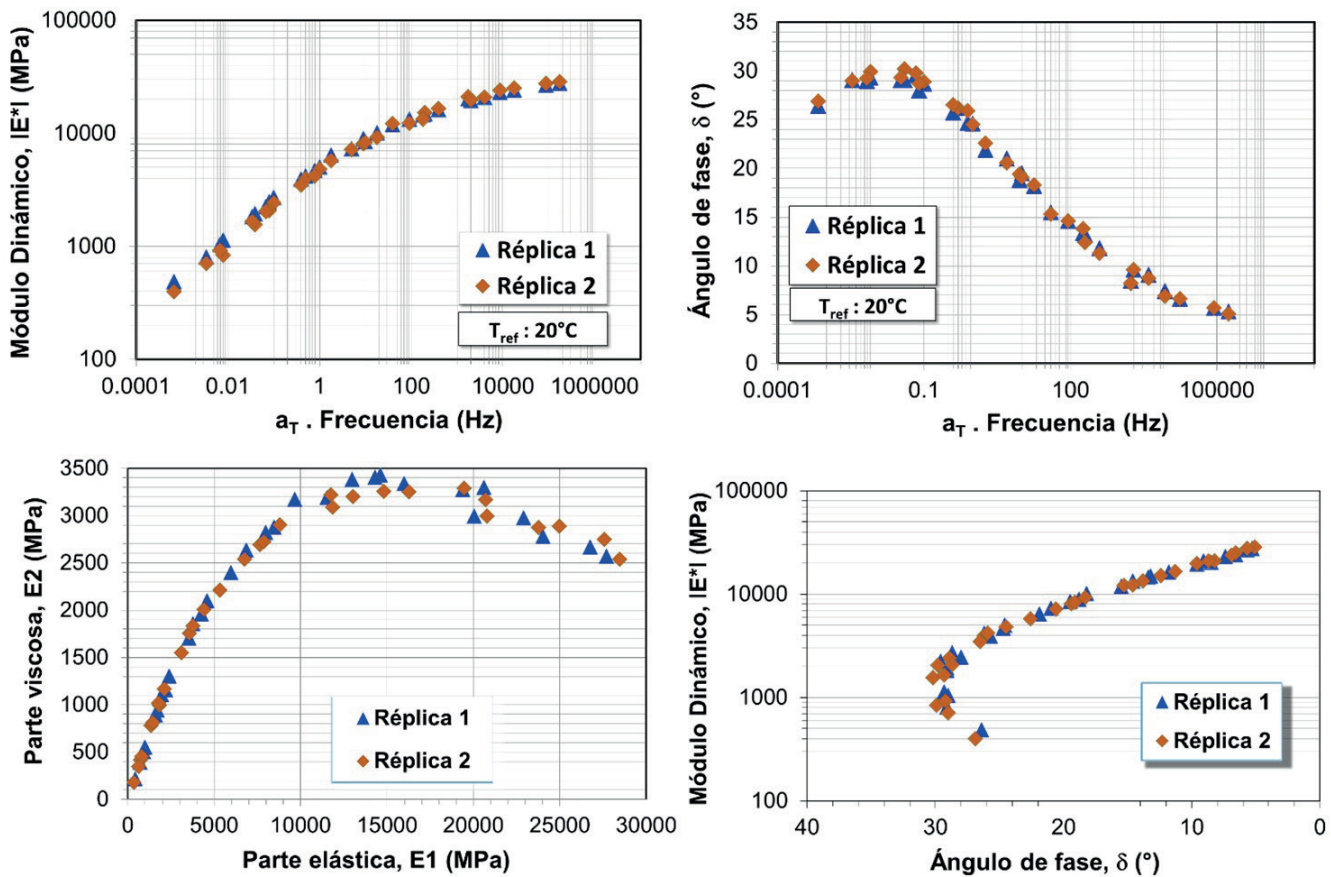


Figura 7. Repetibilidad de un ensayo de módulo dinámico en cuatro representaciones.

## PROPUESTA DE SECUENCIA DE ENSAYO IMT

Como se mencionó previamente la determinación de módulo dinámico se realiza mediante el método de ensayo AASHTO T 342. Este método propone una secuencia con 5 temperaturas (-10°C, 4°C, 21°C, 37°C y 54°C) y 6 frecuencias (25Hz, 10Hz, 5Hz, 1Hz, 0.5Hz y 0.1Hz). En la mayoría de las evaluaciones realizadas en el IMT se ha seguido una secuencia diferente en la ejecución del ensayo utilizando temperaturas de -10°C a 40°C y frecuencias en secuencia invertida a la propuesta en la Norma, así como la eliminación de la frecuencia de 25Hz (Tabla 1). Por lo cual se podría considerar que con esta modificación no se cumple con los requerimientos establecidos en la Norma. La validez de esta modificación a la Norma AASHTO se basa en el principio fundamental del ensayo *“El principio de Superposición o equivalencia Tiempo-Temperatura”*, por lo cual, si se siguen las especificaciones de los equipos de medición, tiempos de acondicionamiento mínimos y la verificación de la calidad de la medición esta variación de la secuencia no debería tener ninguna influencia en la determinación del comportamiento viscoelástico lineal de la mezcla asfáltica.

| Condición     | Temperatura (°C)        | Frecuencia (Hz)           |
|---------------|-------------------------|---------------------------|
| AASHTO        | -10, 4, 21,37 y 54      | 25, 10, 5, 1,0, 0,5 y 0,1 |
| Propuesta IMT | -10, 0, 10, 20, 30 y 40 | 0,1, 0,5, 1,0, 5 y 10     |

La razón de la modificación de la secuencia de evaluación se realiza por cuatro razones principales:

- Eliminar la frecuencia de 25Hz; el problema principal de esta frecuencia es la determinación del ángulo de fase de la mezcla asfáltica, ya que para tener una precisión de 1° se necesita que los LVDT´s tengan la capacidad de medir un desfase de la señal con una precisión de 0.00011s, lo cual no es factible realizarlo de manera adecuada en la mayoría de los equipos.
- Reducir el rango de temperatura; debido al carácter viscoelástico de la mezcla asfáltica la rigidez de la mezcla varía con la temperatura teniendo valores del orden de los 30 000 MPa para las temperaturas más bajas y valores del

orden de 100 MPa para las temperaturas más altas. Estas variaciones para el equipo de medición son equivalentes a evaluar materiales diferentes, por lo cual requiere ajustar los valores de las ganancias del equipo (PID), y esto es impráctico en la ejecución del ensayo, además que para temperaturas muy altas (54°C) no se logran con facilidad los requerimientos de Coeficiente de Uniformidad del ángulo de fase establecidos en la norma.

- **Inversión de las frecuencias;** independientemente que las sollicitaciones se realicen dentro del rango viscoelástico (en teoría no hay deformaciones permanentes), la evaluación genera una historia de carga en las probetas evaluadas, la cual está asociada a un acomodo del material y un aumento de temperatura de la probeta por la disipación de energía durante el ensayo. El hecho de iniciar con la frecuencia más baja hace que estos efectos se presenten de manera gradual y la mezcla tenga una mejor respuesta (menos dispersión de resultados).
- **Rangos de temperaturas más cortos;** mientras mayor diferencia de temperatura se tiene entre los puntos muestrales aumenta la variación en la determinación de los valores de sensibilidad térmica de la mezcla asfáltica (valores  $a_T$ ) y por ende se pueden tener errores en la determinación de la curva maestra.

La Figura 8 presenta la curva maestra de la mezcla asfáltica evaluada con la secuencia de ensayo definida en la Norma AASHTO T 324. En principio se observa que las curvas maestras siguen un comportamiento correcto para los valores de módulo dinámico y ángulo de fase (izquierda). Sin embargo, observando a detalle las mediciones se puede ver que en los resultados a 25Hz se presentan ligeras desviaciones en el valor del ángulo de fase (puntos en rojo), los cuales son más evidentes cuando se analizan los resultados en el Plano complejo (Cole-Cole, derecha). Adicional al análisis de los resultados de ensayo en las representaciones clásicas del ensayo, se analizó la calidad de la medición, en particular la medición a 54°C (Tabla 2). De este análisis se puede observar

que ninguno de los valores obtenidos cumple con el coeficiente de uniformidad establecido en la Norma de ensayo. Esto se asocia a varios factores como son la baja rigidez de la mezcla asfáltica, la necesidad de modificar los PID del equipo, la acumulación de deformaciones permanentes. Además, cabe mencionar que esta medición sólo agrega dos puntos experimentales en la curva maestra en comparación con un ensayo realizado a 40°C (Círculos azules en la Figura 8), siendo que es más factible asegurar la calidad de la medición a la temperatura de 40°C (Tabla 2).

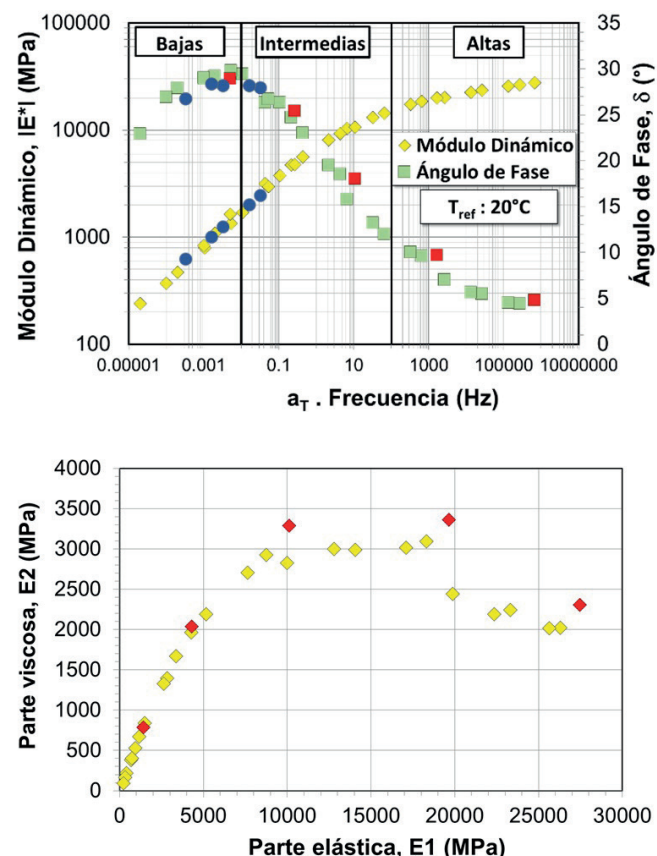


Figura 8. Resultados de ensayo de módulo dinámico (Secuencia de AASHTO T342).



Tabla 2. Evaluación de la calidad de la medición del ensayo a 54°C y 40°C

| Espécimen   | Temperatura °C | Frecuencia Hz | Desviación estándar Esfuerzo ( $\leq 10\%$ ) | Desviación estándar Deformación ( $\leq 10\%$ ) | CU Deformación ( $\leq 35\%$ ) | CU Ángulo de Fase ( $\leq 3^\circ$ ) | Deformación acumulada $\mu\epsilon$ |
|---|----------------|---------------|--|---|--------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| AASHTO T342<br>Probeta 117<br>Frecuencias<br>Altas-Bajas  | 54             | 25            | 5  | 6.1   | 36.3                           | 3.2                                  | 248                                 |
|   |                | 10            | 6.2  | 7.7   | 30.9                           | 3.7                                  | 304                                 |
|   |                | 5             | 4.1  | 6.3   | 28.3                           | 4.2                                  | 325                                 |
|   |                | 1             | 0.7  | 4.4   | 30                             | 3.8                                  | 332                                 |
|   |                | 0,5           | 0.8  | 4.4   | 31.2                           | 3.7                                  | 336                                 |
|   |                | 0,1           | 1  | 4.8   | 30.3                           | 3.3                                  | 382                                 |
| Propuesta IMT<br>Probeta 35<br>Frecuencias<br>Bajas-altas | 40             | 10            | 0.8  | 5.8   | 14.2                           | 0.9                                  | 76                                  |
|   |                | 5             | 0.7  | 5.4   | 11.5                           | 0.3                                  | 133                                 |
|   |                | 1             | 0.5  | 4.5   | 10.8                           | 0.7                                  | 178                                 |
|   |                | 0.5           | 3.5  | 4.7   | 9.7                            | 1.4                                  | 298                                 |
|   |                | 0.1           | 6  | 5.9   | 11.9                           | 2.1                                  | 719                                 |

Con el fin de confirmar que no hay una influencia en la caracterización de las propiedades viscoelásticas de la mezcla asfáltica por la variación de la secuencia de ensayos, se realizaron 3 ensayos con las secuencias de ensayo descritas en la Tabla 3. De acuerdo con lo explicado en el punto anterior no se presentarán los resultados obtenidos para la frecuencia de 25Hz.

Tabla 3. Secuencias de ensayo para validar propuesta

| Condición                                 | Temperatura (°C)        | Frecuencia (Hz)       |
|---|-------------------------|-----------------------|
| AASHTO (Probeta 34 Frecuencia A-B)        | -10, 4, 21, 37 y 54     | 10, 5, 1.0, 0.5 y 0.1 |
| AASHTO Mod (Probeta 117 Frecuencia B-A)   | -10, 4, 21, 37 y 54     | 0.1, 0.5, 1.0, 5 y 10 |
| Propuesta IMT (Probeta 35 Frecuencia B-A) | -10, 0, 10, 20, 30 y 40 | 0.1, 0.5, 1.0, 5 y 10 |

La primera verificación fue la influencia de la secuencia de ensayo en la determinación de la sensibilidad térmica de la mezcla asfáltica, la cual se presenta en la Figura 9. En esta Figura se presentan los valores de  $aT$  para cada una de las temperaturas de las tres mezclas evaluadas y se puede observar que no hay diferencias significativas en los valores obtenidos ya que en las tres mezclas se utilizó el mismo tipo de asfalto y el cambio de secuencia de ensayo no influye en la determinación.

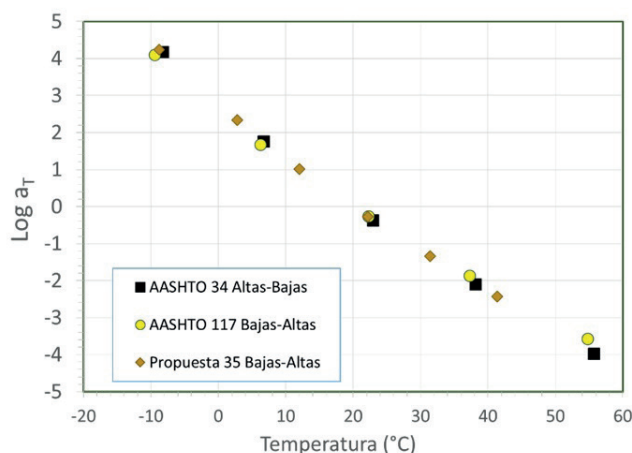


Figura 9. Valores de  $aT$  a diferentes temperaturas con diferentes secuencias de ensayo.

La evaluación general se presenta en la Figura 10, de estos resultados se puede observar que no hay diferencias significativas entre las diferentes representaciones analizadas (Curva maestra, Plano Cole-Cole y Diagrama de Black).

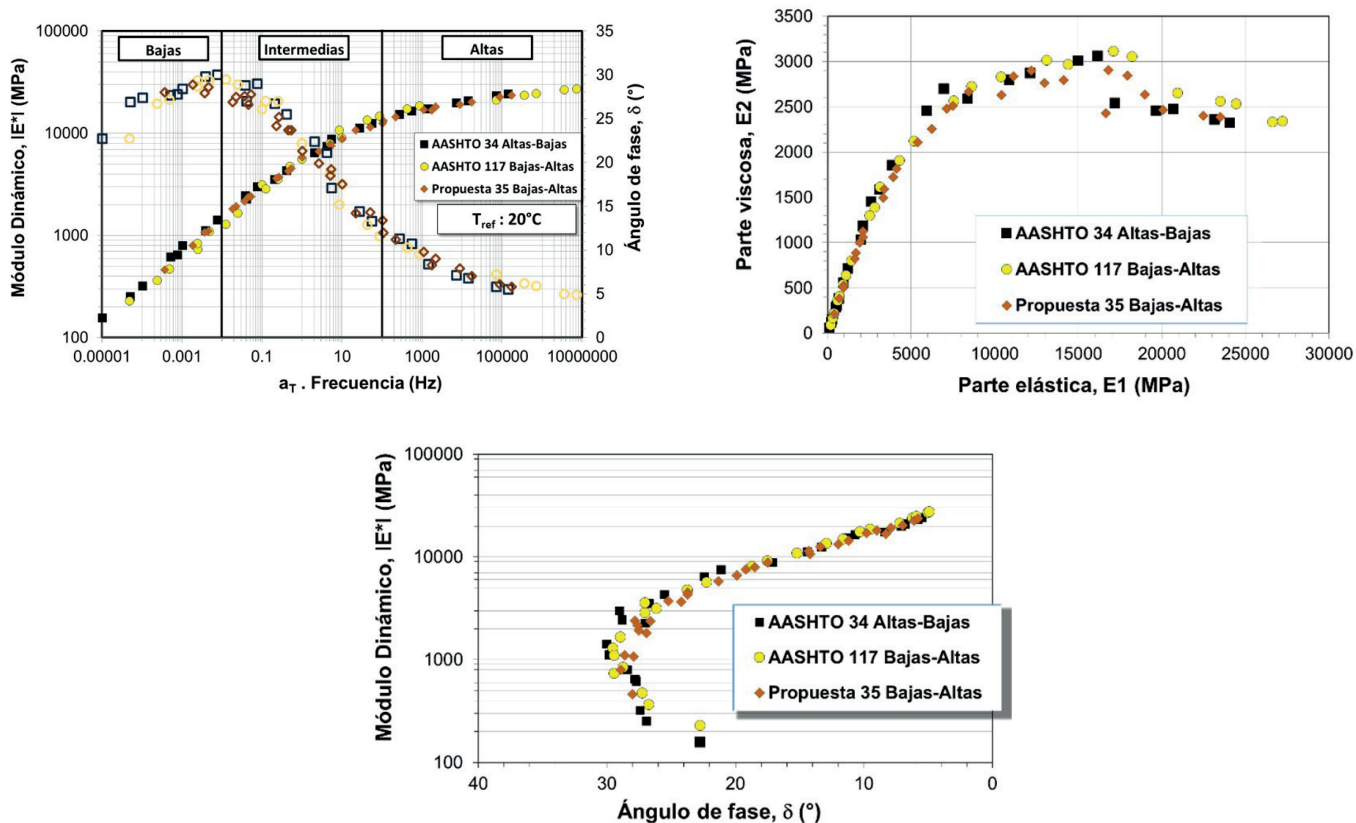


Figura 10. Resultados de ensayo de módulo dinámico con diferentes secuencias de ensayo.

La tercera verificación se realizó mediante la calibración de un modelo reológico. El modelo utilizado fue el 2S2P1D, él consiste en una generalización del modelo de Huet-Sayegh. Se ha demostrado que este es un modelo preciso para la determinación del comportamiento viscoelástico lineal (rango de pequeñas deformaciones) de materiales asfálticos. La expresión del módulo dinámico del modelo se presenta en la ecuación 5. Este modelo requiere de solo 7 constantes ( $E_\infty$ ,  $E_0$ ,  $\delta$ ,  $h$ ,  $\eta$ ,  $\tau$ ) para una temperatura dada.

$$E_{2S2P1D}^*(j\omega\tau) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(j\omega\tau)^{-k} + (j\omega\tau)^{-h} + (j\omega\beta\tau)^{-1}} \quad [5]$$

Donde  $j$  es el número complejo definido por  $j^2 = -1$ ,  $\omega$  es la frecuencia angular,  $\omega = 2\pi f$  ( $f$  es la frecuencia),  $k, h$  exponentes tal que  $0 < k < h < 1$ ,  $\delta$  es una constante,  $E_0$  = módulo estático ( $\omega \rightarrow 0$ ),  $E_\infty$  = módulo vítreo ( $\omega \rightarrow \infty$ ),  $\eta$  = viscosidad newtoniana,  $\eta = (E_\infty - E_0) \beta \tau$ ,  $\tau$  = tiempo característico, su valor depende solamente de la temperatura,  $\tau$  evoluciona aproximadamente a la ley WLF.

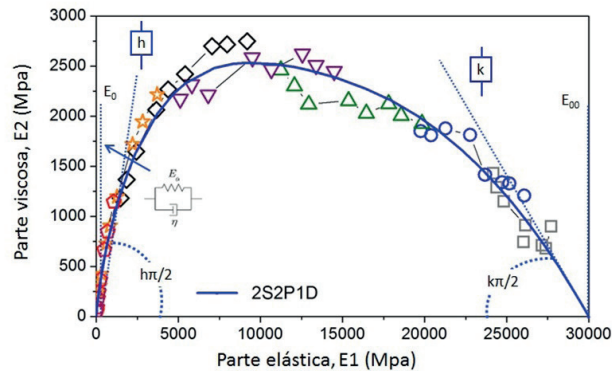


Figura 11. Calibración del modelo 2S2P1D, en el plano Cole-Cole [Olard 2003].

Los resultados de la calibración de modelo reológico 2S2P1D se presentan en la Tabla 4. Se puede observar que los valores de los parámetros de calibración son similares y se puede utilizar un valor promedio para modelar de manera general el comportamiento viscoelástico lineal de la mezcla asfáltica tal como se observa en la Figura 12.

Tabla 4. Parámetros de calibración del modelo 2S2P1D

| AASHTO                       | AASHTO Mod                   | Propuesta IMT                |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| $E_0 = 180 \text{ MPa}$      | $E_0 = 180 \text{ MPa}$      | $E_0 = 210 \text{ MPa}$      |
| $E_{00} = 29500 \text{ MPa}$ | $E_{00} = 30000 \text{ MPa}$ | $E_{00} = 30000 \text{ MPa}$ |
| $k = 0.2395$                 | $k = 0.241$                  | $k = 0.23$                   |
| $h = 0.4995$                 | $h = 0.465$                  | $h = 0.47$                   |
| $\delta = 3.0$               | $\delta = 2.9$               | $\delta = 2.7$               |
| $\tau = 0.1$                 | $\tau = 0.1$                 | $\tau = 0.1$                 |
| $\beta = 300$                | $\beta = 350$                | $\beta = 350$                |

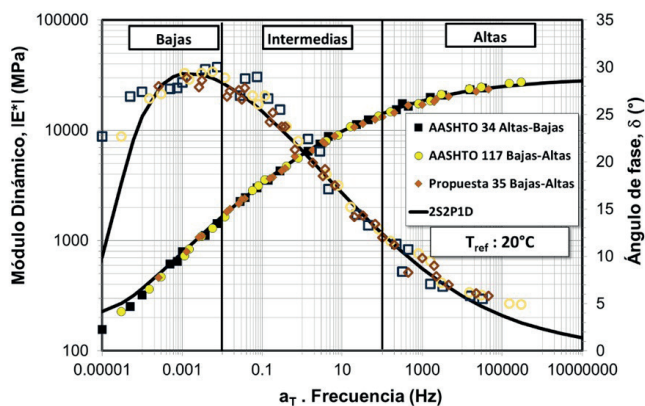


Figura 12. Resultado de ensayo vs Calibración del modelo 2S2P1D.

Con estas evaluaciones se demuestra que el cambio de la secuencia propuesta por el IMT no afecta los resultados obtenidos en la caracterización de las propiedades viscoelásticas lineales de la mezcla asfáltica en el ensayo de módulo dinámico.

## CONCLUSIONES.

La justificación a la modificación presentada tiene como base las limitaciones existentes ligadas a calidad de los equipos de medición, planteando una solución para simplificar la evaluación de las condiciones más complejas del ensayo (frecuencias y temperaturas altas) basándose en el PETT. Las conclusiones del trabajo son las siguientes:

- Primeramente, se pudo ejemplificar la complejidad del ensayo, así como los análisis mínimos requeridos (representaciones clásicas) para la correcta interpretación de los resultados.
- Se concluyó que para el correcto análisis del ensayo se necesita evaluar tanto el valor de módulo dinámico como el del ángulo de fase de la mezcla asfáltica, y al igual que la construcción de sus respectivas curvas maestras evaluando al menos 30 puntos experimentales.
- Se pudo ejemplificar que si el ensayo de módulo dinámico es realizado de manera correcta se pueden obtener buena repetibilidad tanto en el valor de módulo dinámico como en el del ángulo de fase de la mezcla asfáltica.

- Se pudo demostrar que la secuencia propuesta por el IMT no afecta los resultados obtenidos en la caracterización de las propiedades viscoelásticas lineales de la mezcla asfáltica en el ensayo de módulo dinámico. La validez de esta modificación se basa en el principio fundamental del ensayo “El principio de Superposición o equivalencia Tiempo-Temperatura”, y sobre todo considera la experiencia que se ha tenido en los últimos años en la realización de este ensayo.
- La validación fue realizada en una mezcla convencional, por lo cual es recomendable hacer una confirmación para mezclas asfálticas modificadas en los cuales se ha podido observar que el PETT no siempre se cumple.

## BIBLIOGRAFÍA.

- Di Benedetto H. (1990), Nouvelle approche du comportement des enrobés bitumineux : résultats expérimentaux et formulation rhéologique. RILEM. Budapest, pp 387-401.
- Di Benedetto H., Corte J.-F. (2004), « Matériaux routiers bitumineux 2 : constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges », Hermes, Lavoisier.
- Delgado H., Arnaud L. (2011), Investigation of the fatigue properties of asphalt mixtures reinforced with natural fibers. 5th International conference: bituminous mixtures and pavements, Tesalónica.
- Pellinen T., Crockford B. (2003), Comparison of analysis Techniques to Obtain Modulus and Phase Angle from Sinusoidal Test Data. In: RILEM. Ensayos de desempeño y evaluación de mezclas asfálticas, Zurich, pp 301-307.
- Carter A., Perraton D. (2002), La mesure du module complexe des enrobés bitumineux, 2e Conferencia especializada en ingeniería de materiales, Montréal, Québec.
- Bonaquist R. (2008), Refining the Simple Performance Tester to Use in Routine Practice. NCHRP Report 614.
- Witczak M. W., Bari J. (2004), Development of Master Curve ( $E^*$ ) Database for Lime Modified Asphaltic Mixtures. Arizona State University Research Project, Tempe, AZ 85287-5306.
- Olard F (2003). Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures. Relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé. Tesis: Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas de Lyon.
- Bonnot J. (1983), Généralités sur essais mécaniques pratiques de formulation et de contrôles des enrobés bitumineux, RILEM, p. 133-170, Belgrado, 12-16 septiembre.
- Delgado H., Lo complejo del módulo complejo: aspectos experimentales (segunda parte), Revista asfáltica. No. 33 p. 5-10, México, Enero-Marzo 2013.
- Delgado H., Lo complejo del módulo complejo: principio de equivalencia Tiempo-Temperatura (tercera parte), Revista asfáltica. No. 34 p. 42-46, México, Abril-Junio 2013.