

ESTUDIO DEL MÓDULO DINÁMICO COMPLEJO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS. DESARROLLO DE CURVAS MAESTRAS.1^{RA} PARTE.

Autor: Ing. Fabricio Leiva Villacorta

Universidad de Costa Rica. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos
Estructurales (LANAMME)

Tel: (506) 207-5423 correo electrónico: fleiva@lanamme.ucr.ac.cr

Resumen

El desarrollo de esta etapa del estudio comprende un análisis del ensayo de módulo complejo dinámico (AASHTO TP 62-03 y ASTM D 3497), como una forma de conocer el ensayo e introducir el desarrollo de curvas maestras de mezclas asfálticas, con las cuales se tiene caracterizada la resistencia del material (módulo del material) a diferentes temperaturas y frecuencias de carga.

Como producto final se obtendrá la evaluación de una de las técnicas de obtención del módulo de mezclas asfálticas, para poder ser utilizada en una futura guía de diseño para Costa Rica.

1. 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.

1.1 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 (ω).

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

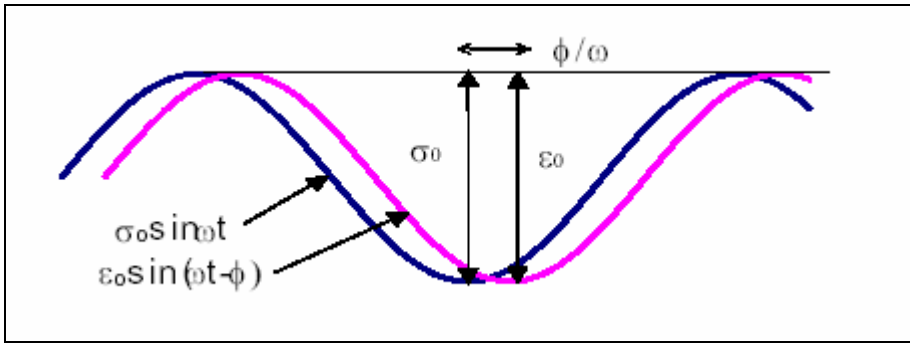


Figura 1. Módulo dinámico.

$$E^* = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\epsilon_0 e^{i(\omega t - \phi)}} = \frac{\sigma_0 \sin \omega t}{\epsilon_0 \sin(\omega t - \phi)} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

- σ_0 = esfuerzo pico (máximo)
- ϵ_0 = deformación unitaria pico (máxima)
- ϕ = ángulo de fase (grados)
- ω = velocidad angular
- t = tiempo, segundos

Matemáticamente, el módulo dinámico se define como el valor absoluto del módulo complejo: $|E^*| = \sigma_0 / \epsilon_0$.

Las principales variables respuesta del ensayo son el módulo dinámico $|E^*|$, y el ángulo de fase ϕ , 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:

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

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
 δ = mínimo valor de E^*
 $\delta + \alpha$ = máximo valor de E^*
 β, γ = parámetros que describen la función sinusoidal
 α = 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 interés, °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):

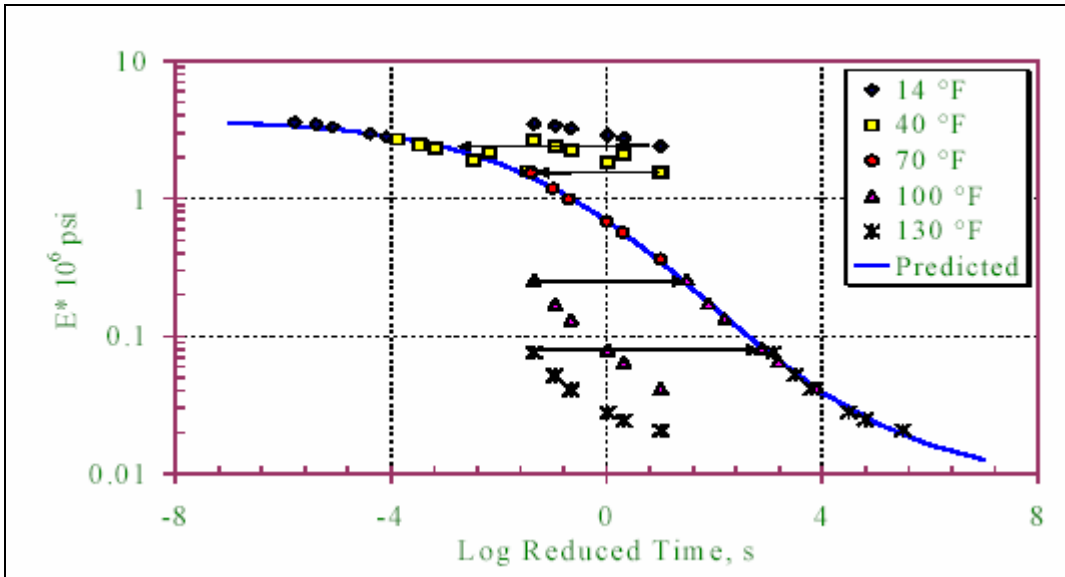


Figura 2. Ejemplo de construcción de curvas maestras.

3. 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 necesaria 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).

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

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

Donde:

- η = viscosidad del asfalto, cP
- G^* = modulo complejo de cortante, Pa
- δ = 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

η = 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

ρ_{34} = % retenido acumulado en la malla 3/4 (19 mm)

ρ_{38} = % retenido acumulado en la malla 3/8 in 9.5 mm

ρ_4 = % retenido acumulado en la malla #4 (4.76 mm)

ρ_{200} = % pasando la malla #200 (0.075 mm)

4. Módulo dinámico en el laboratorio

Los especímenes utilizados en el ensayo de módulo dinámico que son 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

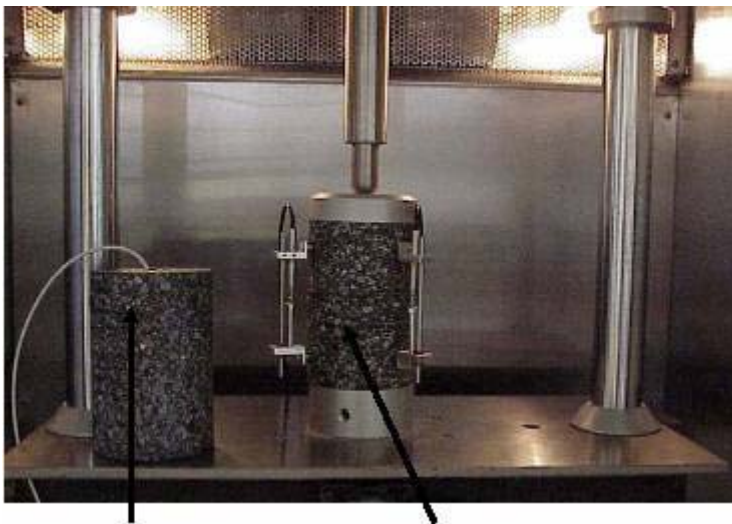


Figura 4. Instrumentación y condicionamiento de los especímenes.

Espécimen “tonto”

Espécimen instrumentado

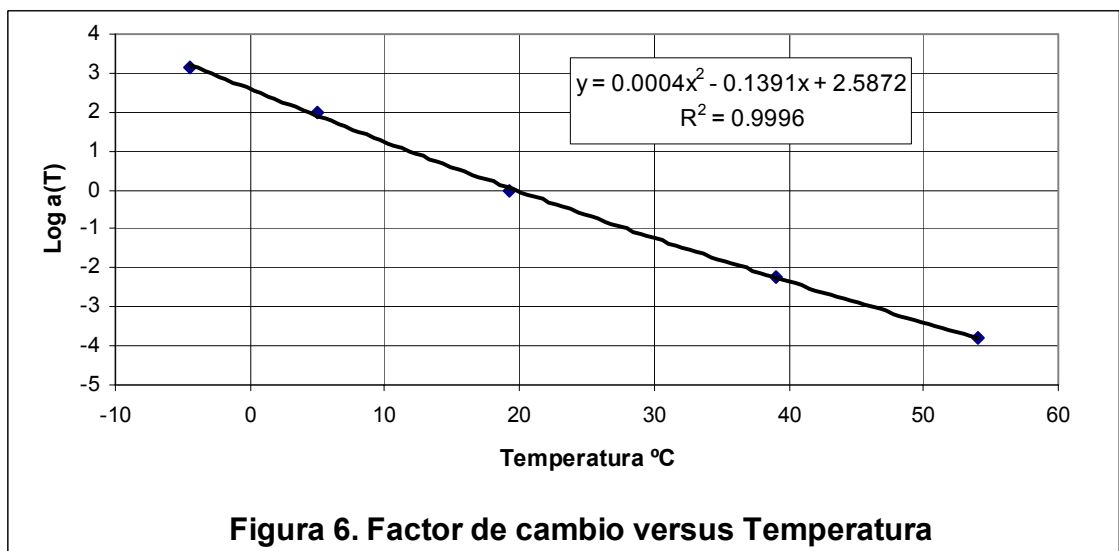
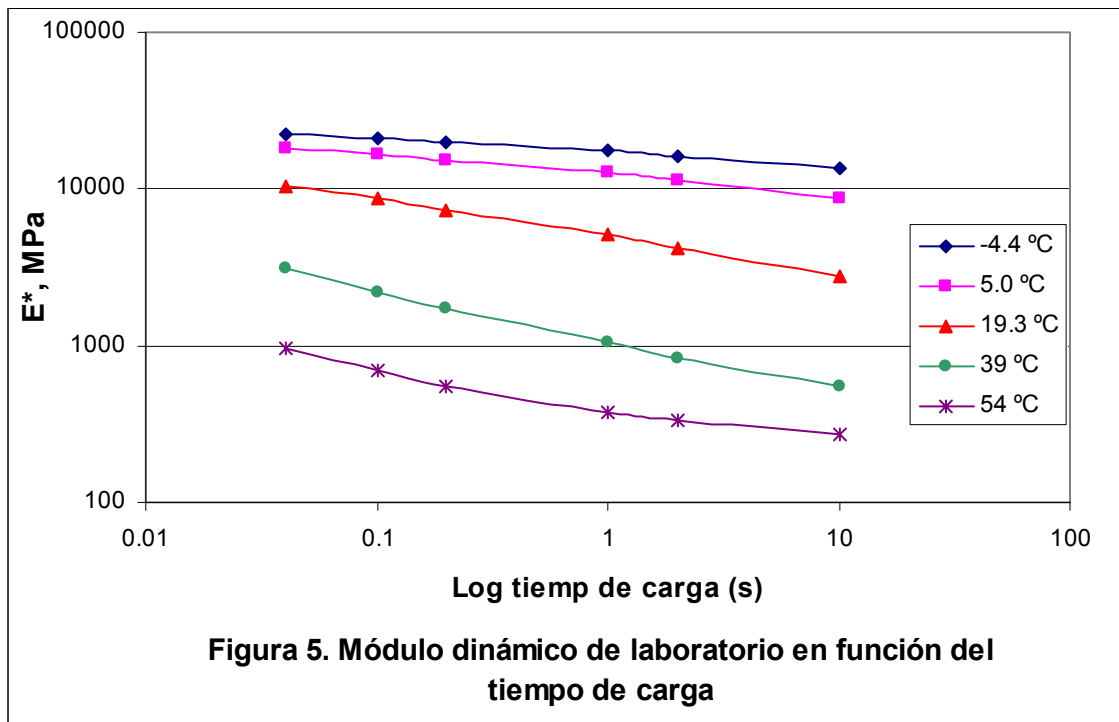
5. Ensayo de muestras elaboradas a partir de mezcla de planta

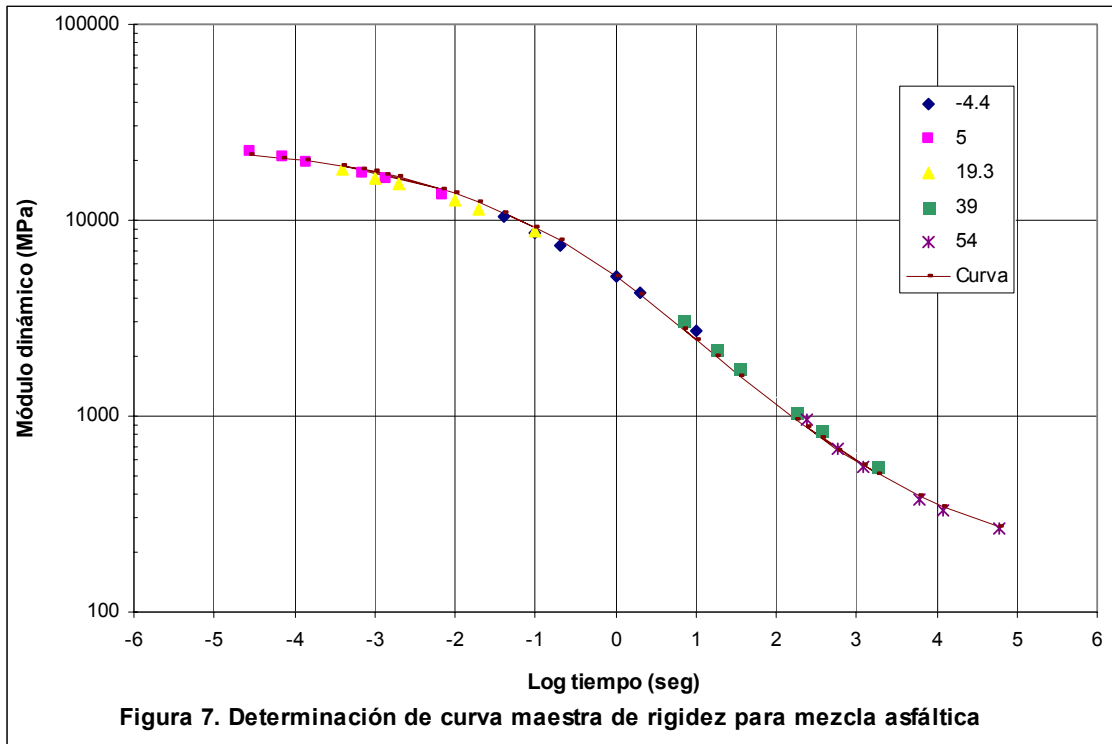
En esta primera etapa se realizan ensayos de módulo dinámico a muestras elaboradas en planta y compactadas con el compactador giratorio Superpave. En la Tabla 3 se muestran propiedades de los agregados, de las mezclas y otros ensayos realizados en el laboratorio. En el caso que se indica laboratorio, se refiere a especímenes elaborados con el compactador giratorio, mientras que los que se indican como de campo son núcleos extraídos del sitio.

Tabla 4. Caracterización de la materia prima de las mezclas evaluadas.

ID	0026-04	0134-04	0940-03	0674-04	710-04	712-04
Agregados						
Caras fracturadas (2 ó más)	100%	97%	100%	98%	97%	97%
Equivalente de Arena	72	75	55	63	61	61
Vacios no compactados	42.3	42.4	36	38.1	31.5	31.5
Gbs	2.81	2.63	2.55	2.62	2.65	2.65
Absorción	2.2	1.9	2.8	1.7	1.5	1.5
Granulometría	Planta					
19 mm	98	100	100	100	100	100
12,5mm	80	82	91	93	92	92
9,5 mm	66	68	82	85	79	79
No.4	41	43	50	54	52	52
No.8	26	27	31	32	38	38
No,16	18	18	20	22	26	26
No.30	13	12	13	16	19	19
No.50	10	9	10	11	13	13
No.200	4.53	5.25	4.9	5.5	6.8	6.8
Contenido de asfalto	Planta					
%PTA	5.49	5.49	7.07	5.67	5.83	5.83
%PTM	5.20	5.20	6.60	5.37	5.51	5.51
Deformación permanente Laboratorio						
Vacios (%)	7.3	6.7	7.4	5.6	5.3	3.5
Deformación permanente (mm)	3.2	1.8	2.6	4.1	3.5	3.4
Deformación permanente campo						
Vacios (%)	10.4	11.1	7.9	5.7	6.9	2.9
Deformación permanente (mm)	8.8	5.7	5.3	7.8	7.5	6.0
Módulo resiliente (Tensión Indirecta)						
(MPa)	4307	6417	4592	3811	3981	4307
Módulo resiliente campo						
(MPa)	1989	1800	1999	1568	1406	1767
Resistencia Retenida por Tensión Indirecta (%)						
Seco (MPa)	1528	1287	1236	1142	1072	1143
condicionado (MPa)	1258	1058	956	1110	941	1015
%RRTD	82	82	77	97	88	89

En las figuras siguientes se muestra el proceso de creación de las curvas maestras para la muestra 0026-04, en la Figura 5 se presentan los valores de módulo (MPa) en función de la frecuencia, para varias temperaturas; en la Figura 6 se muestra la relación entre el factor de cambio y la temperatura, para finalmente obtener la curva maestra como se observa en la Figura 7, la cual se aproxima al desplazamiento de las curvas originales considerando la curva base la más cercana a la temperatura ambiente (20 °C).

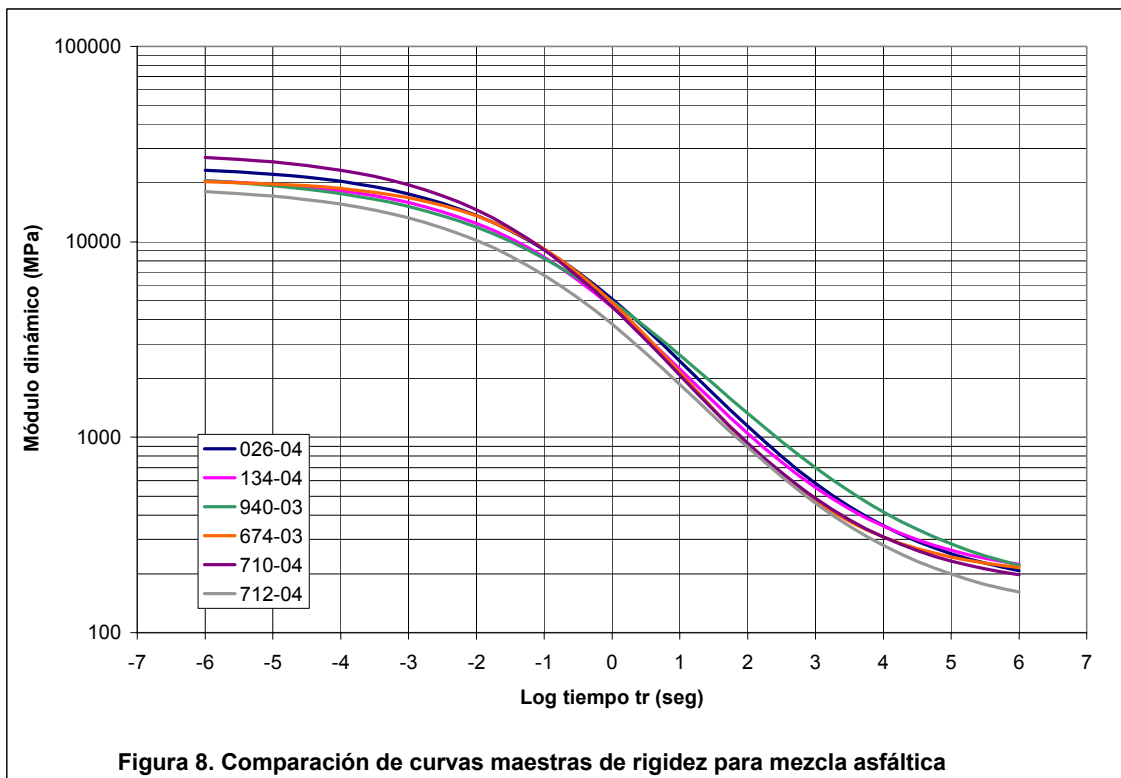


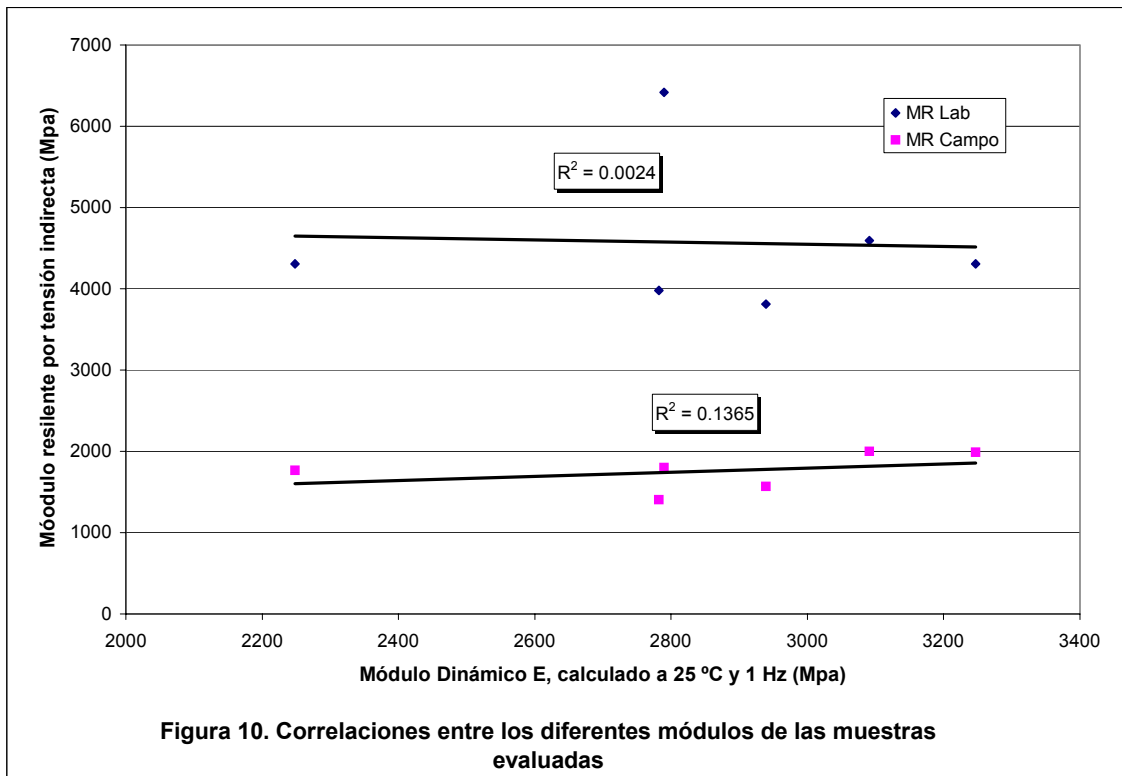
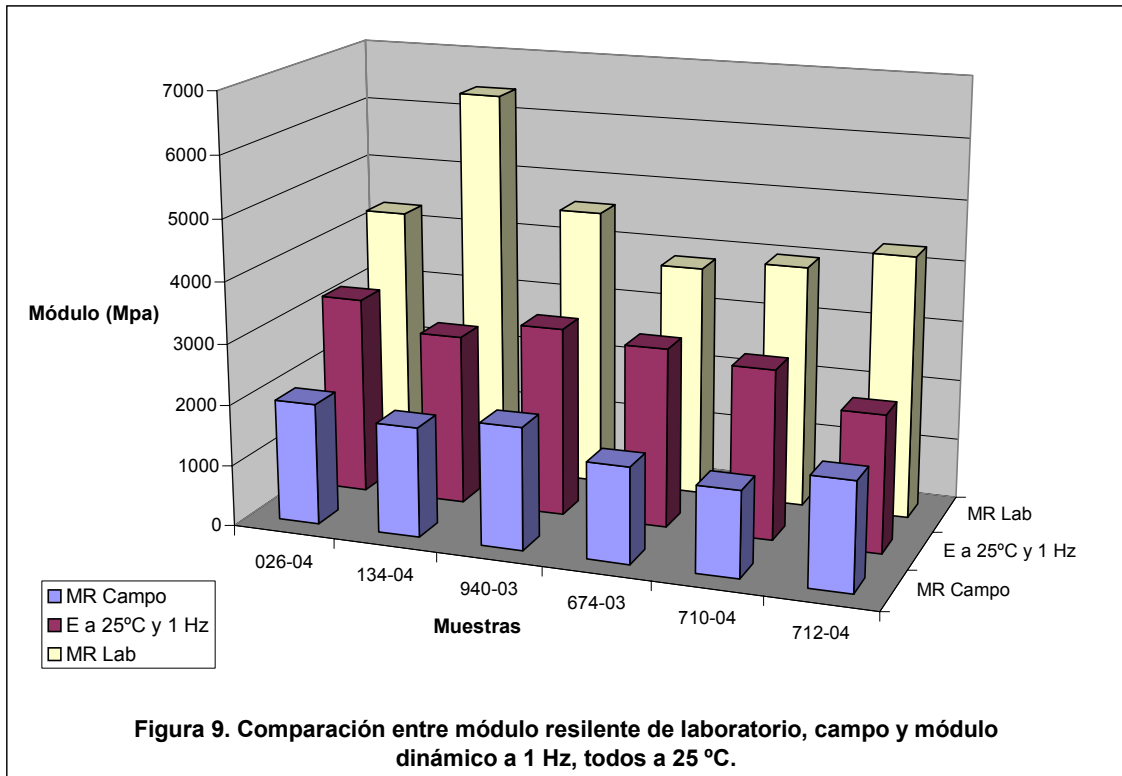


En la Tabla 5 se muestran los resultados correspondientes a los coeficientes que conforman las ecuaciones de curva maestra para las 6 muestras de planta (ver Figura 8), además de los coeficientes que corresponden a la relación de factor de cambio en función de la temperatura. De igual forma se incluye el valor de módulo dinámico calculado a una temperatura de 25°C y una frecuencia de 1Hz, para compararlo con los resultados de módulo resiliente por tensión indirecta de los especímenes moldeados en laboratorio y los extraídos de campo, y como se observa en la Figura 9 y se reafirma en la Figura 10, no existe buena correlación entre los valores de módulo, tanto resiliente como dinámico.

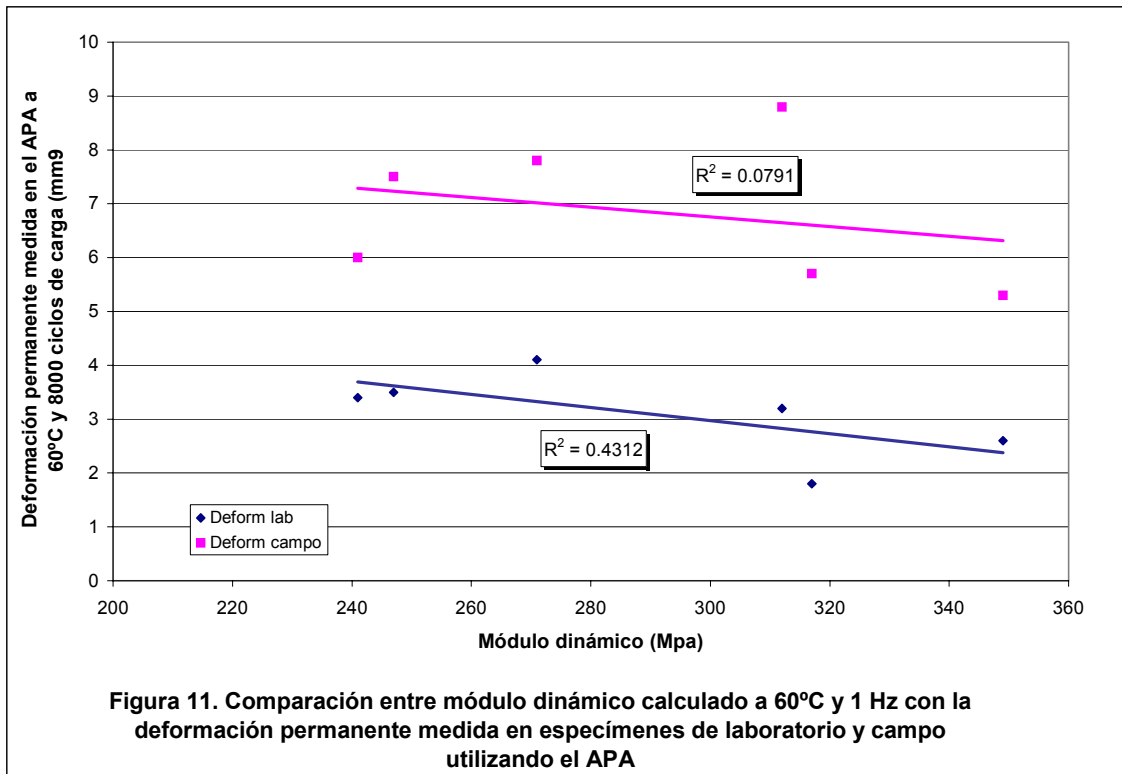
Tabla 5. Caracterización de la mezcla asfáltica para módulo dinámico complejo.

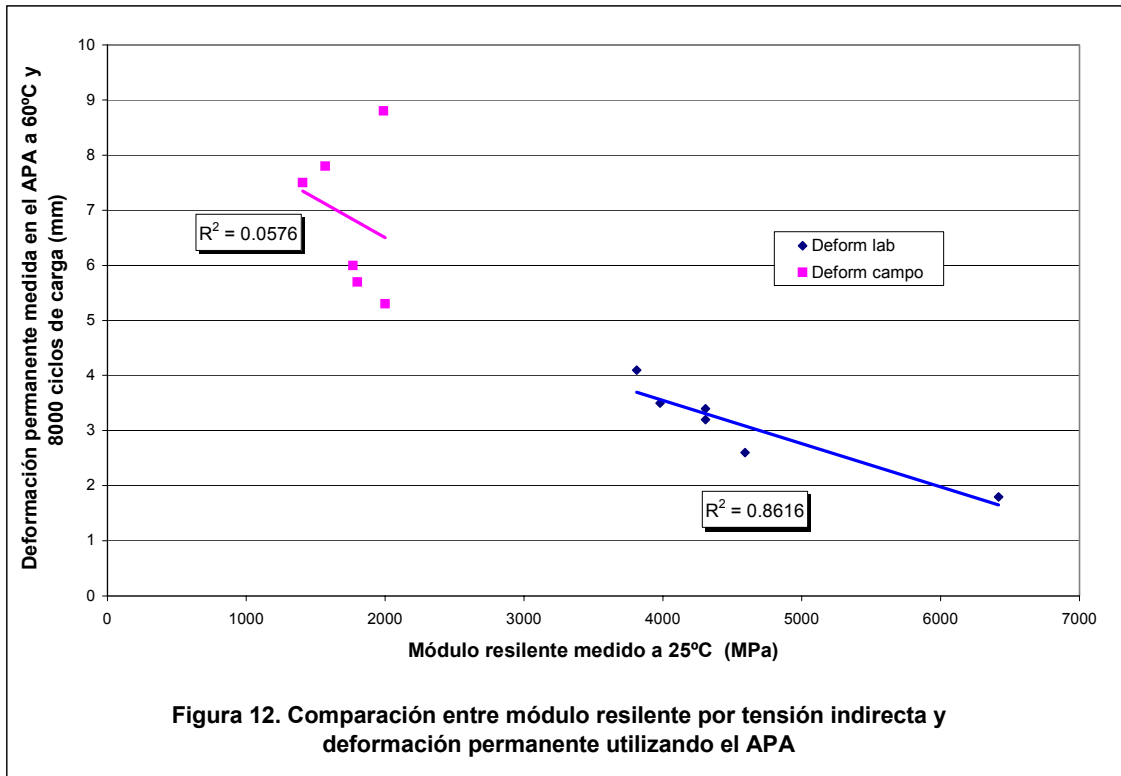
ID	026-04	134-04	940-03	674-03	710-04	712-04
Vacios (%)	7.5	9.2	6.4	5.1	5.9	4.7
δ	2.20763	2.26436	2.17263	2.28455	2.2115	2.0811
α	2.18152	2.06788	2.1725	2.03301	2.2448	2.2051
β	-0.78912	-0.74431	-0.85026	-0.80795	-0.6125	-0.7499
γ	0.62002	0.64804	0.55102	0.74815	0.64199	0.5912
a	4.00E-04	5.00E-04	3.00E-04	2.00E-04	3.00E-04	4.00E-04
b	-0.1391	-0.1457	-0.1302	-0.1264	-0.1415	-0.1379
c	2.5872	2.6447	2.3228	2.3986	2.6826	2.4491
E* a 25°C y 1 Hz	3247	2790	3091	2939	2782	2248





También se trató de establecer una correlación entre la deformación permanente medida en el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) aplicando 8000 ciclos de carga, y a una temperatura de 60°C, con respecto al módulo dinámico calculado a la misma temperatura y a una frecuencia de 1 Hz, que como se observa en la Figura 11 se determinó una mejor correlación con los especímenes moldeados en el laboratorio, aunque esta correlación se ve mejorada cuando se considera el módulo resiliente de las muestras de laboratorio y la deformación, como se observa en la Figura 12.





6. Conclusiones y recomendaciones

Para el tipo de muestras producidas en planta utilizadas en esta etapa del estudio, se tiene la limitante que de una forma menos controlada, pero más real, se elabora mezcla asfáltica con propiedades más variables que las producidas en laboratorio. Esta etapa comprendía un estudio de aprendizaje del ensayo de laboratorio y la creación de las curvas maestras de rigidez de la mezcla asfáltica, además de aprovechar otros ensayos realizados y compararlos con los resultados primarios de esta investigación.

Para las muestras ensayadas en este estudio no se encontró una buena correlación entre módulo dinámico y módulo resiliente a las mismas condiciones de carga y temperatura. Por otro lado al comparar el módulo dinámico a la misma frecuencia y temperatura de carga del ensayo de deformación plástica en el Analizador de Pavimentos Asfálticos (60°C y 1 Hz), se obtuvo una buena correlación ($R=0.656$) y como se esperaba, conforme aumenta el módulo dinámico es de esperar una reducción de la deformación plástica con la aplicación de ciclos de carga, aunque el módulo resiliente de los especímenes de laboratorio son los que presentan mayor correlación con la deformación ($R=0.928$) con la misma tendencia que el anterior.

La posibilidad de obtener un módulo de la mezcla asfáltica, a cualquier temperatura y frecuencia de carga es una ventaja que presenta el desarrollo de curvas maestras de rigidez, ya que se sabe de la teoría que esta rigidez varía con la temperatura y la velocidad de carga que se le imponga a la mezcla y principalmente al ligante asfáltico, es así que aunque se tiene una buena correlación entre deformación plástica y módulo resiliente por tensión, este último no sería representativo del comportamiento de la mezcla ante una temperatura de 60°C.

Es importante destacar que el módulo dinámico refleja de una forma más real el efecto de la aplicación de cargas, donde tanto el esqueleto mineral como el ligante son los encargados de la resistencia de estas cargas, mientras que un módulo resiliente por tensión considera prioritariamente los efectos sobre el ligante (cohesión) y las interacciones con el agregado (adherencia ligante – agregado).

En las siguientes etapas se espera contar con una mayor cantidad de muestras de este tipo, para valorar de una forma estadística más confiable efectos de las propiedades de la materia prima y efectos volumétricos sobre parámetros respuesta, además de contar con especímenes de laboratorio y repetir el elaborado proceso mencionado anteriormente.

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.