



**LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES  
Y MODELOS ESTRUCTURALES**

## **MODULO DINAMICO DE MEZCLAS ASFALTICAS**

**Investigador:**

Fabricio Leiva

**Septiembre 2004**

## MODULO DINAMICO DE MEZCLAS ASFALTICAS

**Módulo dinámico.** Es el valor absoluto del Módulo complejo que define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal.

$E^*$  es el módulo visco-elástico del material. En la teoría visco-elástica, el valor absoluto del módulo complejo  $|E^*|$ , por definición es el módulo dinámico.

Los valores del módulo dinámico pueden emplearse tanto para el diseño de la mezcla asfáltica para pavimento, como para el diseño del espesor de la capa de pavimento asfáltico.

El método de ensayo que permite su determinación (**ASTM D3496 y D3497, AASTHO TP62**) cubre procedimientos para preparar y ensayar mezclas asfálticas como para determinar los valores del módulo dinámico. Este ensayo puede ser con carga uniaxial o triaxial de compresión o tensión.

El procedimiento cubre un amplio intervalo tanto de temperatura como de frecuencia de carga. La serie de ensayos mínima recomendada incluye temperaturas de 5, 25 y 40°C (42, 77 y 104°F) y frecuencias de cargas de 1, 4 y 16Hz para cada temperatura.

### BASE TEÓRICA DE $E^*$

Para materiales visco-elásticos lineales como mezclas asfálticas, la relación esfuerzo-deformación bajo una carga sinusoidal continua, es definida como el módulo complejo dinámico ( $E^*$ ). El módulo complejo se define como la razón de la amplitud del esfuerzo sinusoidal en un tiempo dado ( $t$ ), y la frecuencia angular de carga ( $\omega$ ).

La Figura 1 muestra la respuesta del material visco-elástico dado el arreglo del ensayo, en la ecuación 1

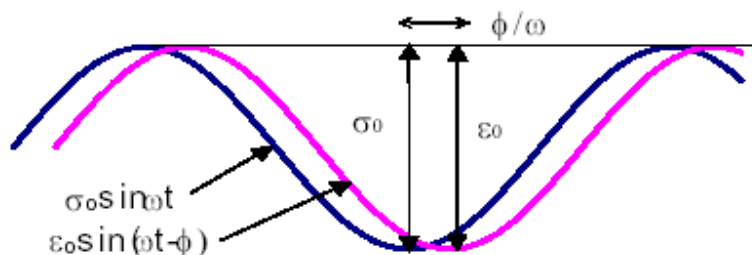


Figura 1. Módulo dinámico.

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \phi)}} = \frac{\sigma_0 \sin \omega t}{\varepsilon_0 \sin(\omega t - \phi)} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$\sigma_0$  = esfuerzo pico (máximo)  
 $\varepsilon_0$  = deformación unitaria pico (máxima)  
 $\phi$  = ángulo de fase (grados)  
 $\omega$  = velocidad angular  
 $t$  = tiempo, segundos

Matemáticamente, el módulo dinámico se define como el valor absoluto del módulo complejo:  $|E^*| = \sigma_0/\varepsilon_0$ .

Las principales variables respuesta del ensayo son el módulo dinámico  $|E^*|$ , y el ángulo de fase  $\phi$ , el cual es un indicador de las propiedades visco-elásticas de mezclas o ligantes asfálticos. El módulo dinámico en compresión  $|E^*|$  de la mezcla, es similar en principio al módulo complejo de cortante de ligantes asfálticos  $G^*$ . Ambos módulos están teóricamente relacionados por medio de la siguiente ecuación:

$$E^* = 2(1 + \mu)G^* \quad (\mu \text{ módulo de Poisson}) \quad \text{Ec. 2}$$

## DESARROLLO DE CURVAS MAESTRAS

Para la construcción de curvas maestras se utiliza el principio de superposición de tiempo-temperatura. Se aplica un factor o una constante de cambio con respecto al logaritmo del tiempo para obtener una curva suavizada. En general, la curva maestra de rigidez puede ser matemáticamente modelada por una función sinusoidal descrita como:

$$\text{Log } |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log t_r)}} \quad \text{Ec. 3}$$

$t_r$  = tiempo de carga a la temperatura de referencia  
 $\delta$  = mínimo valor de  $E^*$   
 $\delta + \alpha$  = máximo valor de  $E^*$   
 $\beta, \gamma$  = parámetros que describen la función sinusoidal  
 $\alpha$  = variable que es función de la graduación

El factor de cambio puede ser expresado de la siguiente forma:

$$a(T) = \frac{t}{t_r} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde.

$a(T)$  = factor de cambio como función de la temperatura

$t$  = tiempo de carga a la temperatura deseada

$t_r$  = tiempo de carga a la temperatura de referencia

$T$  = temperatura de interés

Se construye un gráfico del factor de cambio en función de la temperatura donde se aplica una ecuación de regresión polinomial de grado 2 de la siguiente forma:

$$\text{Log}[a(T_i)] = aT_i^2 + bT_i + c \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

$a(T_i)$  = factor de cambio en función de la temperatura  $T_i$

$T_i$  = temperatura de interes, °F

$a$ ,  $b$  y  $c$  = coeficientes de regresión

La Figura 2 muestra un ejemplo de construcción de curvas maestras, por lo general la temperatura de interés es la temperatura media (20 a 25 °C):

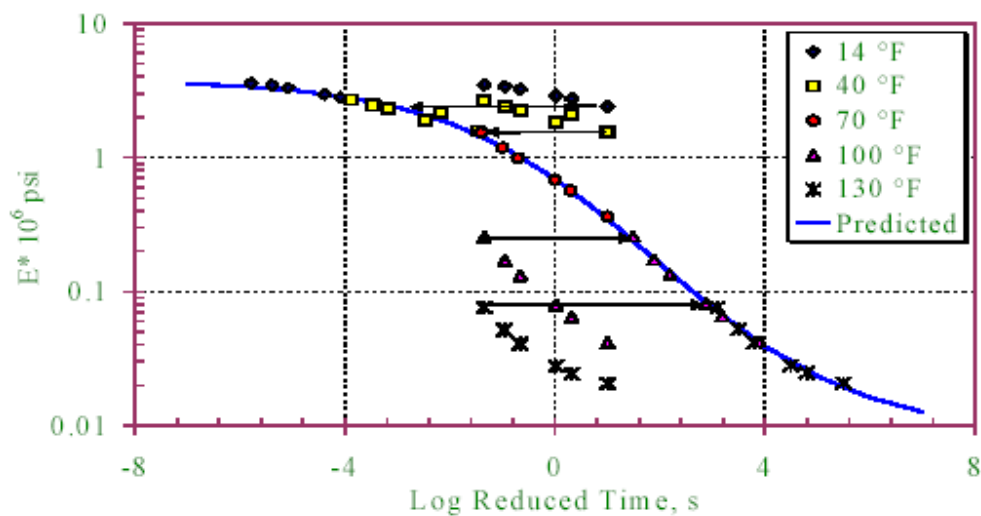


Figura 2. Ejemplo de construcción de curvas maestras.

## MÓDULO DINÁMICO EN LA NUEVA GUÍA DE DISEÑO

En la nueva guía de diseño, la rigidez de la mezcla asfáltica es determinada usando curvas maestras, por medio de tres niveles de entrada de datos, dependiendo de la disponibilidad y el tipo de datos.

La curva maestra para el nivel 1 es desarrollada aplicando la optimización matemática para evaluación de laboratorio; la relación entre la viscosidad y la temperatura se vuelve necesario para tal optimización. La rigidez del asfalto a cualquier temperatura se convierte en viscosidad mediante la ecuación 6. Los parámetros  $A_i$ -VTS $_i$  obtenidos por la normativa de ensayo ASTM se encuentra por regresión lineal en un gráfico log-log de viscosidad (centi-poise) y log de la temperatura ( $^{\circ}$ Rankine).

$$\eta = \frac{G^*}{10} \left( \frac{1}{\sin \delta} \right)^{4.8628} \quad \text{Ec. 6}$$

$$\log \log \eta = A + \text{VTS} \log T_R \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

$\eta$  = viscosidad del asfalto, cP  
 $G^*$  = modulo complejo de cortante, Pa  
 $\delta$  = ángulo de fase, grados  
 $A$ , VTS = parámetros de regresión  
 $T_R$  = temperatura,  $^{\circ}$ Rankine

La curva maestra para el nivel 2 es desarrollada usando el modelo de Witczak  $E^*$ , como se muestra en la ecuación 8 y para el nivel 3 no requiere ensayos de laboratorio para ligantes asfálticos, pero si, ciertas propiedades volumétricas.

$$\log E^* = -1.249937 + 0.02923\rho_{200} - 0.001767(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 - 0.058097V_a - 0.82208 \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + \frac{3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.00547\rho_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.313351 \log(f) - 0.393532 \log(\eta))}}$$

Ec. 8

Donde:

$E^*$  = módulo dinámico,  $10^5$  psi  
 $\eta$  = viscosidad del asfalto a la edad y temperatura de interés  $10^6$  Poise ( se recomienda el uso del RTFO para envejecimiento de corto plazo)  
 $f$  = frecuencia de carga, Hz  
 $V_a$  = vacíos de aire, %  
 $V_{beff}$  = contenido de asfalto efectivo, % por volumen  
 $\rho_{34}$  = % retenido acumulado en la malla 3/4 (19 mm)  
 $\rho_{38}$  = % retenido acumulado en la malla 3/8 in 9.5 mm  
 $\rho_4$  = % retenido acumulado en la malla #4 (4.76 mm)  
 $\rho_{200}$  = % pasando la malla #200 (0.075 mm)

## MÓDULO DINÁMICO EN EL LABORATORIO

Los especímenes utilizados en el ensayo de módulo dinámico y compactados mediante el uso del compactador giratorio deben contar a una altura nominal de 170.2 mm y un diámetro de 150 mm (Figura 3), para luego extraer un núcleo de 150 mm de altura por 100 mm de diámetro. Aunque la norma ASTM establece una relación 2 a 1 para la relación altura diámetro, para la elaboración de la nueva guía de diseño se permite aplicar la configuración antes mencionada.



**Figura 3. Proceso de preparación del espécimen de ensayo.**

En la norma ASTM D3497 se establece un mínimo de frecuencias (1, 4 y 16 Hz) y temperaturas (5, 25 y 40 °C) de ensayo para caracterizar una mezcla asfáltica. La carga aplicada debe producir un esfuerzo entre 0 y 240 kPa (35 psi), dentro de un intervalo de tiempo entre 30 y 45 segundos.

Para la instrumentación se utilizan una cantidad de deformímetros (LVDTs) que dependen de la exactitud que se quiera alcanzar, como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 1. Número de especímenes recomendados**

LVDTs por espécimen	Número de especímenes	Límite estimado de exactitud
2	2	18.0
2	3	15.0
2	4	13.4
3	2	13.1
3	3	12.0
3	4	11.5

Para el condicionamiento por temperatura previo al ensayo se recomienda cierto tiempo para que el espécimen alcance determinada temperatura, como se muestra en la Tabla 2. Siempre se recomienda contar con espécimen “tonto” con el cual verificar la temperatura (ver Figura 4).

**Tabla 2. Tiempo para alcanzar temperatura de ensayo.**

Temperatura °C	Tiempo en horas	Tiempo de temperaturas previas (horas)
-10	Toda la noche	-
4.4	Toda la noche	4 o toda la noche
21.1	1	3
37.8	2	2
54.4	2	1



Espécimen “tonto”

Espécimen instrumentado

**Figura 4. Instrumentación y condicionamiento de los especímenes.**

## **OPCIONES DE ANÁLISIS EN EL EQUIPO UTM**

### **Metodología IPC (empresa desarrolladora del equipo):**

El análisis por medio de esta metodología aplica una media móvil cada 15 puntos de aplicación de carga y desplazamiento. El valor máximo y mínimo valor para cada ciclo se calculan para determinar el esfuerzo y deformación dinámicos. El ángulo de fase se determina aplicando una interpolación cúbica y la técnica de bisección.

### **Metodología de la Universidad de Arizona (ASU):**

Esta metodología aplica una curva polinomial de segundo orden para determinar valores máximos y mínimos por cada ciclo y calcular esfuerzos y deformaciones dinámicos incluyendo el ángulo de fase. En la Figura 5 se observa el procedimiento de cálculo de carga y desplazamiento cuando se usan las metodologías IPC y ASU

### **Metodología desarrollada por NCHRP 9-29 (SPT):**

Este análisis considera una curva de mejor ajuste de la forma sinusoidal.

## **Cálculo de deformación unitaria axial (metodologías IPC y ASU)**

### Micro-deformación axial recuperable:

- Si el cálculo esta basado en el valor promedio entonces;

$$\epsilon_{Rax} = \frac{1000000 * \delta_{ax-ave}}{GL_{ax}}$$

Donde:

$\delta_{ax-ave}$  = Deformación recuperable (mm).  
 $GL_{ax}$  = longitud del indicador axial (mm)

- Si el cálculo está basado en valores individuales entonces;

$$\epsilon_{Rax} = \frac{1000000 * \delta_i}{GL_{ax}}$$

Donde:

$\delta_i$  = Deformación recuperable (mm).  
 $GL_{ax}$  = longitud del indicador axial (mm)



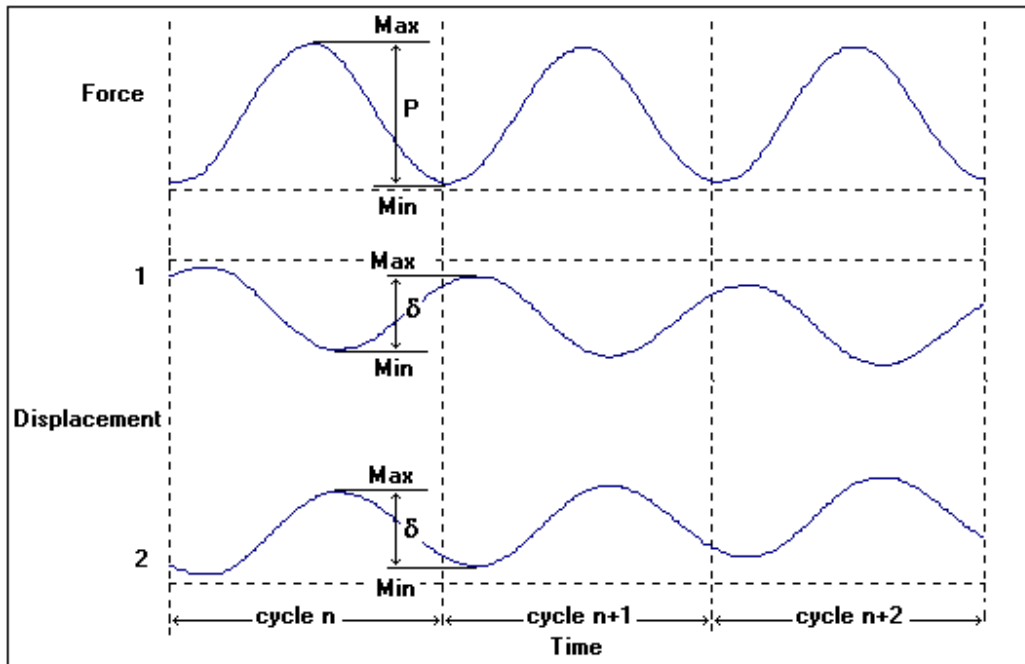


Figura 5. Cálculo de carga y desplazamiento (metodologías IPC y ASU).

Micro-deformación axial permanente:

**Caso 1** (ver Figura 5)

- Si el cálculo esta basado en el valor promedio entonces;

$$\varepsilon_{Pax} = \frac{1000000 * D_{ax-max}}{GL_{ax}}$$

Donde:

$D_{ax,max}$  = Desplazamiento máximo (mm)

$GL_{ax}$  = longitud del indicador axial (mm)

- Si el cálculo está basado en valores individuales entonces;

$$\varepsilon_{Pax} = \frac{1000000 * D_{i-max}}{GL_{ax}}$$

Donde:

$D_{i,max}$  = Desplazamiento máximo (mm)

$GL_{ax}$  = longitud del indicador axial (mm)

**Caso 2** (Ver Figura 5)

- Si el cálculo esta basado en el valor promedio entonces;

$$\epsilon_{Pax} = \frac{1000000 * D_{ax-min}}{GL_{ax}}$$

Donde:

$D_{ax\_min}$  = Desplazamiento mínimo (mm)

$GL_{ax}$  = longitud del indicador axial (mm)

Si el cálculo está basado en valores individuales entonces;

$$\epsilon_{Pax} = \frac{1000000 * D_{i-min}}{GL_{ax}}$$

Donde:

$D_{i\_min}$  = Desplazamiento mínimo (mm)

$GL_{ax}$  = longitud del indicador axial (mm)

### **Cálculo de deformación unitaria radial (metodologías IPC y ASU).**

Nota: Todos los cálculos de deformación radial están basados en los valores promedio.

#### Micro-deformación radial recuperable:

$$\epsilon_{Rrd} = \frac{1000000 * \delta_{rd-ave}}{GL_{rd}}$$

Donde:

$\delta_{rd\_ave}$  = deformación recuperable (mm).

$GL_{rd}$  = Radial gauge length (mm)

#### Micro-deformación radial permanente:

##### **Caso 1**

$$\epsilon_{Prd} = \frac{1000000 * D_{rd-max}}{GL_{rd}}$$

Donde:

$D_{rd\_max}$  = Desplazamiento máximo (mm)

$GL_{rd}$  = longitud del indicador radial (mm)

##### **Caso 2**

$$\epsilon_{Prd} = \frac{1000000 * D_{rd-min}}{GL_{rd}}$$

Donde:

$D_{rd\_min}$  = Desplazamiento mínimo (mm)

$GL_{rd}$  = longitud del indicador radial (mm)

### **Cálculo de esfuerzo axial (metodologías IPC y ASU).**

#### Esfuerzo dinámico (kPa)

$$\sigma = \frac{1000000 * P}{A}$$

Donde:

P = Carga dinámica (kN)

A = Área de la sección transversal del espécimen (mm<sup>2</sup>)

#### Módulo dinámico (MPa)

$$|E^*| = \frac{1000 * \sigma}{\epsilon_{Rax}}$$

Donde

$\epsilon_{Rax}$  = Micro-deformación axial recuperable:

### **Cálculo de ángulo de fase (metodologías IPC y ASU).**

Opción 1 (calculado de puntos máximos y mínimos)

$$\phi = \left( \frac{t_i}{t_p} \right) * 360$$

Donde:

$t_i$  = tiempo transcurrido entre el máximo esfuerzo y la mínimo (o máxima) deformación unitaria. (ver Figura 6)

$t_p$  = Periodo de ciclo de carga (seg).

Opción 2 (calculado a partir de valores medios)

$$\phi = \left( \frac{t_{ave}}{t_p} \right) * 360$$

Donde:

$t_{ave} = (t_1 + t_2) / 2$

$t_1$  = tiempo transcurrido entre los primeros puntos medios del ciclo

$t_2$  = tiempo transcurrido entre los segundos puntos medios del ciclo

$t_p$  = Periodo de ciclo de carga (seg).

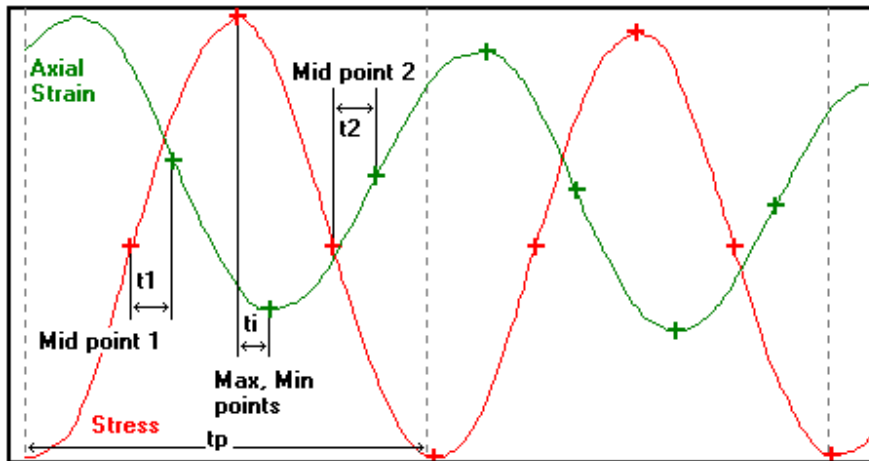


Figura 6. Cálculo del ángulo de fase.

### Ejemplo de aplicación de construcción de curvas maestras

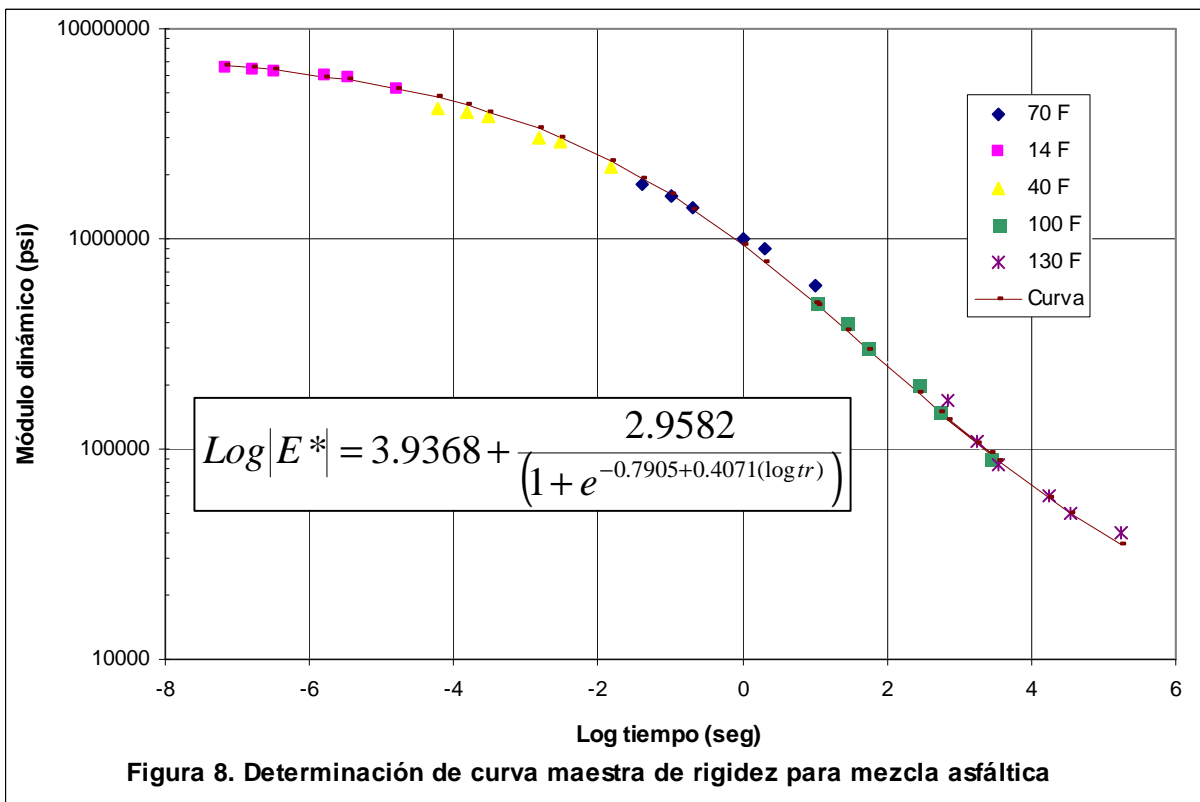
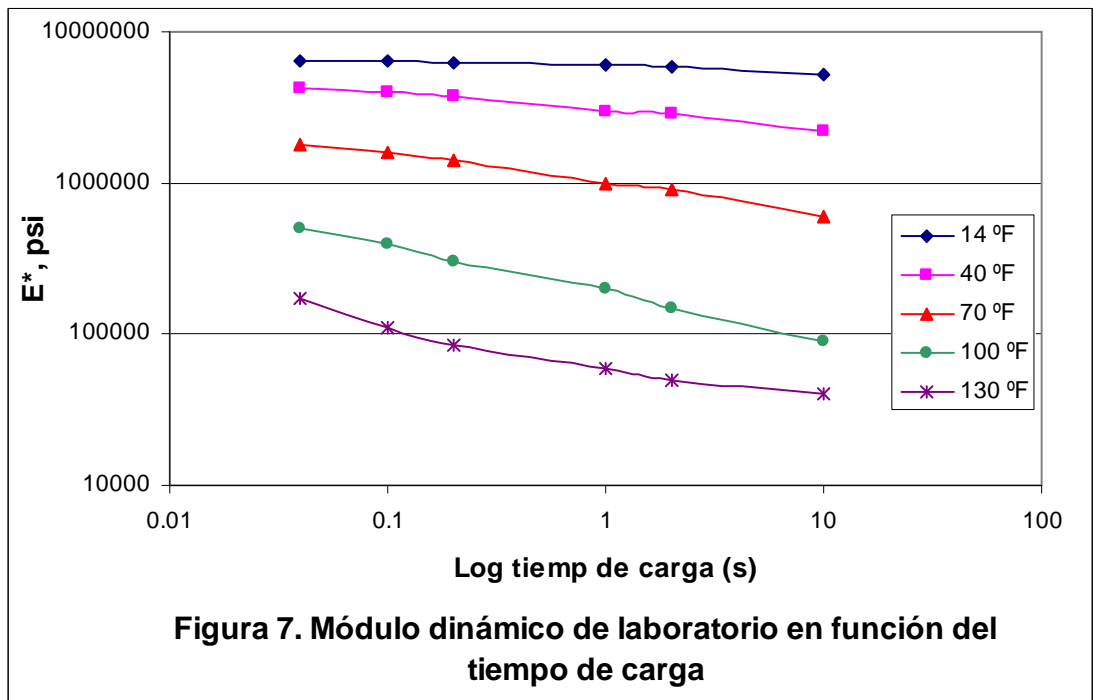
En la siguiente tabla se muestra un ensayo completo de módulo dinámico (psi) para 5 temperaturas y 6 frecuencias de carga (Hz).

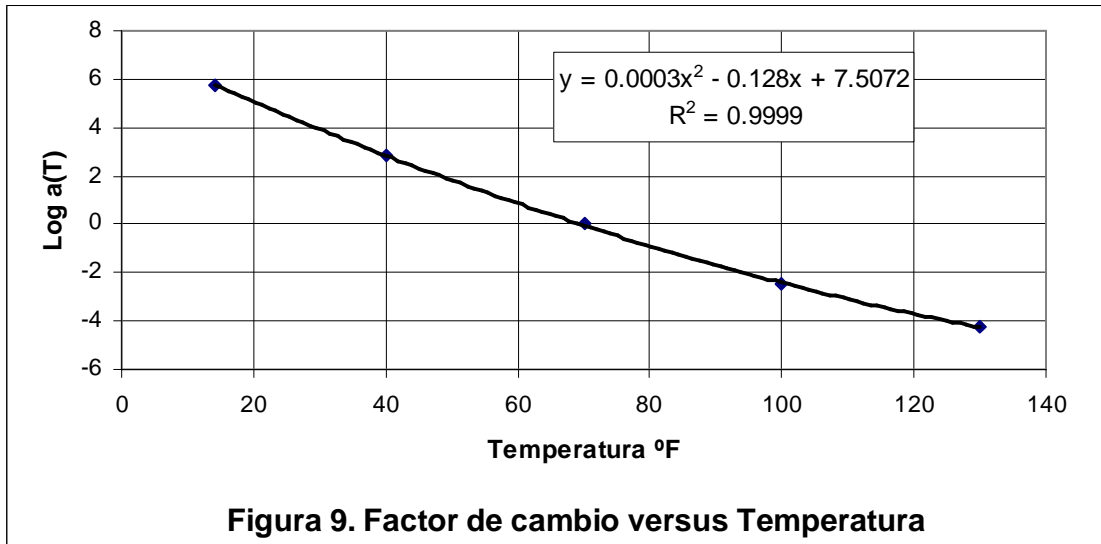
Tabla 3. Valores de  $E^*$  obtenidos en el laboratorio en psi

Tiempo de carga (seg)	Temperatura				
	14	40	70	100	130
0.04	6500000	4200000	1800000	500000	170000
0.1	6400000	4000000	1600000	400000	110000
0.2	6200000	3800000	1400000	300000	85000
1.0	6000000	3000000	1000000	200000	60000
2.0	5900000	2900000	900000	150000	50000
10	5200000	2200000	600000	90000	40000

En la Figura 7, se muestran las curvas de módulo dinámico en función del tiempo de carga, ambos en escala logarítmica, a diferentes temperaturas.

Para la realización de la curva maestra se procede a superponer las curvas tomando como curva de referencia la más cercana a la temperatura ambiente, en este caso la de 70 °F, para esto se aplica un factor de cambio con el objetivo de desplazar las curvas a un nuevo intervalo de tiempo. La Figura 7 muestra la curva maestra final obtenida al aplicar la superposición y la Figura 8 muestra el factor de cambio aplicado como función de la temperatura.





## REFERENCIAS

2002 Pavement Design Guide. NCHRP Project 1-37A. July 2004.

Charles E. Dougan, E\* - **DYNAMIC MODULUS Test Protocol – Problems and Solutions**. University of Connecticut. April 2003.

W. Witczak. **DEVELOPMENT OF A MASTER CURVE (E\*) DATABASE FOR LIME MODIFIED ASPHALTIC MIXTURES**. Arizona State University, July 2004.