

IAG60-03-2013
CALIBRACIÓN DEL ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO, MEDIANTE
ENSAYOS INTERLABORATORIALES Y LOS MODELOS DE LA
GUÍA MECANÍSTICO-EMPÍRICA DE LA AASHTO EN COSTA RICA
CALIBRAÇÃO DO ENSAIO DE MODULO DINÂMICO POR ENSAIOS
INTERLABORATORIAIS E MODELOS DO GUIA EMPIRICO-
MECANICISTA DA AASHTO NA COSTA RICA

Ing. Adriana Vargas Nordbeck, Ph.D., MBA
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica,
E-mail: adriana.vargasnordbeck@ucr.ac.cr

Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D.
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica,
E-mail: jose.aguiar@ucr.ac.cr

Ing. Fabricio Leiva Villacorta, Ph.D., MBA
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica,
E-mail: fabricio.leiva@ucr.ac.cr

Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, Ph.D.
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica,
E-mail: luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

Resumen

La necesidad de diseñar pavimentos más durables y de mejor desempeño, ha generado el inicio de un cambio a nivel mundial para hallar mejores metodologías para su diseño y evaluación, con miras a evaluar las mezclas mediante ensayos mecanicistas y modelos de desempeño, en lugar de utilizar únicamente formulas empíricas ampliamente conocidas. Uno de los modelos que se está utilizando cada vez más, es el del Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas, para analizar la resistencia a la deformación de éstas hacia cargas dinámicas. El Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) en conjunto con el Dr. Matthew W. Witczak y el laboratorio GCTS en Arizona, Estados Unidos, realizó un estudio con tres mezclas densas de diferentes granulometrías y tamaños máximos nominales de agregado, para determinar la repetibilidad del ensayo, así como evaluar el ajuste de estos resultados con los modelos de Módulo Dinámico que fueron introducidos a la AASHTO por el mismo Dr. Witczak. Este estudio permitió identificar un procedimiento de ensayo estándar acorde con las normas existentes. Se pretende que los resultados obtenidos en el futuro sean utilizados en Costa Rica para introducir un nuevo modelo de desempeño de mezclas asfálticas adecuado para los materiales propios del país, con miras a la implementación de una guía de diseño de pavimentos mecánico-empírica calibrada para las condiciones propias de Costa Rica y otros países que cuenten con características similares.

Resumo

A necessidade de dimensionar pavimentos mais duráveis e com melhor desempenho, tem gerado o início de uma mudança global para encontrar melhores métodos para seu desenho e avaliação, a fim de avaliar as misturas asfálticas por meio de ensaios mecanicistas e modelos de desempenho, ao invés de usar só fórmulas empíricas amplamente conhecidas. Um dos modelos que está sendo usado cada vez mais, é o Módulo Dinâmico de Misturas Asfálticas, para analisar a resistência à deformação destas misturas com cargas dinâmicas. O Laboratório Nacional de Materiais e Modelos Estruturais (LanammeUCR), juntamente com o Dr. Matthew W. Witczak e o laboratório GCTS em Arizona nos Estados Unidos, realizou um estudo com três misturas asfálticas de graduação densa, com diferentes graduações e tamanhos máximos nominais dos agregados, para determinar a repetibilidade do ensaio, e avaliar o ajuste desses resultados com os modelos de módulo dinâmico que foram introduzidas à AASHTO pelo mesmo Dr. Witczak. Este estudo permitiu identificar um procedimento de ensaio padrão de acordo com as normas existentes. Pretende-se que os resultados obtidos, sejam usados no futuro na Costa Rica para introduzir um novo modelo de desempenho de misturas asfálticas adequado para os materiais próprios do país, com vista à implementação de uma Guia de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos calibrada para as condições da Costa Rica e outros países com características semelhantes.

INTRODUCCIÓN

El módulo del pavimento (Resiliente o Dinámico) es una propiedad importante del material en cualquier procedimiento mecánico de diseño y análisis de pavimentos flexibles. De hecho, el módulo resiliente es la propiedad del material requerido en el procedimiento empírico de diseño de la Guía de Diseño AASHTO 1993 (AASHTO, 1993) y es uno de los principales parámetros de entrada en la Guía de Diseño Mecánico – Empírico 2002 (AASHTO, 2002). El parámetro módulo se ha constituido como un elemento fundamental en el diseño de pavimentos; por lo que ha sido introducido como un elemento que caracteriza de manera racional el comportamiento esfuerzo – deformación de los materiales que conforman la estructura.

El módulo complejo dinámico $|E^*|$ define la relación esfuerzo – deformación bajo una carga senoidal continua. El módulo dinámico se define como la razón de la amplitud del esfuerzo senoidal (a cualquier tiempo, t , y frecuencia de carga angular, ω), $\sigma = \sigma_o \sin(\omega t)$ y la amplitud de la deformación senoidal al mismo tiempo y frecuencia, esto se observa en la siguiente ecuación:

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_o * \sin(\omega t)}{\varepsilon_o * \sin(\omega t - \phi)} \quad (1)$$

donde σ_o es el esfuerzo máximo, ε_o la deformación máxima, ϕ el ángulo de fase (grados), ω la velocidad angular y t el tiempo (segundos).

Las propiedades del módulo de mezclas asfálticas son función de: temperatura, razón de carga, envejecimiento y características de la mezcla como viscosidad y contenido del ligante, granulometría del agregado y vacíos. En el diseño mecanístico-empírico el módulo de una mezcla asfáltica, para todos los niveles de entrada, se obtiene a partir de una curva maestra que se construye utilizando el principio de superposición tiempo-temperatura. Primero, se selecciona una temperatura estándar de referencia (en este caso 21 °C (70 °F)) y luego se ajustan los datos de varias temperaturas con respecto al tiempo hasta que las curvas se unan en una única función suavizada como se muestra en la Figura 1:

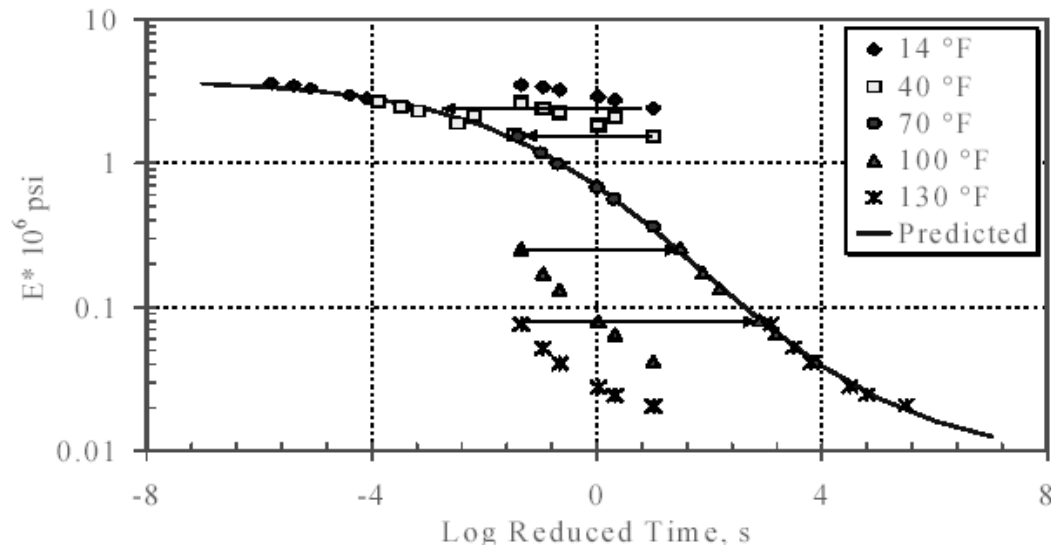


Figura 1: Curva maestra del módulo dinámico (E^*) (AASHTO, 2002)

La magnitud del ajuste de cada dato de temperatura requerido para formar la curva maestra describe la dependencia del material de la temperatura; mientras que la curva maestra del módulo como una función del tiempo de carga construida de esta forma, describe la dependencia del material de la velocidad de carga (del tiempo). De esta manera, la curva maestra se modela matemáticamente así:

$$\text{Log}|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log t_r)}} \quad (2)$$

donde:

t_r = tiempo reducido de carga a la temperatura de referencia.

δ = valor mínimo de E^* .

$\delta + \alpha$ = valor máximo de E^* .

β, γ = parámetros que describen la forma de la función senosoidal.

OBJETIVO

El objetivo principal de este estudio fue determinar la repetibilidad del ensayo de módulo dinámico de mezclas asfálticas, así como evaluar el ajuste de estos resultados con los modelos de la AASHTO.

METODOLOGÍA

Para cumplir con los objetivos establecidos, se realizaron pruebas de módulo dinámico a tres mezclas densas de diferente granulometría, típicas de las mezclas utilizadas en Costa Rica. Dos de las mezclas fueron diseñadas con agregado de tamaño máximo nominal de 12.5 mm, una con graduación fina (12.5 F) y la otra con graduación gruesa (12.5 C). La última es una mezcla de 9.5 mm con graduación gruesa (9.5 C). Para cada una de ellas, se prepararon un total de 10 especímenes, de los cuales 5 se ensayaron en el LanammeUCR (UCR de forma simplificada) y 5 fueron enviados al laboratorio de GCTS en Arizona, Estados Unidos para ser ensayados allá. Las pruebas se realizaron a cinco temperaturas (-10, 4.4, 21.1, 37.8, and 54.4 °C) y seis frecuencias (25, 10, 5, 1, 0.5 y 0.1 Hz), de acuerdo al procedimiento descrito por la norma AASHTO TP 62 (AASHTO, 2005). Adicionalmente, se realizó un proceso extensivo de control de calidad de los datos a fin de establecer la validez de los resultados obtenidos.

RESULTADOS

La Tabla 1 muestra las granulometrías y propiedades volumétricas de las mezclas analizadas en este estudio. Las tres mezclas fueron diseñadas con la metodología Superpave considerando una fuente de agregado con un único tipo de asfalto con grado de desempeño PG 64-22.

Tabla 1: Propiedades de las mezclas evaluadas

Malla (US)	Malla (mm)	12,5 F	12,5 C	9,5 C
1 1/2"	37	100	100	100
1"	25	100	100	100
3/4"	19	100	100	100
1/2"	12.5	93.2	95.2	100
3/8"	9.5	85.9	75.0	94.7
Nº 4	4.75	64.2	50.3	50.3
Nº 8	2.36	47.6	36.4	38.4
Nº 16	1.18	33.1	24.3	28.1
Nº 30	0.6	22.4	15.4	20.3
Nº 50	0.3	15.6	10.7	14.2
Nº 100	0.15	10.1	7.0	9.2
Nº 200	0.075	6.4	4.4	5.8
Contenido de asfalto, %		6.2	5.7	5.6
Vacíos Aire, %		7.0	7.5	7.5
VMA		18.5	17.6	17.3
VFA		62.3	57.3	56.8

La Figura 2 muestra la comparación de los valores E^* obtenidos en ambos laboratorios (GCTS y UCR) para las 3 mezclas analizadas. Aquí se puede observar que los valores obtenidos en GCTS son mayores que los obtenidos en UCR para todas las temperaturas y frecuencias. En promedio se obtuvo una razón de módulo dinámico GCTS/UCR de 1.447 llegando hasta 3.0 para combinaciones de altas temperaturas y bajas frecuencias; y hasta 1.05 para combinaciones de baja temperaturas y altas frecuencias. Finalmente, al observar

la variabilidad de datos por laboratorio se obtuvo un mayor coeficiente de variabilidad para los valores obtenidos en GCTS con $CV = 6.67\%$ versus un $CV = 4.84\%$ para el laboratorio UCR.

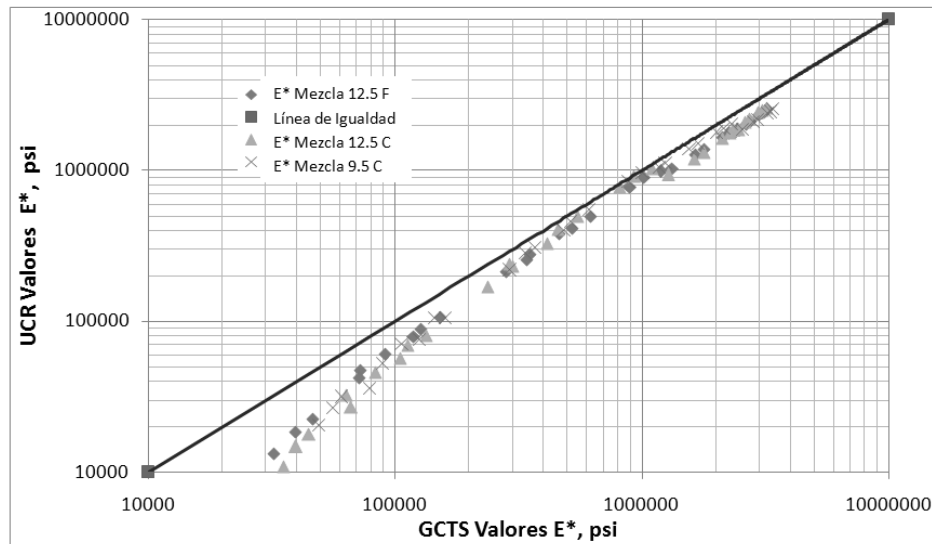


Figura 2: Relación entre valores E^*

La Figura 3 muestra la comparación de los valores de ángulo de fase obtenidos en ambos laboratorios (GCTS y UCR) para las 3 mezclas analizadas. Aquí se puede observar que los valores obtenidos en GCTS fueron en su mayoría menores que los obtenidos en UCR para todas las temperaturas y frecuencias. En promedio se obtuvo una razón de módulo dinámico GCTS/UCR de 0.889 llegando hasta 0.647 para la mezcla 12.5C y hasta 0.952 para la mezcla 9.5C. Finalmente, al observar la variabilidad de datos por laboratorio, nuevamente se obtuvo un mayor coeficiente de variabilidad para los valores obtenidos en GCTS con $CV = 5.38\%$ versus un $CV = 4.37\%$ para el laboratorio UCR.

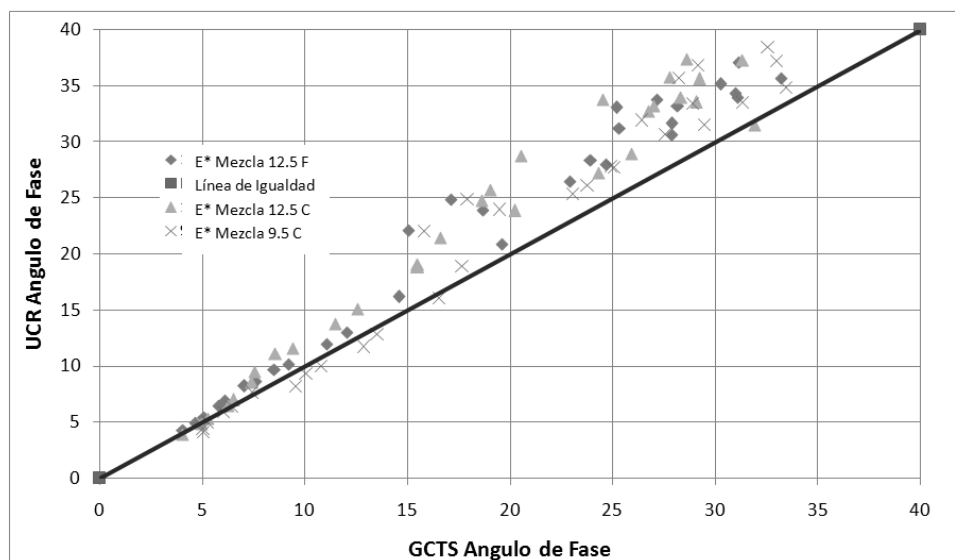


Figura 3: Relación entre ángulos de fase

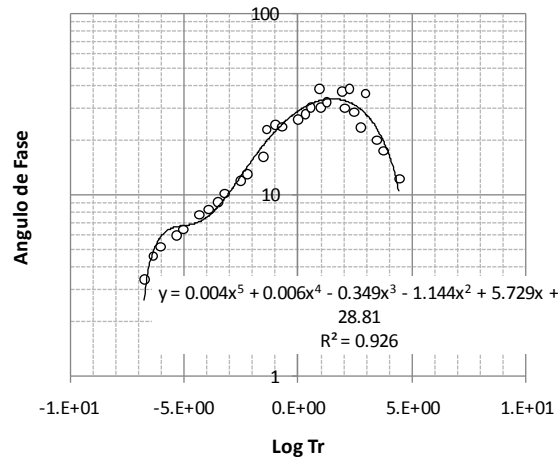
Basado en los resultados anteriores se determinó que existe una diferencia significativa entre equipos de laboratorio para ambos resultados (E^* y ángulo de fase) para todos los rangos de temperatura y frecuencia, independientemente del tipo de mezcla evaluado. Con esto en mente, se estableció una nueva línea de investigación para determinar la causa de las diferencias encontradas y tratar de minimizar las diferencias en futuros ensayos inter-laboratoriales.

Control de calidad de los resultados

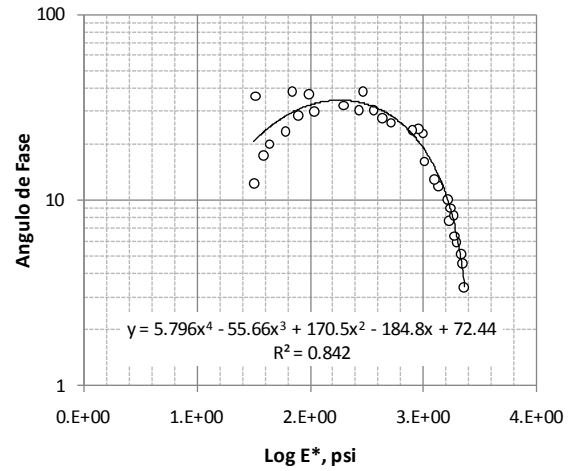
Como primer paso a seguir para tratar de establecer las causas de las diferencias encontradas se procedió a la realización de verificaciones de “control de calidad” para los resultados de ensayo. Adicionalmente, esta metodología es un elemento fundamental que se adoptó para futuras aplicaciones en el laboratorio. El proceso de verificación comienza con emprender un análisis de resultados de ensayos mediante una serie de programas de análisis de datos que permita visualmente ver y evaluar el esparcimiento de sus resultados de ensayo. Esta es una herramienta preliminar que es de gran ayuda instantánea para verificar la “calidad” de los resultados de ensayo. Hay 6 series de análisis, asociadas con el ensayo de E^* :

1. La relación entre el ángulo de fase y el log del tiempo reducido
2. La “Curva Negra” que ilustra la relación entre el Log E^* y el ángulo de fase
3. Gráficos de los componentes real e imaginario de E^* como función del Log del tiempo reducido
4. Gráficos de los componentes real versus componente imaginario de E^* (curva Cole-Cole)
5. La función de salto de tiempo temperatura (Log $\alpha(T)$ contra Temperatura)
6. La optimización no lineal de 7 parámetros de la Curva Maestra

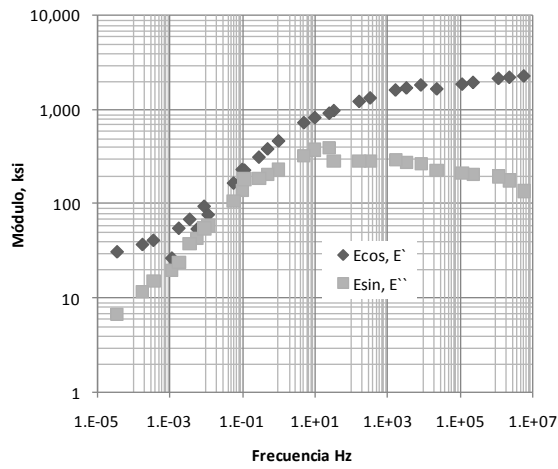
Mediante una inspección visual de estas 6 series se puede determinar si los datos son definitivamente malos o sospechosos. Una “buena” serie de mediciones de ensayo debe reflejar buen control de los resultados de ensayo siendo evaluados. Es importante reconocer que no se puede concluir de estos diagramas que los datos son correctos. En contraste con la serie buena, se ha incluido, a modo de ejemplo, una serie “mala” de los resultados de laboratorio. La gran “separación de datos” es un indicativo definitivo de que algo está radicalmente mal durante el ensayo del espécimen y se puede concluir que el ensayo puede carecer de buen control de calidad. Como consecuencia el ensayo debe inmediatamente ser reprogramado para hacerse nuevamente. En este caso la separación o dispersión de datos conllevó a una mala optimización de la curva maestra.



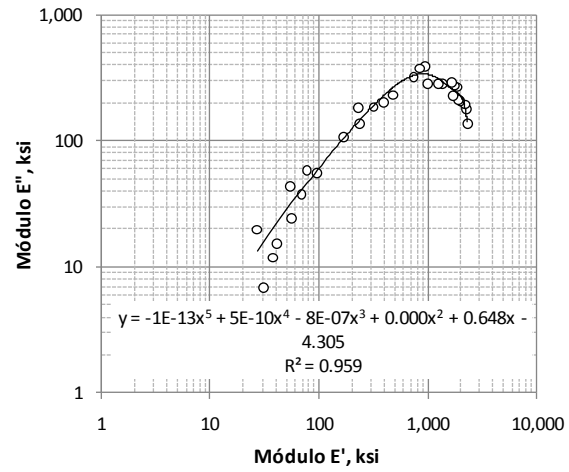
(1)



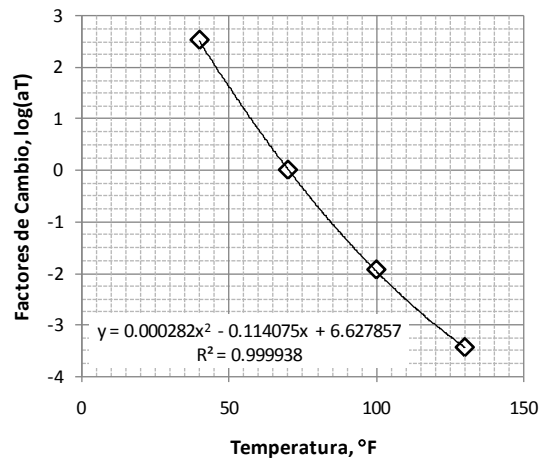
(2)



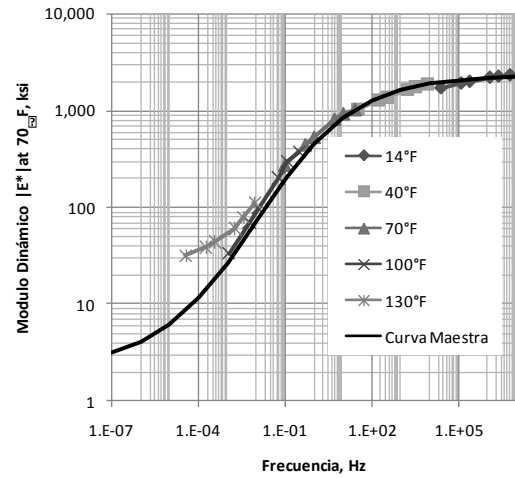
(3)



(4)



(5)



(6)

Figura 4: "Mala" serie de mediciones

Diferencias entre procedimientos del ensayo

Como segundo paso, se encontraron diferencias significativas en los rangos de esfuerzos y deformaciones aplicadas a los especímenes de cada laboratorio. La Tabla 2 muestra que el rango de esfuerzos aplicados en el laboratorio UCR fueron significativamente mayores resultando en deformaciones unitarias de casi el doble comparado con las valores obtenidos en el laboratorio GCTS. Se determinó que estos valores más altos pueden haber llevado a los especímenes del laboratorio UCR más allá del rango "elástico" produciendo módulos más bajos y ángulos de fase más altos tendiendo al estado viscoso. Esto se observó especialmente a altas temperaturas y bajas frecuencias donde en algunos casos se superó el límite de deformación recuperable de 150 micrómetros (AASHTO, 2005).

Tabla 2: Rango de esfuerzos aplicados y deformaciones recuperables obtenidas

Tipo Mezcla	GCTS		UCR	
	Esfuerzo, kPa	Deformación, μ	Esfuerzo, kPa	Deformación, μ
9.5C	1100-1516	55-75	1597-2592	133-141
	650-1115	67-85	970-2075	134-147
	170-390	55-75	238-1034	119-143
	34-150	48-73	25-283	87-114
	20-50	48-77	13-66	80-188
12.5F	1310-1653	60-94	1705-2495	134-147
	825-1490	67-118	990-1809	135-143
	175-415	55-89	234-968	129-145
	34-154	58-85	28-299	81-129
	20-48	60-110	13-53	81-160
12.5C	1310-1650	67-88	1744-2558	137-152
	760-1257	73-93	903-1772	136-140
	69-338	34-97	219-1071	117-150
	34-165	61-88	20-255	107-116
	20-41	65-99	13-85	88-193

Ensayo de anillo de carga metálico

Como tercer paso y con el fin de comparar los dos equipos de medición utilizados en este estudio, se realizaron pruebas a un anillo de carga metálico proporcionado por uno de los fabricantes del equipo. Este espécimen se comporta de manera puramente elástico-lineal, por lo que su módulo no depende del nivel de esfuerzo aplicado ni de la razón de carga. La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos por ambos laboratorios. Puede observarse que las mediciones obtenidas por el LanammeUCR se realizaron a cuatro diferentes niveles de esfuerzo, mientras que las de GCTS se obtuvieron para un solo nivel de esfuerzo, pero para un mayor rango de frecuencias.

Tabla 3: Verificación de módulo dinámico con espécimen metálico

Esfuerzo, kN	Frecuencia, Hz	E* LanammeUCR, MPa		Frecuencia, Hz	E* GCTS, MPa
0.51	10	1442		25	1425
	1	1439		10	1429
	0.1	1434		5	1420
4.51	10	1432		1	1424
	1	1426		0.5	1422
	0.1	1421		0.1	1417
8.64	10	1427			
	1	1424			
	0.1	1418			
12.56	10	1426			
	1	1422			
	0.1	1416			
<i>Promedio</i>		<i>1427.3</i>			
<i>Desviación estándar</i>		<i>7.73</i>		<i>Promedio</i>	<i>1422.8</i>
<i>Coefficiente de variabilidad, CV</i>		<i>0.54%</i>		<i>Desv. Est.</i>	<i>3.80</i>
				<i>CV</i>	<i>0.27%</i>

Una prueba de hipótesis con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ determinó que no existe una diferencia significativa entre los valores de módulo medidos por el LanammeUCR y los obtenidos por GCTS. Por lo tanto, se descartó que las diferencias en los especímenes de mezclas asfáltica se deban a los distintos equipos usados por los laboratorios, y se estimó que dichas diferencias pueden deberse a los procedimientos de ensayo, como se mencionó anteriormente, o a la configuración de los sensores sobre los especímenes, la cual también varía entre ambos laboratorios.

Ensayo de Especimen Sintético

Como cuarto paso, se realizó un análisis comparativo entre ambos laboratorios aplicando el ensayo de módulo dinámico a un espécimen sintético. Las pruebas se realizaron primero en el laboratorio de GCTS, y posteriormente el mismo espécimen fue enviado a LanammeUCR para ser evaluado. Los ensayos se realizaron utilizando el mismo procedimiento establecido para obtener el módulo dinámico de mezclas asfálticas. La Figura 5 muestra un resumen de los resultados obtenidos para los parámetros del ensayo.

Puede observarse que las diferencias en los módulos dinámicos medidos por ambos laboratorios son relativamente bajas, y que existe una tendencia en la que los resultados obtenidos por el LanammeUCR son ligeramente más altos que los de GCTS para valores bajos de E^* (temperaturas altas), y menores para valores altos de E^* (temperaturas bajas). Por otra parte, los valores de ángulo de fase fueron considerablemente más bajos para el LanammeUCR, y a diferencia de los resultados de GCTS, la variación registrada entre diferentes condiciones de temperatura y frecuencia fue muy baja y los ángulos medidos se mantuvieron casi constantes, con un promedio de alrededor de 0.7.

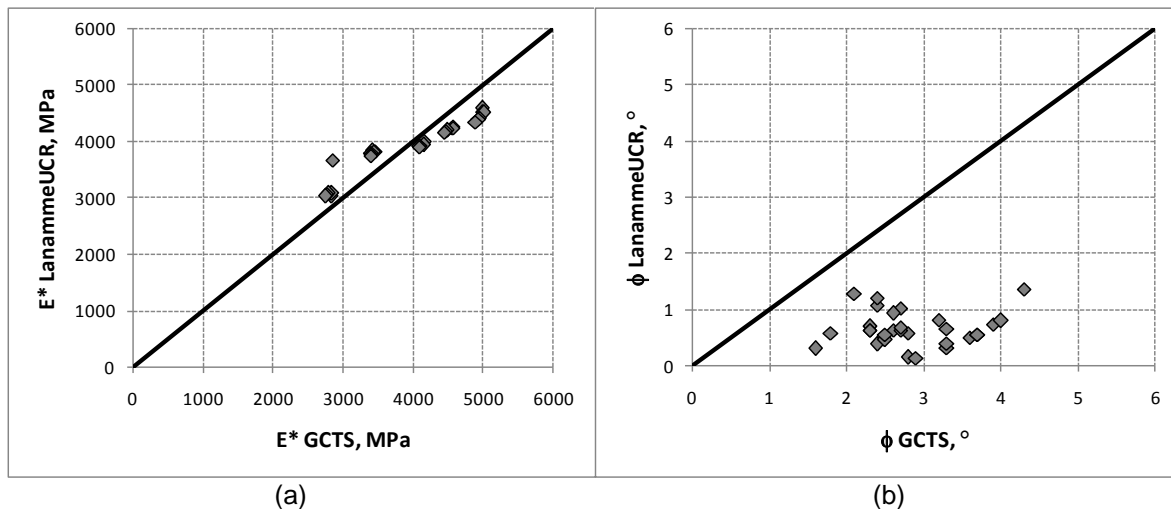


Figura 5: Comparación de valores de a) módulo dinámico y b) ángulo de fase

CONCLUSIONES

Con base en los resultados de este estudio, se llegó a las siguientes conclusiones que se enmarcan dentro de los alcances de este proyecto:

El control y verificación de la calidad de los datos debe incluir no solo el chequeo de los parámetros de uniformidad establecidos en la norma de ensayo (AASHTO TP 62), pero también debe incluir una serie de ayudas visuales para determinar la presencia de datos sospechosos o malos.

Para esta etapa del estudio se determinó que las diferencias encontradas se deben principalmente a las diferencias en el procedimiento de ensayo realizado en cada laboratorio, seguidamente de las diferencias en la configuración de los sensores sobre los especímenes, como se demostró en el ensayo sobre el espécimen sintético.

Este examen exhaustivo de los datos crudos obtenidos en las pruebas, así como de los parámetros utilizados, permitió establecer un protocolo de ensayo más uniforme y comparable con los de otros laboratorios. Esto brinda confianza en que los datos de módulo dinámico obtenidos a futuro serán útiles para desarrollar un nuevo modelo de desempeño de mezclas asfálticas adecuado para los materiales propios del país.

REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*, Apéndice D, Washington, D.C.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2002). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D.C.
- AASHTO TP 62-03. (2005). *Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures*. American Association of State Highway and Transportation Officials.