



Instituto
Mexicano del
Transporte

COORDINACIÓN DE INFRAESTRUCTURA

INFORME DE INVESTIGACIÓN

**PROYECTO No. IE 13/12:
DETERMINACION DEL MODULO DINAMICO EN MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE**

Responsable del proyecto:

M.C Mayra Flores Flores
Investigador

Aprobó:

Autorizó:

M.C Rodolfo Téllez Gutiérrez
Coordinador de Infraestructura

Ing. Roberto Aguerrebere Salido
Director General

8 de marzo de 2013

Este proyecto fue realizado en la División de laboratorios de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte por los investigadores Dr. Horacio Delgado Alamilla y la M.C Mayra Flores Flores y la colaboración del C. José Alfonso Galicia Valencia.

RESUMEN

En este proyecto se evaluó el comportamiento mecánico de dos mezclas asfálticas de granulometría densa a través del ensayo de modulo dinámico. Las mezclas evaluadas fueron una convencional (AC-20) y otra con asfalto modificado con polímero tipo SBS. Para realizar el ensayo de modulo dinámico se compactaron especímenes de 15 cm de diámetro y 17 cm de altura en el compactador giratorio, de los especímenes compactados se extrajeron núcleos de 10 cm de diámetro y se cortaron a una altura de 15 cm. Con los núcleos extraídos se realizó el ensayo de módulo dinámico, a las temperaturas de -10, 4, 21, 37 y 54°C y frecuencias de 25, 10, 5, 1, 0.5 y 0.1 Hz, para evaluar el comportamiento de ambas mezclas asfálticas.

Los objetivos de la investigación fueron: determinar los valores de modulo dinámico para las diferentes temperaturas y frecuencias, construir la curva maestra de cada mezcla asfáltica, generar información de módulo dinámico de mezclas asfálticas utilizadas en México y realizar un análisis comparativo entre el comportamiento de una mezcla asfáltica convencional (AC20) y otra modificada con polímero (SBS).

Los resultados mostraron que la mezcla asfáltica modificada (polímero SBS) presentó valores de modulo dinámico más altos para todas las temperaturas y frecuencias de carga y que es menos susceptible a la deformación permanente que la mezcla asfáltica convencional.

INDICE

LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABLAS	6
Introducción	7
1. Características de las mezclas asfálticas y preparación de especímenes.	14
1.1 Características de las mezclas asfálticas.	14
1.2 Preparación de los especímenes de ensayo	16
2. Ensayos de módulo dinámico	17
3. Resultados y análisis de datos	20
4. Conclusiones.....	27
5. Referencias.	28
ANEXO	29

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Gráfica esfuerzo-deformación durante un ensayo de módulo complejo.	8
Figura 2	Curva maestra de módulo dinámico.	10
Figura 3	Curva granulométrica de diseño	15
Figura 4	Espécimen compactado y núcleo extraído	16
Figura 5	Especímenes para ensayo de módulo dinámico	16
Figura 6	Equipo de Módulo dinámico	18
Figura 7	Instrumentación del espécimen de ensayo de Módulo dinámico	19
Figura 8	Curva maestra de las mezclas asfálticas evaluadas	21
Figura 9	Curvas isotérmicas del módulo dinámico	24
Figura 10	Grafica Black de las muestras asfálticas evaluadas	25
Figura 11	Plano Cole-Cole	26

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Características del agregado	14
Tabla 2 Características del asfalto	14
Tabla 3 Propiedades volumétricas de las mezclas estudiadas	15
Tabla 4 Propiedades de los especímenes de ensayo	17
Tabla 5 Resumen de datos de modulo dinámico mezcla asfáltica con asfalto AC20	22
Tabla 6 Resumen de datos de módulo dinámico mezcla asfáltica con asfalto modificado con SBS	23
Tabla A1 Datos ensayo Modulo dinámico de la mezcla asfáltica AC20	
Tabla A2 Datos ensayo Modulo dinámico de la mezcla asfáltica modificada	

Introducción

El módulo del pavimento (Resiliente o complejo) es una propiedad importante del material en cualquier procedimiento mecanicista de diseño y análisis de pavimentos flexibles. Asimismo, es uno de los principales parámetros de entrada en la Guía de Diseño empírico mecanicista 2002, mejor conocida como Guía AASHTO 2002, porque caracteriza de manera racional el comportamiento esfuerzo –deformación de los materiales que conforman la estructura del pavimento.

La caracterización de los materiales consiste en determinar parámetros fundamentales que describan su comportamiento. El módulo resiliente es un parámetro fundamental que caracteriza el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales que conforman la estructura del pavimento. En el caso de la mezcla asfáltica es más apropiado considerar el módulo complejo debido a que éste define mejor el comportamiento viscoelástico de la mezcla (Elizondo et al, 2007).

Para un material visco elástico tal como la mezcla asfáltica en caliente, la relación esfuerzo-deformación bajo carga sinusoidal continua es definida por su módulo complejo (E^*).

El módulo complejo es una medida de la resistencia a la deformación de la mezcla bajo carga sinusoidal y es un número complejo que consta de dos partes, la parte real, la cual representa la rigidez (parte elástica) y la parte imaginaria que representa el amortiguamiento interno de los materiales (parte viscosa),(Huang, 1993).

La respuesta de un material viscoelástico como la mezcla asfáltica en caliente, bajo carga sinusoidal estará fuera de fase con respecto a la carga aplicada, como es mostrado en la figura 1.

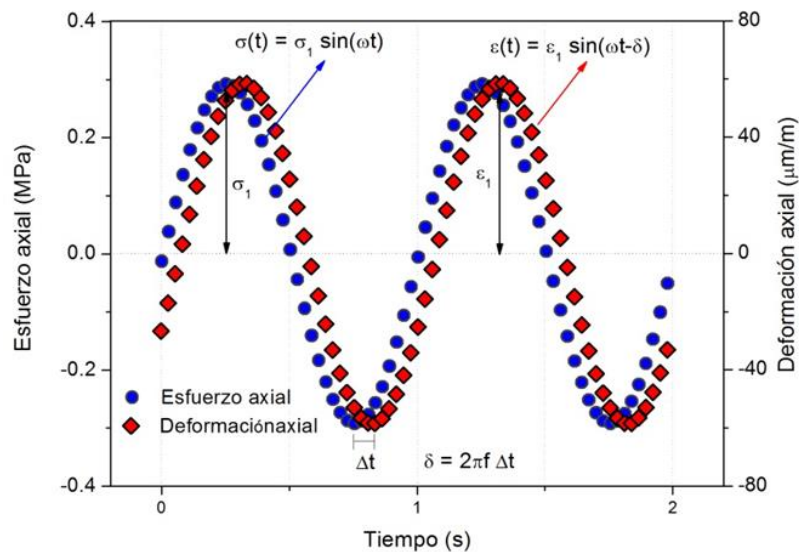


Figura 1 Gráfica esfuerzo-deformación durante un ensayo de módulo dinámico (Delgado Alamilla, 2013)

Para una carga sinusoidal, el esfuerzo aplicado y la deformación observada puede ser descrita por las siguientes ecuaciones (Sugandh et al, 2007):

$$\sigma = \sigma_0 \sin \omega t \quad (1.1)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \delta) \quad (1.2)$$

donde

σ esfuerzo en el tiempo t

σ_0 esfuerzo máximo aplicado

ω velocidad angular

δ ángulo de fase (o ángulo de desfase) del material

ε deformación en el tiempo t

ε_0 deformación máxima observada

El módulo complejo es definido como la relación de la amplitud del esfuerzo sinusoidal máximo y la amplitud de la deformación sinusoidal máxima como sigue:

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1.3)$$

$$E^* = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \delta)}} = |E^*| e^{i\delta} \quad (1.4)$$

donde

$|E^*|$ Módulo dinámico (valor absoluto del módulo complejo) del material

δ Ángulo de fase (o ángulo de desfase) del material

El retraso entre la señal de carga y deformación, expresada como un ángulo de fase (ϕ), está además relacionado con el modulo complejo de la siguiente manera:

$$|E^*| = [E'^2 + E''^2]$$

donde

E'^2 Módulo de almacenamiento (parte dinámica) = $|E^*| \cos \delta$

E''^2 Módulo de perdida (parte viscosa) = $|E^*| \sin \delta$

Un ángulo de fase (ϕ) de cero corresponde a un material puramente elástico, mientras que un $\phi=90^\circ$ es asociado a un material puramente viscoso (newtoniano). Un ángulo de fase entre 0 y 90° corresponde a un material viscoelástico, tal es el caso de la mezcla asfáltica. Los valores típicos del ángulo de fase para la mayoría de las mezclas asfálticas están en un rango de 0 a 60° (Rowe et al, 2008).

El módulo complejo puede ser determinado por medio de ensayos de laboratorio. El ensayo consiste en aplicar un esfuerzo de compresión axial sinusoidal (haversine) a un espécimen de concreto asfáltico a una temperatura y frecuencia de carga determinada. El esfuerzo aplicado y la deformación axial recuperable del espécimen se miden y se usan para calcular el módulo dinámico y el ángulo de fase (AASHTO TP 62-07, 2009).

Los materiales viscoelásticos como la mezcla asfáltica son altamente sensibles a la temperatura y a la velocidad de aplicación de carga. De esta manera el módulo es función de

la temperatura, velocidad de aplicación de carga, envejecimiento y características de la mezcla como viscosidad y contenido de asfalto, granulometría del agregado y vacíos.

Para considerar los efectos de la temperatura y la velocidad de aplicación de la carga en el módulo de la mezcla asfáltica, se desarrolló el concepto de curva maestra. La curva maestra del módulo se construye a partir de resultados de ensayos de laboratorio y utilizando principios de superposición tiempo de carga (frecuencia)-temperatura, de esta manera puede describirse la dependencia del material con el tiempo, lo cual permite tomar en cuenta no solamente la temperatura propia de la zona, sino también la velocidad de los vehículos, en la respuesta estructural que la mezcla asfáltica puede brindar.

Para construir la curva maestra se requiere realizar ensayos de módulo dinámico a diferentes temperaturas (-10, 4, 21, 37 y 54°C,) y frecuencias de carga (0.1, 0.5, 1,5, 10 y 25 Hz) en la mezcla asfáltica particular que se desea estudiar. Luego se selecciona una temperatura estándar de referencia (generalmente 21°C (70°F)) y, posteriormente los datos de las diferentes temperaturas, se desplazan horizontalmente con respecto a la frecuencia de carga hasta que las curvas se unen en una única función suavizada (Elizondo et al, 2007), Figura 2.

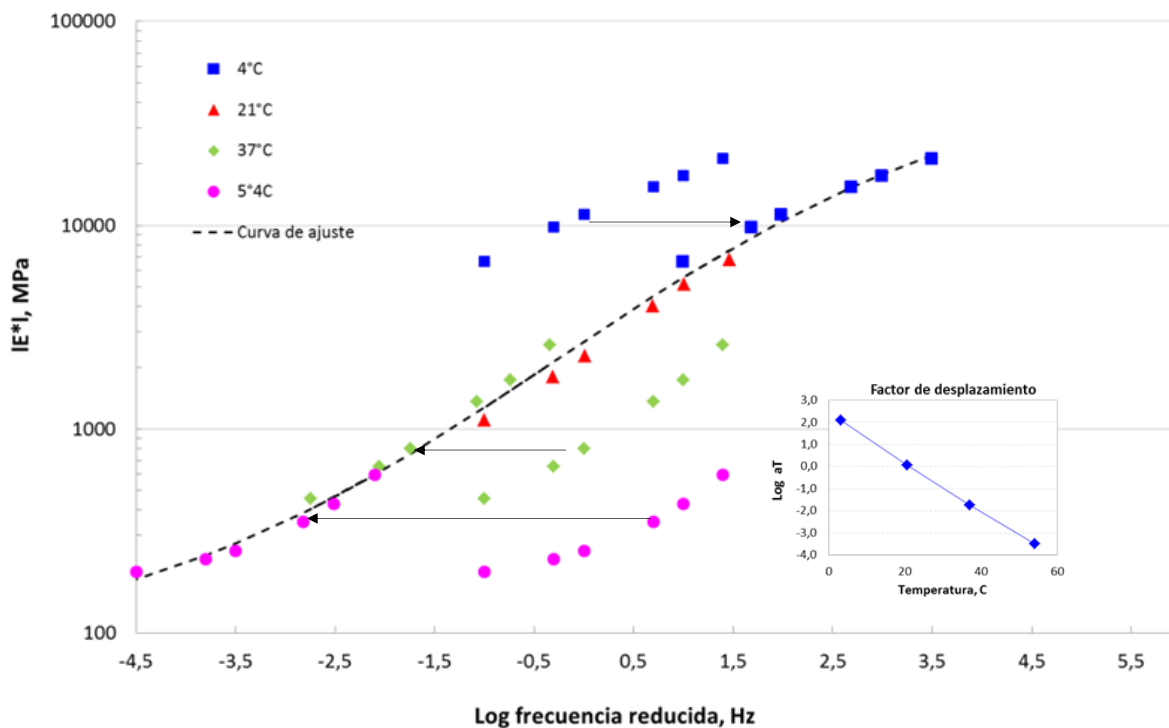


Figura 2 Curva maestra de módulo dinámico.

La magnitud del ajuste o desplazamiento de cada dato de temperatura requerido para formar la curva maestra describe la dependencia del material con la temperatura (Elizondo et al, 2007). Esta magnitud se ve afectada por un factor de desplazamiento, el cual se muestra en la siguiente ecuación:

$$a(T) = \frac{\omega_r}{\omega} \quad (1.6)$$

$$\omega_r = a(T) * \omega \quad (1.7)$$

$$\log(\omega_r) = \log \omega + \log[a(T)] \quad (1.8)$$

donde:

$a(T)$ = factor de desplazamiento como una función de la temperatura de interés

ω = frecuencia a la temperatura deseada, Hz

ω_r = frecuencia reducida a la temperatura de referencia, Hz

T = temperatura

Para calcular el factor de desplazamiento (a_r) se han propuesto varias ecuaciones como la función de Arrhenius y la ecuación de Williams-Landel-Ferry (WLF).

Una vez construida la curva maestra del módulo, se genera la curva de ajuste como una función del tiempo de carga con la siguiente función sigmoideal:

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log \omega_r)}} \quad (1.9)$$

donde:

$|E^*|$ módulo dinámico

ω_r frecuencia reducida, Hz

δ valor mínimo de $|E^*|$

$\delta + \alpha$ valor máximo de $|E^*|$

β, γ parámetros que describen la forma de la función sigmoideal

Los parámetros de ajuste δ y α dependen de la granulometría del agregado, contenido del ligante y vacíos. Los parámetros de ajuste β y γ dependen de las características del ligante asfáltico y de la magnitud de δ y α (Bonaquist, 2008).

El software del equipo utilizado para realizar los ensayos utiliza la ecuación 1.9 descrita de la siguiente forma (GCTS, 2011):

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma [\log f + a_1 (T_r - T) + a_2 (T_r - T)^2]}} \quad (1.10)$$

donde

$|E^*|$ módulo dinámico

δ valor mínimo de $|E^*|$

$\delta + \alpha$ valor máximo de $|E^*|$

β, γ parámetros que describen la forma de la función sigmoïdal

f frecuencia, Hz

a_1, a_2 Parámetros de ajuste del factor de desplazamiento

T_r Temperatura de referencia

T Temperatura de ensayo

La curva maestra es característica del material y permite determinar valores de módulo dinámico en frecuencias que no pueden ser obtenidas experimentalmente.

Debido a que la realización del ensayo del módulo dinámico en mezclas asfálticas es largo y costos, algunos investigadores han desarrollado diversas ecuaciones para predecir el valor del módulo complejo. Estas ecuaciones generalmente están basadas en parámetros de composición de la mezcla o parámetros de frecuencia-temperatura.

El modelo de Hirsch permite estimar el valor del módulo dinámico de la mezcla asfáltica a partir de los datos de rigidez del asfalto (G^*) y las propiedades volumétricas de la mezcla (Delgado Alamilla, 2013).

$$|E^*|_{mezcla} = P_c \left[4\,200\,000 \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3|G^*|_{asfalto} \left(\frac{VFA \cdot VMA}{10\,000} \right) \right] + \frac{1 - P_c}{\left[\frac{\left(1 - \frac{VMA}{100} \right)}{4\,200\,000} + \frac{VMA}{3\,VFA\,|G^*|_{asfalto}} \right]} \quad 1.11$$

donde

$$P_c = \frac{\left(20 + \frac{VFA \cdot 3 |G^*|_{asfalto}}{VMA}\right)^{0.58}}{650 + \left(\frac{VFA \cdot 3 |G^*|_{asfalto}}{VMA}\right)^{0.58}} \quad (1.12)$$

$|E^*|$ = Modulo complejo de la muestra, psi

VMA = Vacios en el agregado Mineral, %

VFA = Vacios llenados con asfalto, %

$|G^*|_{asfalto}$ = Modulo dinámico de corte del asfalto, psi

1. Características de las mezclas asfálticas y preparación de especímenes.

1.1 Características de las mezclas asfálticas.

Para este estudio se utilizó un agregado pétreo (andesita) y dos asfaltos, un convencional (AC-20) y uno modificado con polímero SBS. Las mezclas se diseñaron de acuerdo con el protocolo AMAAC PA-MA 01/2011 “Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño” considerando una granulometría de 19 mm de tamaño nominal y un nivel de tránsito alto (10 a 30 000 000 de ejes equivalentes).

Las características del agregado y del asfalto se presentan en las Tablas 1 y 2. La figura 3 indica la granulometría y la Tabla 3 las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas.

Tabla 1 Características del agregado

Ensayo	Norma de referencia	Resultado	Especificación*
Desgaste de Los Ángeles	ASTM C131-06	11%	30 % máximo
Desgaste Micro-Deval	ASTM D 6928-06	9%	15 % máximo
Sanidad del agregado	ASTM C 88	6%	15% máximo,
Caras Fracturadas	ASTM D5821-06	94%	90% mínimo
Partículas alargadas	ASTM D4791-05	0%	10 % máximo
Partículas planas	ASTM D4791-05	4 %	10 % máximo
Gravedad específica grueso	ASTM C127-07	2.706	
Gravedad específica fino	ASTM C128-07 ^a	2.495	
Absorción grueso	ASTM C127-07	1.11 %	
Absorción fino	ASTM C128-07 ^a	3.63 %	
Azul de metileno	AASHTO T330-07	8 mg/g	12 mg/g máximo
Equivalente de arena	ASTM D2419-02	88%	50% mínimo
Angularidad del agregado fino	ASTM C1252-03	46%	40% mínimo

*Fuente: Protocolo AMAAC PA-MA 01/2011

Tabla 2 Características del asfalto

Asfalto	Parámetro	Resultado
AC 20	G _b , g/cm ³	1.03
	Grado PG	64-16
	Viscosidad Brookfield a 135°C, Pa.s	0.5
	Viscosidad Brookfield a 165°C, Pa.s	0.16

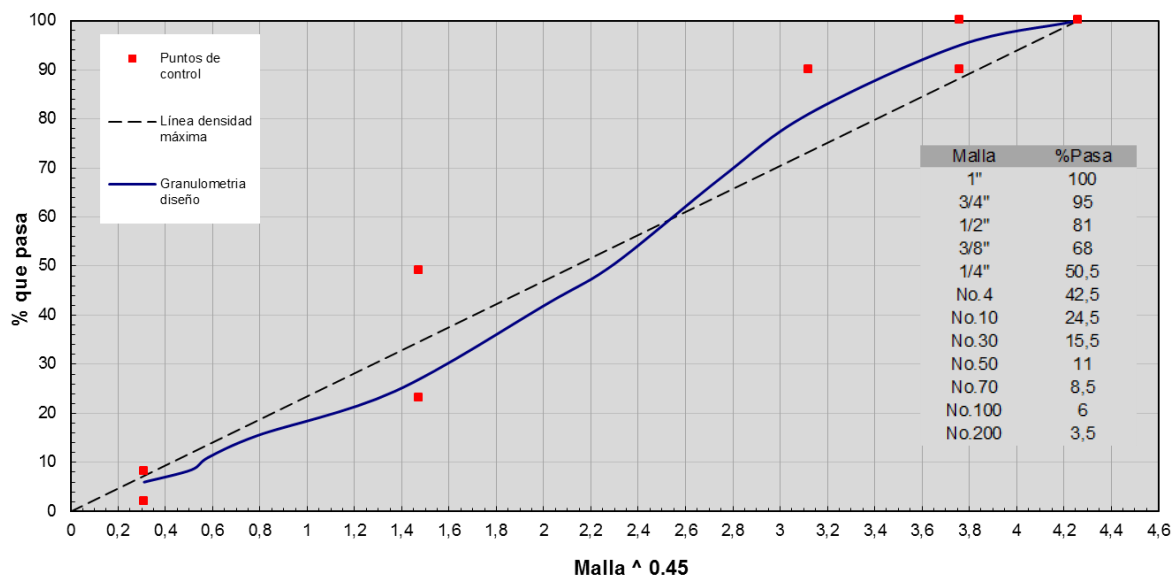


Figura 3 Curva granulométrica de diseño

Tabla 3 Propiedades volumétricas de las mezclas estudiadas

Parámetro	AC 20	Modificada	Especificación*
C.Ao, %	5.4	5.0	
VMA, %	14.9	15.1	> 13
VFA, %	73.4	72.4	65-78
Va, %	4.0	4.2	4
G _{mb}	2.349	2.333	
G _{mm}	2.446	2.435	
G _{sb} combinado	2.612	2.612	
Absorción combinada, %	2.2	2.2	
Relación polvo/asfalto	0.73	0.72	0.6-1.2

*Fuente: Protocolo AMAAC PA-MA 01/2011

1.2 Preparación de los especímenes de ensayo

En el compactador giratorio se compactaron especímenes de 15 cm de diámetro y 17 cm de altura aproximadamente, con un contenido de vacíos de aire de 5 a 6%. Los especímenes se dejaron madurar por un periodo de 15 días, posteriormente se extrajeron núcleos de 10 cm de diámetro y se cortaron a una altura de 15 cm aproximadamente, figuras 4 y 5. A cada uno de los núcleos extraídos se les determinó la gravedad específica bruta para calcular sus propiedades volumétricas. Los datos de las propiedades volumétricas de cada espécimen se indican en la Tabla 4.



Figura 4 Espécimen compactado y núcleo extraído



Figura 5 Especímenes para ensayo de módulo dinámico

Tabla 4 Propiedades de los especímenes de ensayo

Parámetro	AC-20		MODIFICADO	
	N	2	15	23
C.Ao, %	5,4	5,4	5,0	5,0
Gmb	2,307	2,303	2,306	2,280
Gmm	2,446	2,446	2,435	2,435
Gsb	2,612	2,612	2,612	2,612
Va,%	5,7	5,8	5,3	6,4
VAM,%	16,43	16,57	16,15	17,08
VFA,%	65,41	64,74	67,19	62,81
Filler/Asfalto,%	0,72	0,72	0,73	0,73
diámetro, cm	101,26	101,59	101,03	101,02
altura, cm	149,27	148,71	148,75	150,32

2. Ensayos de módulo dinámico

El ensayo de módulo dinámico se ejecutó de acuerdo con la norma AASHTO TP 62-07 “Método de ensayo para determinación del Módulo dinámico de Mezclas Asfálticas en Caliente (HMA)”. El ensayo consiste en aplicar una carga cíclica sinusoidal a un espécimen de concreto asfáltico, de 10 cm de diámetro y 15 cm de altura, a las temperaturas de -10, 4, 21, 37 y 54°C y frecuencias de carga de 0.1, 0.5, 1.0, 5, 10 y 25 Hz para cada una de las temperaturas. Se requiere ensayar al menos dos especímenes y cada uno es ensayado para cada una de las 30 combinaciones de temperatura y frecuencia de carga, comenzando de la temperatura más baja a la más alta y de la frecuencia más alta a la más baja. Durante el ensayo, el esfuerzo y la deformación son medidos por medio de una celda de carga y LVDTs, respectivamente. Los LVDTs son colocados en lados opuestos del espécimen. La deformación del espécimen es el promedio de las deformaciones de los lados opuestos dividido entre la longitud de los LVDTs (Sugandh et al, 2007). La deformación del espécimen se mantiene dentro del rango lineal, entre 50 y 150 $\mu\epsilon$, por lo que la carga aplicada se ajusta para cada frecuencia y temperatura para alcanzar el nivel de deformación apropiado.

Antes del ensayo, el espécimen se acondiciona durante un lapso de tiempo para permitir que alcance la temperatura del ensayo. El tiempo de acondicionamiento depende de la temperatura de ensayo, a -10°C el espécimen se acondiciona toda la noche, a las temperaturas de 4, 21, 37 y 54°C se acondiciona 4, 3, 2 y 1 una hora, respectivamente.

Una vez transcurrido el periodo de acondicionamiento, se ejecuta el ensayo de módulo dinámico.

En este estudio se ensayaron dos réplicas de cada una de las mezclas asfálticas a las temperaturas y frecuencias de carga mencionadas. En total se obtuvieron 60 puntos experimentales para construir la curva maestra de cada mezcla. En la figura 6 puede verse el equipo utilizado para realizar el ensayo de módulo dinámico y en la figura 7 la instrumentación del espécimen de ensayo. Los datos de módulo dinámico, para todas las temperaturas y frecuencias, de cada espécimen se indican en el anexo 1.



Figura 6 Equipo de Módulo dinámico



Figura 7 Instrumentación del espécimen de ensayo de Módulo dinámico

3. Resultados y análisis de datos

Con los resultados obtenidos de los ensayos de módulo dinámico a diferentes temperaturas y frecuencias de carga, el software del equipo Asphalt Mix Performance Tester realiza los cálculos para construir la curva maestra y con la ecuación 1.10 genera la curva de ajuste.

Para analizar los resultados la gráfica de las curvas maestras se dividió en 3 zonas que corresponden a frecuencias bajas, intermedias y altas, los rangos de estas frecuencias son:

- Frecuencias bajas < 0.1 Hz
- Frecuencias intermedias 0.1Hz a 100 Hz
- Frecuencias altas > 100 Hz

Es importante mencionar que en las frecuencias intermedias es donde generalmente se encuentran el rango de trabajo de la mayoría de las mezclas asfálticas y en este rango se evalúa la fatiga. El rango de frecuencias altas (bajas temperaturas) es un indicador de la susceptibilidad de la mezcla asfáltica a la fisuración térmica y el rango de frecuencias bajas es un indicador de la susceptibilidad de la mezcla asfáltica a la deformación permanente.

La figura 8 presenta las curvas maestras de las mezclas asfálticas evaluadas, en el rango de frecuencias altas (temperaturas bajas, inferiores a 0°C) el valor del módulo dinámico de la mezcla asfáltica modificada se incrementó en promedio un 15% aproximadamente, en el rango de frecuencias intermedias tuvo un incremento del 23 al 61 % y en el rango de frecuencias bajas un incremento promedio de 61 %, con respecto a la mezcla asfáltica convencional. De lo anterior puede decirse que la mezcla asfáltica modificada es menos susceptible a la deformación permanente.

Las tablas 5 y 6 presentan un resumen de los resultados de módulo dinámico con los cuales fue construida la curva maestra de cada mezcla asfáltica evaluada.

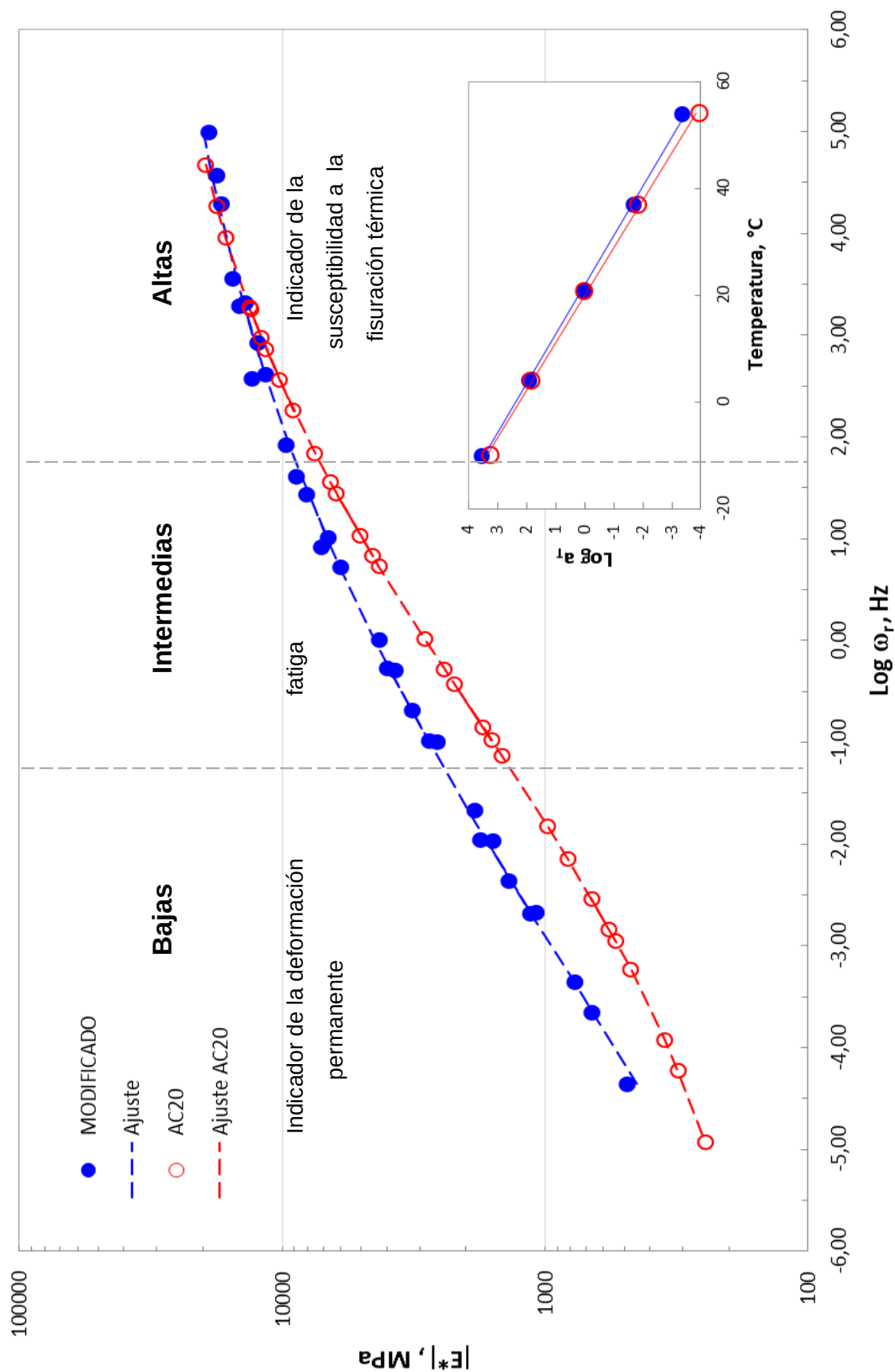


Figura 8 Curva maestra de las mezclas asfálticas evaluadas

Tabla 5 Resumen de datos de modulo dinámico mezcla asfáltica con asfalto AC20

Temperatura °C	Frecuencia Hz	AC 20				
		ϕ promedio °	E*		ϕ Desviación estandar	E* C.V. (%)
			Promedio Mpa	Ajuste Mpa		
-10	25	25,6	17936	19577	2	3,2
-10	10	14,8	16033	17797	1,1	2,1
-10	5	11,2	15200	16412	1	2,4
-10	1	8,9	13292	13319	1	0,7
-10	0,5	8,6	12566	12002	0,3	0,1
-10	0,1	10,4	10772	9081	1,5	1,1
4	25	30,8	13228	13226	1,2	6,2
4	10	20,7	11331	11537	1,5	9,3
4	5	18,1	10287	10261	1,4	9,2
4	1	17,9	7918	7534	2,1	11,1
4	0,5	18	7154	6593	1,7	10,8
4	0,1	20,5	5269	4539	1,5	12,8
21	25	42,2	6298	6224	0,9	10,1
21	10	31,5	4940	5052	0,8	14
21	5	28,6	4205	4297	0,5	13,4
21	1	28,5	2696	2880	0,3	14,8
21	0,5	29,2	2204	2415	0,1	15,3
21	0,1	28,6	1419	1598	0,1	15,9
37	25	49,3	2315	2210	2,1	15,2
37	10	37,1	1725	1725	0,1	11,6
37	5	33,3	1388	1463	0,1	10,3
37	1	28,2	872	979	0	8,4
37	0,5	27,1	708	823	0,3	6,7
37	0,1	23,4	487	573	0,5	5,6
54	25	49,6	761	666	0,2	3,3
54	10	34,6	592	542	0,3	2,7
54	5	29	494	474	0,3	1,3
54	1	22,3	362	351	0,3	1,2
54	0,5	20,9	321	313	0,5	2,1
54	0,1	17,7	266	246	0,3	4,1

Tabla 6 Resumen de datos de módulo dinámico mezcla asfáltica con asfalto modificado con SBS

Temperatura °C	Frecuencia Hz	MODIFICADO				
		ϕ promedio °	IE*I		ϕ Desviación estandar	IE*I C.V. (%)
			Promedio Mpa	Ajuste Mpa		
-10	25	25,2	19119	20015	2,7	22
-10	10	14,8	17818	18572	1,9	21
-10	5	11,4	17134	17574	1,8	23
-10	1	8,3	15449	14941	2,1	23
-10	0,5	9,6	14613	13986	2,9	23
-10	0,1	9,8	13058	11537	2,4	23
4	25	30,3	13886	14095	4,7	20
4	10	19,0	12446	12716	2,1	20
4	5	16,0	11611	11672	2,1	19
4	1	14,5	9682	9406	2,1	18
4	0,5	15,6	8885	8472	2,5	17
4	0,1	16,9	7088	6545	2,6	19
21	25	36,5	8123	7932	3	19
21	10	26,8	6704	6783	2,3	19
21	5	23,6	5998	6040	2,2	20
21	1	24	4290	4461	2,2	19
21	0,5	24,6	3714	3893	2,2	19
21	0,1	26,6	2576	2774	2,1	18
37	25	42,3	3996	3922	3,1	11
37	10	31,6	3217	3231	2,7	11
37	5	28,7	2767	2786	2,6	13
37	1	28,3	1861	1957	3,1	14
37	0,5	28,4	1587	1667	2,8	16
37	0,1	28,2	1084	1136	3,2	17
54	25	44,9	1766	1677	0,9	4
54	10	32,9	1373	1353	0,3	5
54	5	28,9	1144	1132	0,2	4
54	1	25,1	776	779	0,3	2
54	0,5	24,2	664	659	0,3	2
54	0,1	21,5	489	448	0,5	1

Asimismo, con los resultados de los ensayos se crearon las gráficas de curvas isotérmicas, las cuales permiten estimar la susceptibilidad del material asfáltico (variación del módulo dinámico con la velocidad de aplicación de la carga). En la figura 9 se ilustra el efecto de la frecuencia en el módulo dinámico de la mezcla asfáltica, a medida que se incrementa la frecuencia el valor del módulo también se incrementa y el efecto de la frecuencia es más significativo a temperaturas altas. En cuanto al efecto de la temperatura, a medida que se incrementa la temperatura disminuye el valor del módulo dinámico y el efecto de la temperatura es más significativo a frecuencias bajas. En el caso de la mezclas asfálticas evaluadas la modificada con SBS, como se mencionó arriba, muestra valores de modulo dinámico más altos y menos susceptibilidad a las temperaturas altas que la mezcla asfáltica convencional.

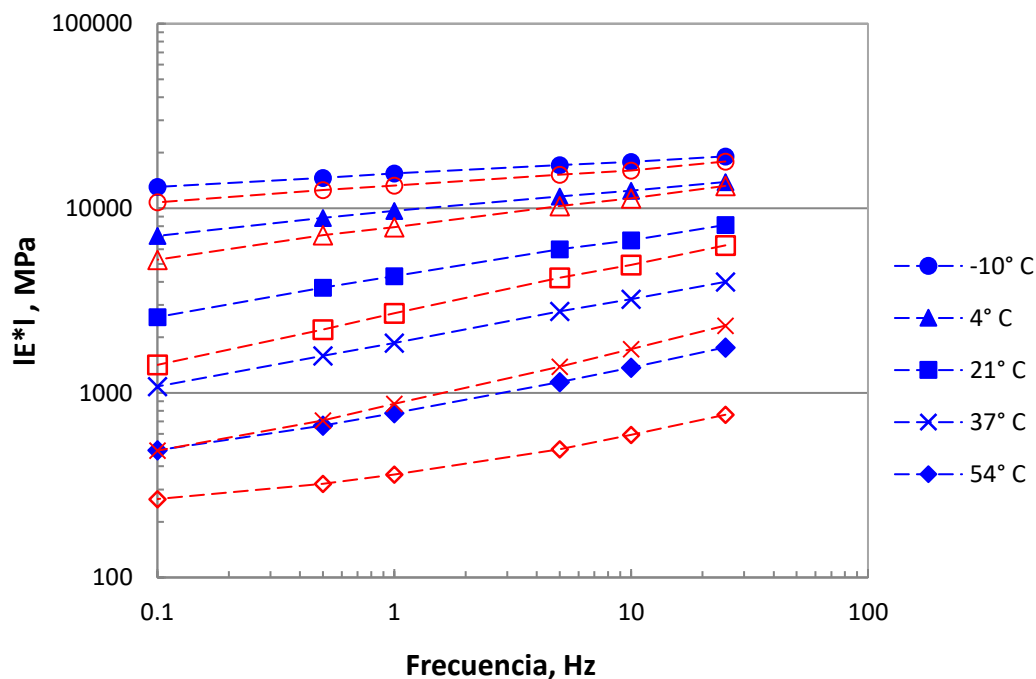


Figura 9 Curvas isotérmicas del módulo dinámico

Otras herramientas que se utilizan para evaluar el comportamiento de la mezcla asfáltica son la curva en el espacio de Black y el plano complejo (plano Cole-Cole). La gráfica en el espacio de Black es utilizada para representar las zonas con valores de módulo bajo y en particular la disminución del ángulo de fase para las temperaturas altas. El plano Cole-Cole se utiliza para calibrar modelos de comportamiento reológico y se genera graficando la parte real del módulo complejo E_1 en el eje de las abscisas y la parte imaginaria E_2 en el eje de las ordenadas. Con ambas herramientas los puntos experimentales permiten definir una curva única y característica del material evaluado (Delgado Alamilla Horacio, 2013).

La figura 10 muestra la gráfica en el espacio de Black, en esta puede verse la disminución del ángulo de fase para las temperaturas bajas y la disminución del módulo dinámico para las temperaturas altas. A bajas temperaturas la mezcla asfáltica modificada presenta ángulos de fase ligeramente más bajos mientras a temperaturas intermedias y altas el ángulo es menor que en la mezcla asfáltica convencional.

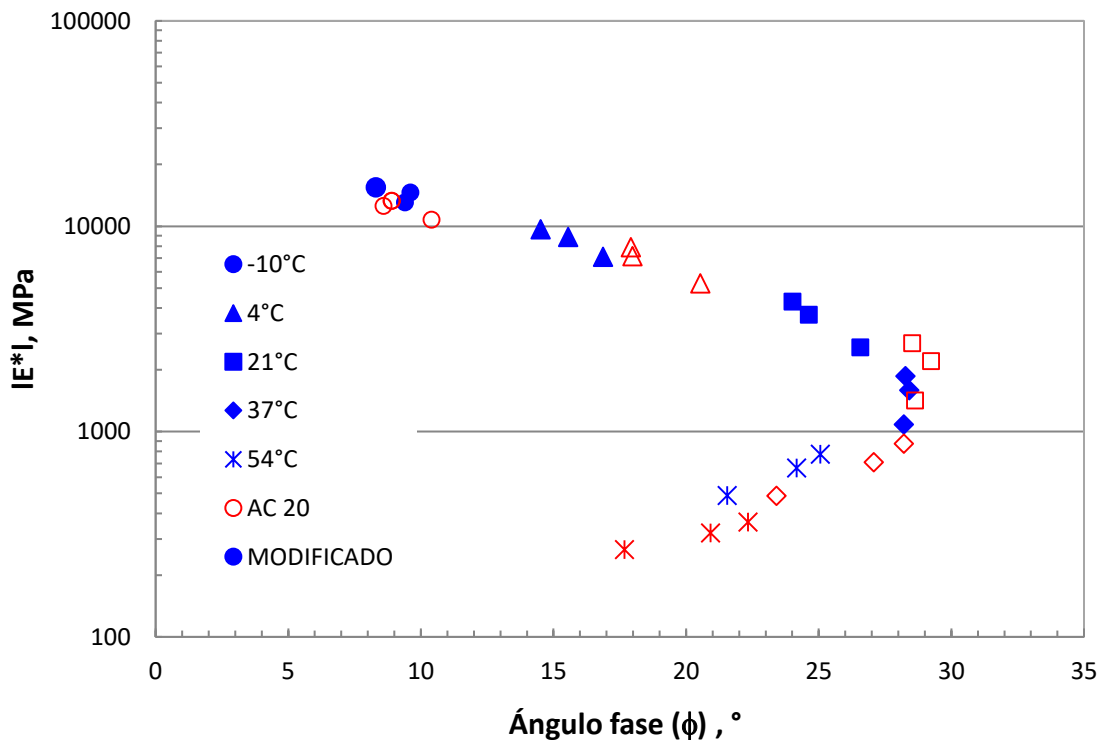


Figura 10 Gráfica Black de las muestras asfálticas evaluadas

Así también, se observa que la curva del ángulo de fase de la mezcla asfáltica modificada se contrae y esto indica que es un poco más rígida que la convencional lo que puede representar una mejora de la componente elástica (menos susceptible a la deformación permanente) pero también puede representar una reducción de sus propiedades a la fatiga.

En el plano Cole-Cole ilustrado en la figura 11, se nota que la parte viscosa del módulo dinámico de la mezcla asfáltica modificada tuvo un incremento de 150 MPa y la parte elástica se incrementó 4553 MPa con respecto a la mezcla asfáltica convencional.

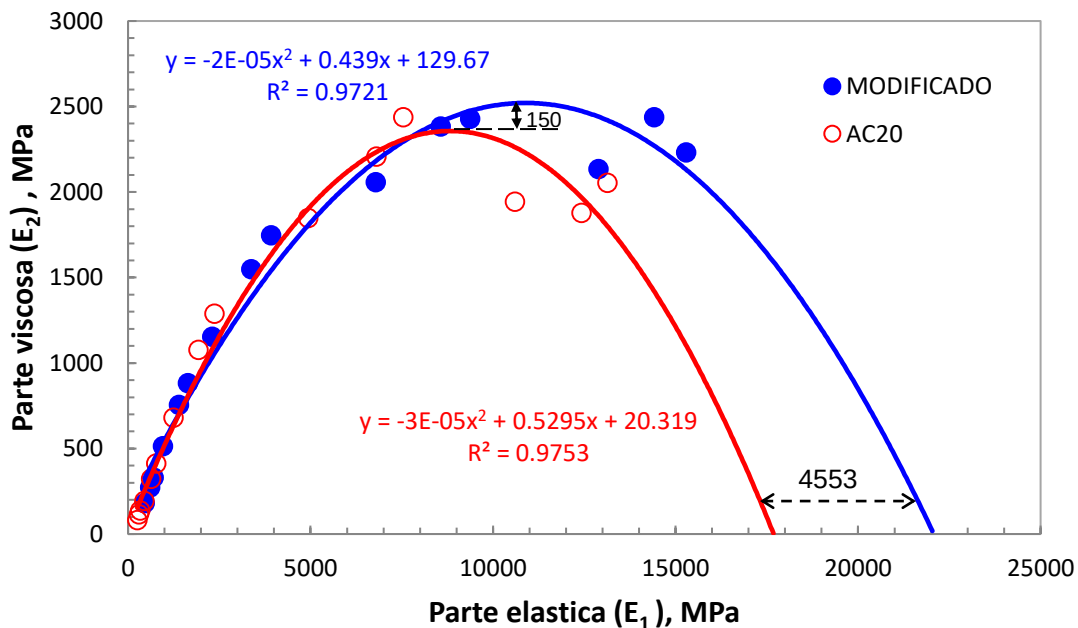


Figura 11 Plano Cole-Cole

4. Conclusiones

La mezcla asfáltica modificada (polímero SBS) presentó valores de modulo dinámico más altos para todas las temperaturas y frecuencias de carga que la mezcla asfáltica convencional.

El análisis de los resultados del ensayo de modulo dinámico mostraron que la mezcla asfáltica modificada es menos susceptible a la deformación permanente que la mezcla asfáltica convencional.

En general, la mezcla asfáltica modificada presentó un mejor comportamiento que la mezcla asfáltica convencional (AC20).

5. Referencias.

- American Association of State Highway and Transportation Officials; AASHTO TP 62-07¹ Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA); 2007
- Bonaquist Ramon; Refining the Simple Performance Tester for Use in Routine Practice, Report 614 NCHRP; National Cooperative Highway Research Program; Washington,D.C 2008.
- Delgado Alamilla Horacio; Lo complejo del módulo complejo: aspectos experimentales (segunda parte); Revista técnica Asfáltica, Año 9, Numero 33, Enero-Marzo, pp5-10, Asociación Mexicana del Asfalto (AMAAC); Diciembre 2012.
- Geotechnical Consulting & Testing Systems (GCTS); Dynamic Modulus Test User's Guide and Reference; Tempe Arizona, 2011.
- Elizondo Fabián, Badilla Gustavo, Ulloa Alvaro; "Predicción de módulos resilientes en mezclas asfálticas mediante el modelo de Witczack", Revista Infraestructura Vial, Año XI, No. 19, pp 40-50, Febrero del 2008.
- Rowe Geoffrey, Hakimzadeh Salman, Blankenship Philip; "Evaluation of aspects of E* test using HMA specimens with varying void contents"; November 2008
- Sugandh Rajpal, Zea Manuel, Tandon Vivek, Smit Andre, Prozzi Jorge; Performance Evaluation of HMA Consisting of Modified Asphalt Binder; Report Number FHWA/TX-07/0-4824-2; Center for Transportation Infrastructure Systems; The University of Texas at El Paso; El Paso, Texas; February 2007.

ANEXO

Tabla A1 Datos ensayo Modulo dinámico de la mezcla asfáltica AC20

Temperatura °C	Frecuencia Hz	AC 20					
		N		2		ϕ Desviación estandar	IE* C.V. (%)
		ϕ °	IE* Mpa	δ °	IE* Mpa		
-10	25	24,1	17536	27	18336	2	3,2
-10	10	14,1	15798	15,6	16268	1,1	2,1
-10	5	10,5	14943	12	15457	1	2,4
-10	1	8,2	13228	9,6	13356	1	0,7
-10	0,5	8,4	12557	8,8	12575	0,3	0,1
-10	0,1	9,4	10687	11,4	10856	1,5	1,1
4	25	30	13806	31,7	12649	1,2	6,2
4	10	19,6	12074	21,7	10587	1,5	9,3
4	5	17	10959	19,1	9615	1,4	9,2
4	1	16,4	8537	19,4	7299	2,1	11,1
4	0,5	16,8	7698	19,1	6610	1,7	10,8
4	0,1	19,5	5747	21,6	4790	1,5	12,8
21	25	41,6	6750	42,9	5847	0,9	10,1
21	10	30,9	5430	32,1	4450	0,8	14
21	5	28,2	4603	29	3806	0,5	13,4
21	1	28,3	2979	28,8	2414	0,3	14,8
21	0,5	29,3	2442	29,2	1965	0,1	15,3
21	0,1	28,7	1578	28,5	1259	0,1	15,9
37	25	47,9	2564	50,8	2066	2,1	15,2
37	10	37	1866	37,1	1584	0,1	11,6
37	5	33,2	1489	33,3	1287	0,1	10,3
37	1	28,2	924	28,2	820	0	8,4
37	0,5	27,2	742	26,9	674	0,3	6,7
37	0,1	23,1	506	23,7	468	0,5	5,6
54	25	49,5	779	49,8	744	0,2	3,3
54	10	34,4	604	34,8	581	0,3	2,7
54	5	29,2	499	28,8	490	0,3	1,3
54	1	22,5	359	22,1	365	0,3	1,2
54	0,5	21,2	317	20,6	326	0,5	2,1
54	0,1	17,4	258	17,9	274	0,3	4,1

Tabla A2 Datos del ensayo de modulo dinámico de la mezcla asfáltica modificada

Temperatura °C	Frecuencia Hz	MODIFICADO					
		23		XV		ϕ Desviación estandar	E* C.V. (%)
		ϕ °	E* Mpa	ϕ °	E* Mpa		
-10	25	23,3	16149	27,2	22089	2,7	22
-10	10	13,4	15116	16,1	20520	1,9	21
-10	5	10,1	14381	12,6	19888	1,8	23
-10	1	6,8	12951	9,8	17948	2,1	23
-10	0,5	7,5	12288	11,6	16937	2,9	23
-10	0,1	8,1	10904	11,5	15213	2,4	23
4	25	27	11909	33,6	15863	4,7	20
4	10	17,5	10724	20,5	14168	2,1	20
4	5	14,5	10040	17,5	13181	2,1	19
4	1	13	8472	16	10893	2,1	18
4	0,5	13,8	7793	17,3	9977	2,5	17
4	0,1	15	6159	18,7	8016	2,6	19
21	25	34,4	7018	38,7	9229	3	19
21	10	25,1	5828	28,4	7579	2,3	19
21	5	22	5172	25,2	6825	2,2	20
21	1	22,4	3721	25,6	4859	2,2	19
21	0,5	23,1	3224	26,1	4205	2,2	19
21	0,1	25,1	2248	28,1	2904	2,1	18
37	25	40,1	3695	44,5	4297	3,1	11
37	10	29,7	2960	33,6	3473	2,7	11
37	5	26,9	2514	30,6	3020	2,6	13
37	1	26	1671	30,5	2050	3,1	14
37	0,5	26,5	1409	30,4	1764	2,8	16
37	0,1	25,9	955	30,5	1213	3,2	17
54	25	44,3	1720	45,6	1812	0,9	4
54	10	32,7	1323	33,1	1423	0,3	5
54	5	28,8	1111	29,1	1177	0,2	4
54	1	24,8	763	25,3	789	0,3	2
54	0,5	23,9	653	24,4	675	0,3	2
54	0,1	21,2	487	21,9	491	0,5	1