

REVISTA Universidad EAFIT
Vol. 42. No. 143. 2006. pp. 72-88

Comportamiento dinámico de mezclas asfálticas



Julián Vidal Valencia

Ingeniero Civil, Especialista en Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Profesor del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad EAFIT.
jvidal@eafit.edu.co

Recepción: 01 de junio de 2006 | Aceptación: 09 de agosto de 2006

Resumen

La caracterización dinámica de los materiales utilizados en la construcción de carreteras es un reto indispensable para las regiones del país, pues de ello depende la certidumbre del dimensionamiento de la estructura de los pavimentos. El módulo dinámico y la relación de Poisson de las mezclas asfálticas, se constituyen en un parámetro importante dentro del diseño por métodos empírico-mecanistas, pues hacen parte del algoritmo que ayuda a definir el espesor de cada capa. El comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas está definido por la variación de la temperatura y frecuencia de aplicación de carga, incluso por las propiedades del asfalto y el agregado utilizado en la fabricación de las mismas.

Para determinar las propiedades dinámicas se elaboraron probetas cilíndricas con materiales procedentes de la explotación de depósitos aluviales y de roca, y asfaltos de características similares, con los cuales se fabrican las mezclas asfálticas en El Valle de Aburrá. Las muestras fueron compactadas estáticamente hasta lograr el peso unitario determinado en el método de diseño "Marshall". Las probetas se ensayaron en condiciones de temperatura controlada entre 5 °C y 60 °C y frecuencias entre 1 Hz y 16 Hz.

Palabras Clave

Mezcla asfáltica
Módulo dinámico
Pavimentos

Dynamic performance of asphalt mixtures

Abstract

The dynamic characterization of the materials used in road construction is an indispensable challenge for the regions of the country, since on this depends the sizing dimensioning of the pavement structure. The dynamic module and the Poisson relation of the asphalt mixtures, become an important parameter within design by empirical-mechanist methods, since it is part of the algorithm that helps in the definition of the thickness of each layer. The dynamic performance of the asphalt mixtures is defined by the temperature variation and the frequency of load application, even by the asphalt properties and the aggregated used in the manufacturing of such.

In order to determine the dynamic properties, cylindrical probes were elaborated with materials from the exploitation of alluvial and rock deposits, and asphalts with similar characteristics, with which asphalt mixtures are manufactured in the Aburrá valley. The samples were statistically compacted to reach a unitary weight determined in the "Marshall" design method. The probes were tested in controlled temperature conditions between 5 °C and 60 °C and frequencies between 1 Hz and 16 Hz.

Key words

Asphalt mixtures
Modulus dynamics
pavements

Introducción



El uso de los métodos de diseño empírico-mecanistas, hace necesaria la determinación de las propiedades dinámicas de los materiales usados en la construcción de pavimentos.

En especial, los módulos resilientes o módulos dinámicos y la relación de Poisson, establecidos a partir de solicitaciones cíclicas.

La variación de las propiedades dinámicas se da principalmente por el cambio de temperatura, pues un aumento de ésta genera una disminución en el módulo resiliente. El efecto de la frecuencia de carga, que se manifiesta a través de del movimiento de los vehículos pesados sobre la estructura, genera módulos mayores a medida que la velocidad se incrementa.

Es importante pensar en la probabilidad de ocurrencia de los parámetros que pueden afectar el diseño del pavimento, por lo que cabe preguntarse lo siguiente: ¿qué valores de

temperatura y frecuencia se deben emplear para determinar el módulo dinámico de diseño? Si se habla de probabilidad, se podría responder que la temperatura y frecuencia con mayor ocurrencias. Aquí entonces queda un camino largo por recorrer, pues en el país se carece de datos que permitan determinar la probabilidad de ocurrencia de tales factores.

Lo anterior es apenas una pequeña justificación de la necesidad de caracterizar dinámicamente los materiales utilizados en la construcción de carreteras; por ello se debe poner más atención a los parámetros externos que afectan directamente el desempeño de las propiedades de los materiales.

1. Objetivos

1.1 Determinar las ecuaciones constitutivas de los módulos dinámicos para mezclas asfálticas utilizadas en el Valle de Aburrá, en función de la temperatura y la frecuencia de carga, y el comportamiento de las mismas con la variación de dichos parámetros.

1.2 Estimar el módulo dinámico a partir de un método indirecto utilizando un equipo ultrasónico.

1.3 Relacionar el concepto de amortiguamiento con el ahuellamiento en carpetas asfálticas

2. Metodología

Se tomaron muestras de agregado y asfalto utilizado en tres plantas que suministran mezclas asfálticas en el Valle de Aburrá, con el fin de caracterizar dichos materiales, y se fabricaron las probetas con mezcla asfáltica, producida bajo especificaciones regionales y nacionales.

Las plantas productoras de mezcla asfáltica se identificaron con las letras A, B y C. Las plantas A y B utilizan agregados de origen aluvial, el cual es triturado y clasificado, y la planta C utiliza material de explotación de roca (triturado).

2.1 Materiales utilizados

2.1.1 Agregados

En la tabla 1 se presentan las propiedades físicas de los agregados utilizados.

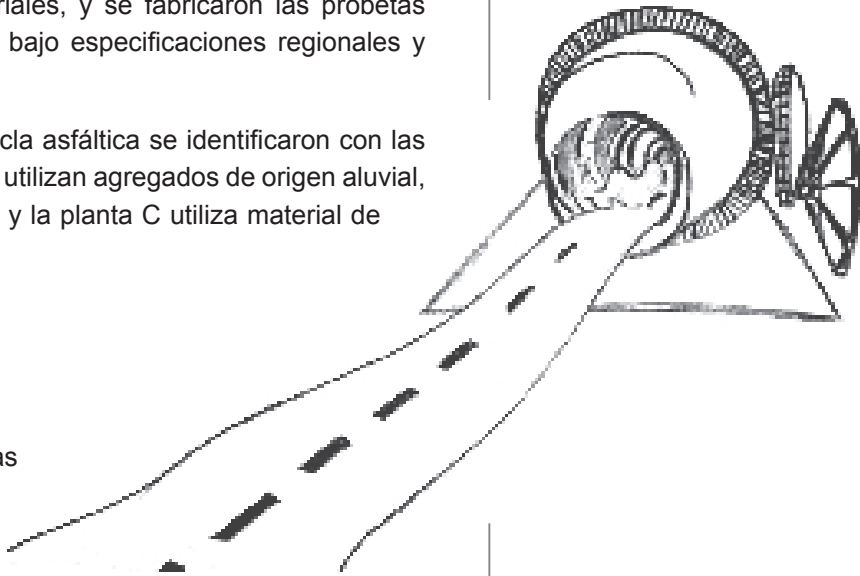


Tabla 1. Resultados de los ensayos de laboratorio de los agregados

Ensayo	A	B	C
Grava todo uno (%)	30,5	20	55
Arena (%)	69,5	80	45
Gravedad aparente nominal grava todo uno	2,782	2,724	2,685
Gravedad aparente nominal arena	2,689	2,67	2,68
Absorción grava todo uno (%)	1,574	1,68	1,58
Absorción arena (%)	1,049	1,22	0,85
Pasa # 200 (%)	13,66	7,51	7,45
Caras fracturadas (%)	96,1	80	79
Índice de alargamiento	41	32	47
Índice de aplanamiento	19	10	17
Índice de plasticidad	NP	NP	NP
Equivalente de arena (%)	54	58	65

2.1.2 Asfalto (cemento asfáltico)

En la tabla 2 se presentan las propiedades físicas de los asfaltos empleados por cada planta.

Los ensayos se realizaron bajo los requerimientos de las normas del INVIAS.

Tabla 2. Resultados de los ensayos al cemento asfáltico

ENSAYO	Temperatura (°C)	A	B	C
Penetración promedio (1/10 mm)	25	60	60	63
Ductilidad (cm)	25	No rompió	No rompió	No rompió
Penetración promedio residuo (1/10 mm)	25	39	41	45
Ductilidad residuo (cm)	25	No rompió	No rompió	127
Punto de ablandamiento (°C)	-	48.9	49	48.7
Índice de penetración	-	-1.03	-1.01	-0.97
Viscosidad Saybolt Furol (s) a la temperatura de mezclado de la planta (°C)	-	88 T=145	96 T=142	134 T=135
Pérdida por calentamiento (%)	163	0.11	0.03	0.08
Solubilidad en tetracloruro de carbono (%)	23.5	99.94	99.89	99.97
Inmersión estática (%)	25	>95	>95	>95

2.2 Propiedades de la mezcla asfáltica

En las tablas 3, 4 y 5 se presentan las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla compactada según el método Marshall.

Tabla 3. Propiedades empresa A

Identificación	Temperatura (°C)	Flujo (0,01 mm)	Estabilidad (kgf)	Peso Unit (kN/m ³)
1A	60	3,5	1285	24,4
2A	60	4,3	1236	24,4
3A	60	3,5	1139	24,3
		3,8	1220	24,37

Tabla 4. Propiedades empresa B

Identificación	Temperatura (°C)	Flujo (0,01 mm)	Estabilidad (kgf)	Peso Unit (kN/m ³)
1B	60	4,8	1294	25,1
2B	60	4,3	1471	25,3
3B	60	5,0	1522	25,3
		4,7	1429	25,23

Tabla 5. Propiedades empresa C

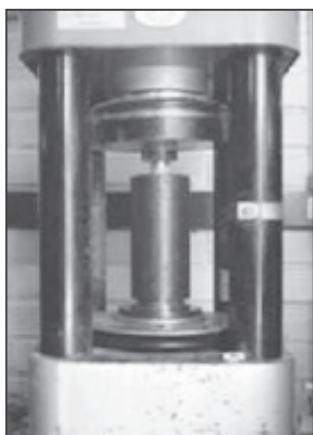
Identificación	Temperatura (°C)	Flujo (0,01 mm)	Estabilidad (kgf)	Peso Unit (kN/m ³)
1C	60	4,5	1367	24,9
2C	60	5,0	1299	24,5
3C	60	4,3	1242	24,5
		4,6	1303	24,63

2.3 Preparación de las muestras

Se elaboraron probetas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. La compactación se realizó por método estático hasta alcanzar el peso unitario reportado en la fórmula de trabajo, determinada en el diseño Marshall.

La compactación se realizó utilizando una prensa hidráulica y con un pistón superior (Fotografías 1 y 2). Luego se evaluó la homogeneidad de la compactación, para lo cual se cortaron algunas probetas en tres o cuatro porciones, se determinó el peso unitario de cada una de éstas y la desviación en porcentaje frente al promedio de los pesos unitarios o el peso unitario de la muestra antes de cortarla.

Fotografía 1. Compactación estática



Fotografía 2. Extracción de la probeta



En la Tabla 6 se presentan los resultados de la comprobación de la homogeneidad de las probetas. Cabe destacar que la probeta 1 se compactó con doble pistón y fue ésta la de menor variación en el valor del peso unitario.

Tabla 6. Comparación de pesos unitarios de las mezclas asfálticas, para observar la homogeneidad de la compactación

Probeta	1		2		3		4		5	
	P.U. KN/m ³	D %	P.U. kN/m ³	D %	P.U. kN/m ³	D %	P.U. kN/m ³	D %	P.U. kN/m ³	D %
1	24.39	0.25	24.44	-0.36	24.04	2.06	24.59	-0.30	24.47	1.28
2	24.38	0.29	24.65	-1.22	24.64	-0.39	24.82	-1.23	24.85	-0.26
3	24.34	0.45	24.50	-0.61	24.82	-1.12	24.68	-0.66	25.04	-1.02
4	24.69	-0.98	23.82	2.19	24.68	-0.55	23.98	2.19	-	-
Promedio	24.45		24.35		24.55		24.52		24.79	
□	0.016	0.660	0.037	1.502	0.035	1.407	0.037	1.512	0.029	1.171
CV	0.660		1.502		1.407		1.512		1.171	

□: Desviación estándar CV: Coeficiente de variación P.U.: Peso unitario D: Desviación

2.4 Equipo empleado

2.4.1 Triaxial cíclico (Fotografía 3): En la Tabla 7 se presentan las siguientes características del equipo

Fotografía 3. Triaxial cíclico

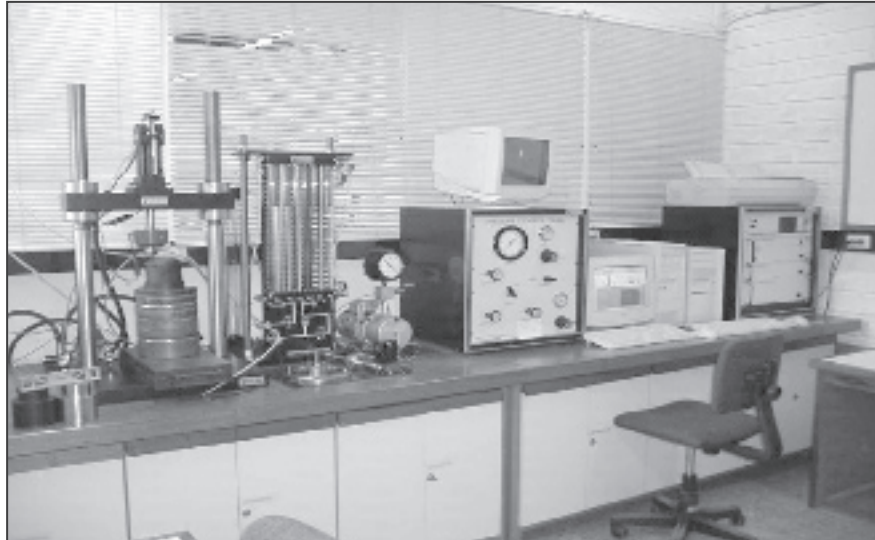
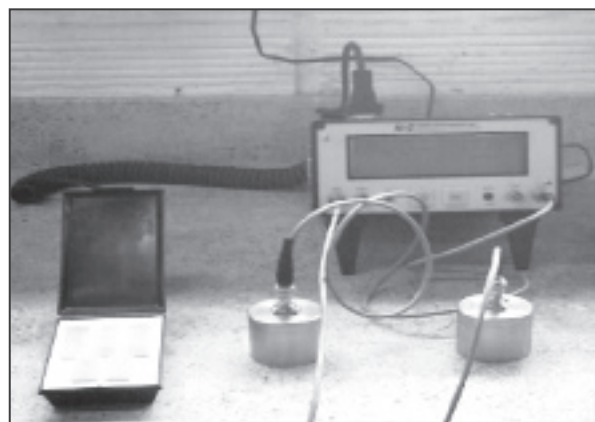


Tabla 7. Características del equipo triaxial empleado

Descripción	Características
Celda de carga de compresión – tensión	100 kN
LVDT externo e internos	Resolución de 0,001 mm
Intervalo de frecuencias	0,1 Hz a 20 Hz
Tipo de onda empleada	Sinusoidal media
Control	Servo Hidráulico

2.4.2 Ultrasonido (Fotografía 4)

Fotografía 4. Ultrasonido



2.4.3 Horno y Nevera

La nevera se utilizó para las temperaturas de 5 °C a 20 °C y el horno para temperaturas mayores a 20 °C y hasta 60 °C.

2.4.4 Cuarto de ensayos

Se trabajó en un cuarto con temperatura regulada de 20 °C y humedad relativa entre 50% y 65%.

2.5 Métodos de ensayo

2.5.1 Determinación del módulo dinámico método directo

Se aplicó el procedimiento descrito en la norma INV E-754. Para el caso de las temperaturas se empleó la siguiente serie: 5 °C, 15 °C, 25 °C, 35 °C, 50 °C y 60 °C.

La carga en el ensayo se colocó mediante un servocontrol el cual se programó con una onda sinusoidal media (seno inverso), que no produjera impacto sobre la muestra. En las Figuras 1 y 2 se presenta el modelo empleado.

Para el caso de las temperaturas de 5 °C y 15 °C, se empleó una nevera, ajustada con un RTD trazable a patrones nacionales e internacionales.

Figura 1. Onda de carga sinusoidal media durante el ensayo

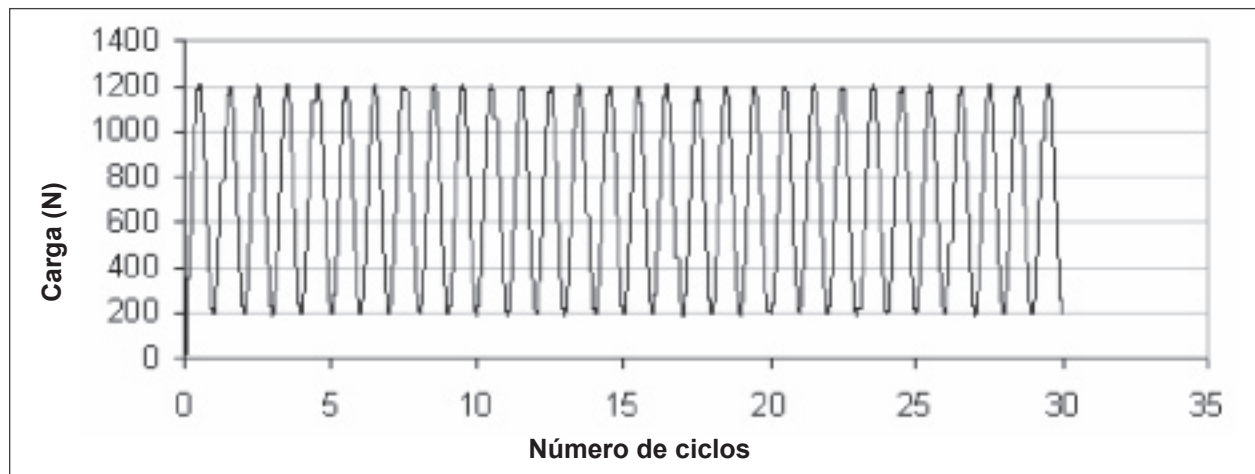
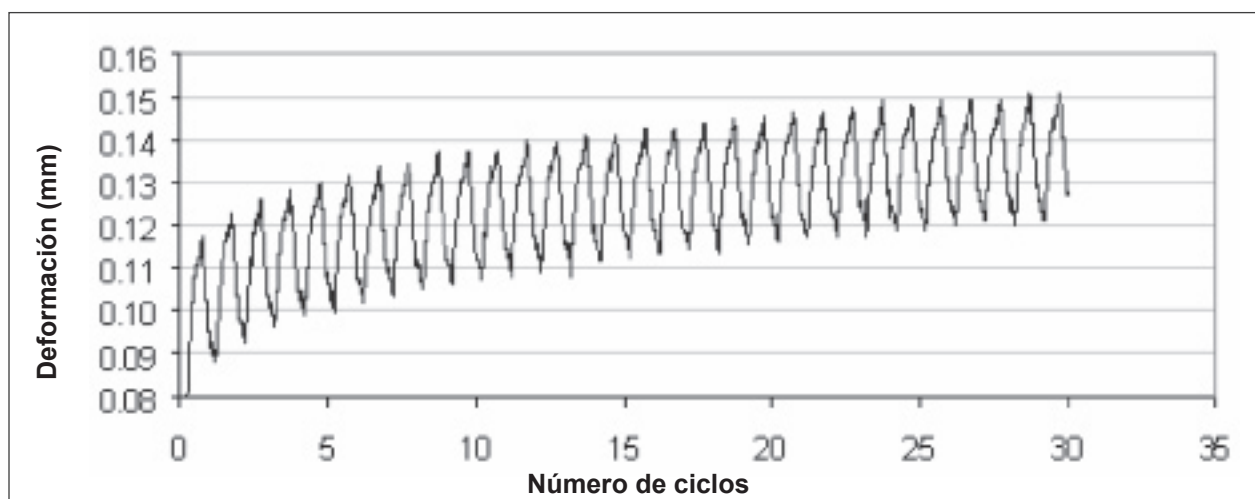


Figura 2. Comportamiento de la onda durante el ensayo (medida de deformación)



En las fotografías 5 y 6 se presenta el montaje realizado y un detalle del marco de carga, así como el horno empleado durante el ensayo.

2.5.2 Método ultrasónico

Se realizó la medida del tiempo de la propagación de la onda sónica a través de la longitud o altura de la muestra, con el fin de determinar la velocidad del sonido. La frecuencia utilizada fue de 54 kHz. Para determinar el módulo se empleó la ecuación 1. En la fotografía 7 se presenta el montaje de medición

$$Ed = \alpha^2 \times \frac{\gamma}{\rho} \times \frac{(1-\mu) \times (1-2\mu)}{(1-\mu)} \quad (1)$$

Donde:

α = Velocidad de pulso ultrasónico (m/s), que se equipara a la velocidad de las ondas de compresión en el material.

γ = Peso unitario (g/cm³)

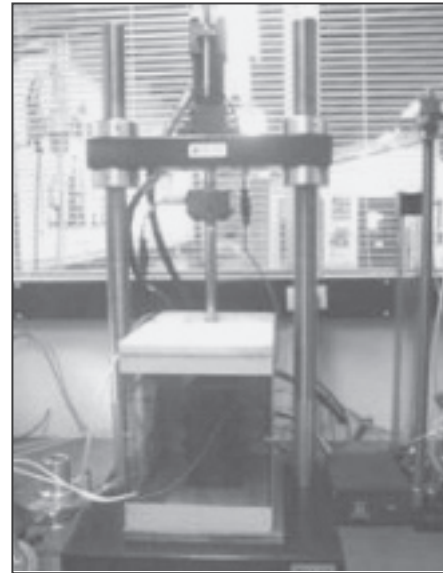
μ = Relación de Poisson

La relación de Poisson se determinó mediante un ensayo de carga monotónica a grupos de seis probetas, con tres valores de temperatura diferentes (véase Tabla 8).

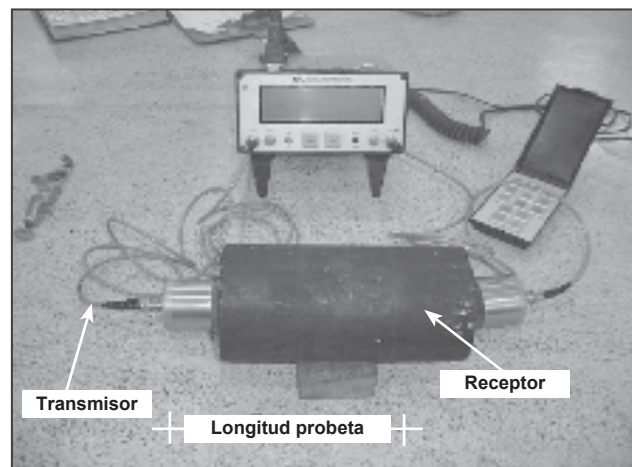
Fotografía 5. Medición de deformación axial



Fotografía 6. Cámara de temperatura



Fotografía 7. Equipo ultrasonido James Instruments

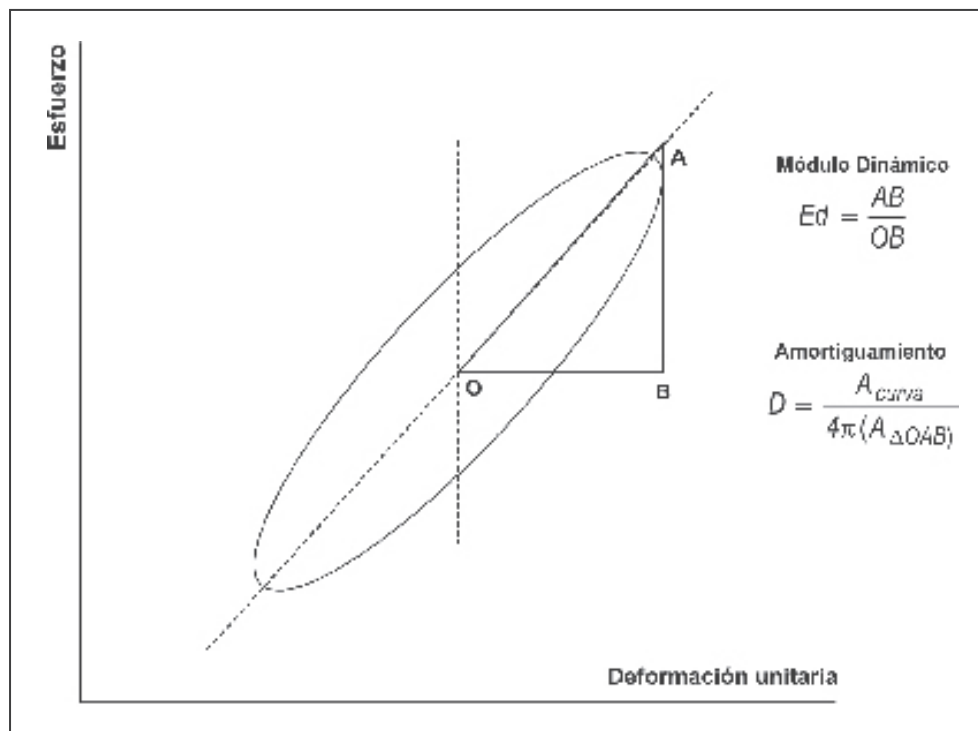


2.5.3 Factor de amortiguamiento

Este término es muy utilizado en los ensayos cíclicos realizados en muestras de suelos, con el fin de determinar las propiedades dinámicas.

El procedimiento de cálculo se hace a partir de una curva de histéresis, tal como se muestra en la Figura 3.

Figura 3



3. Resultados

En las Figuras 4, 5 y 6 se presenta el comportamiento del módulo dinámico por la variación de la frecuencia de aplicación de carga al incrementar la frecuencia.

Figura 4

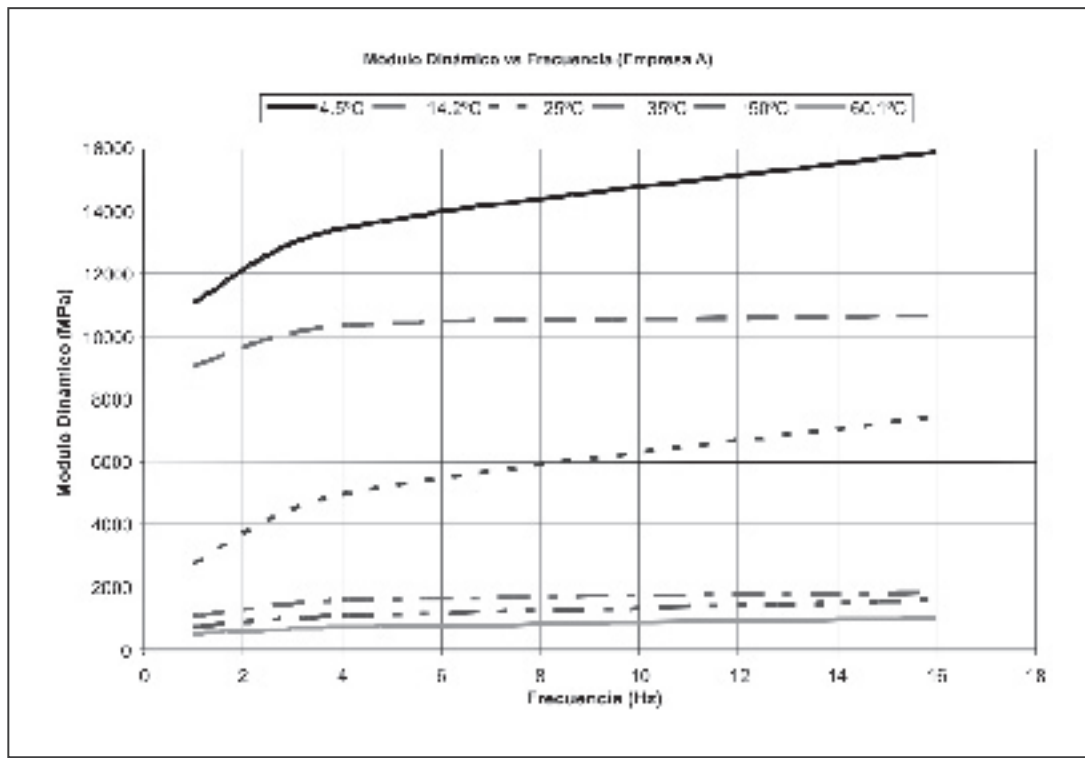


Figura 5

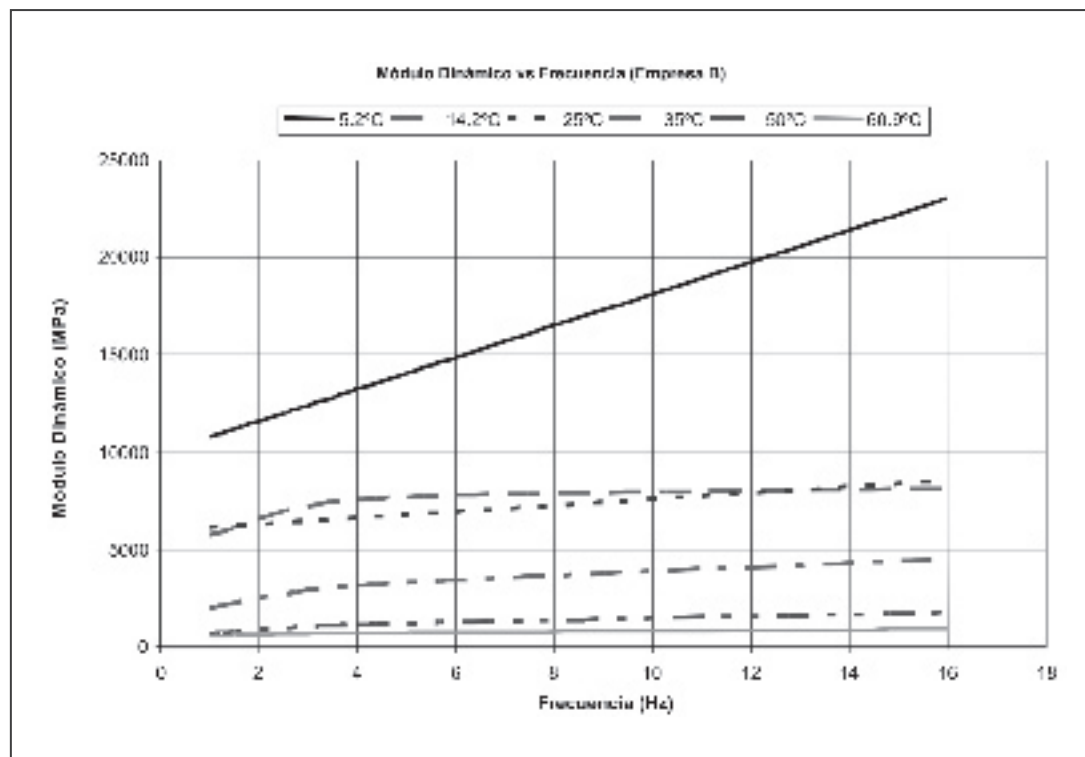
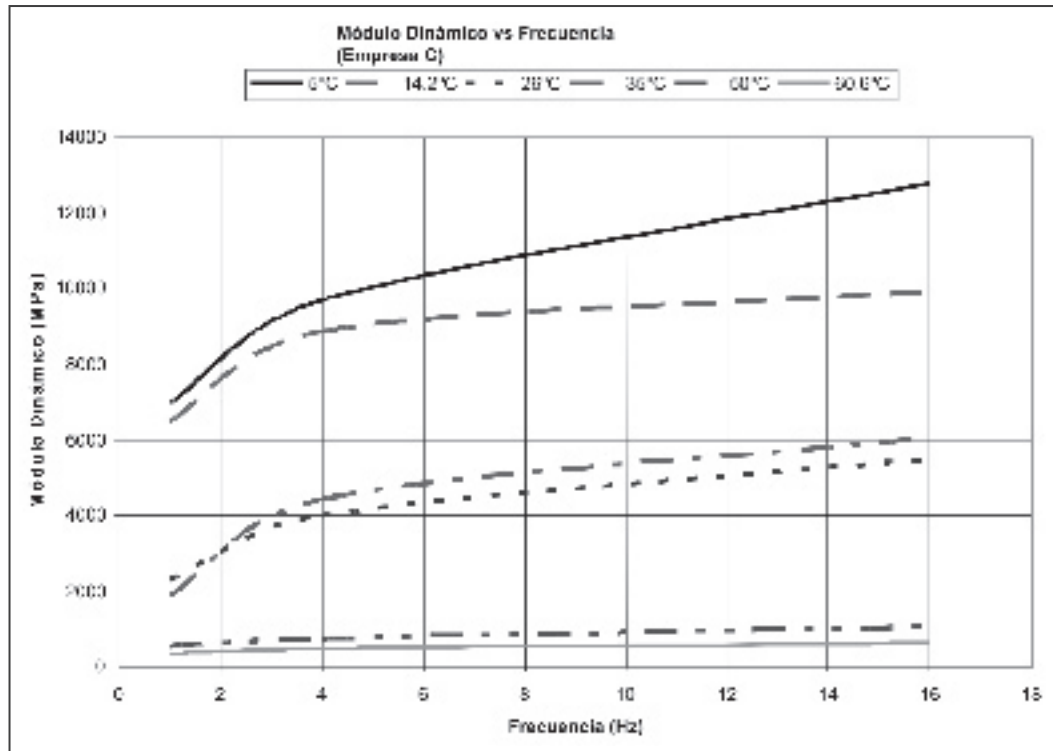


Figura 6



En las Figura 7, 8 y 9 se presenta el comportamiento del módulo dinámico por la variación de la frecuencia de aplicación de carga al incrementar la temperatura.

Figura 7

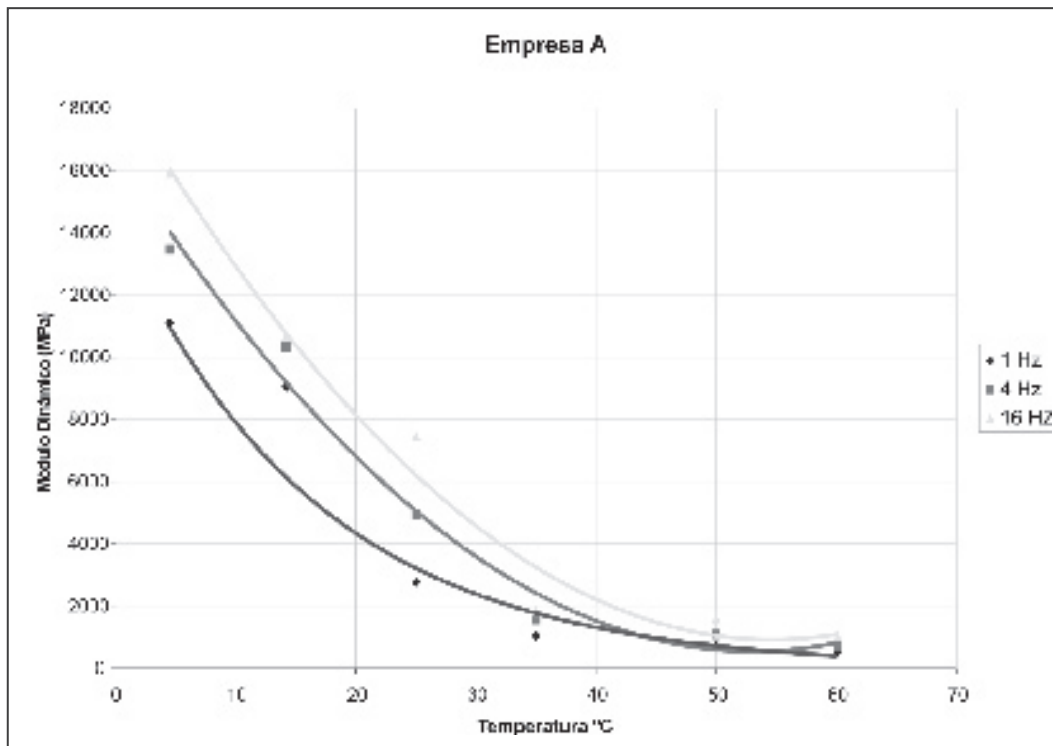


Figura 8

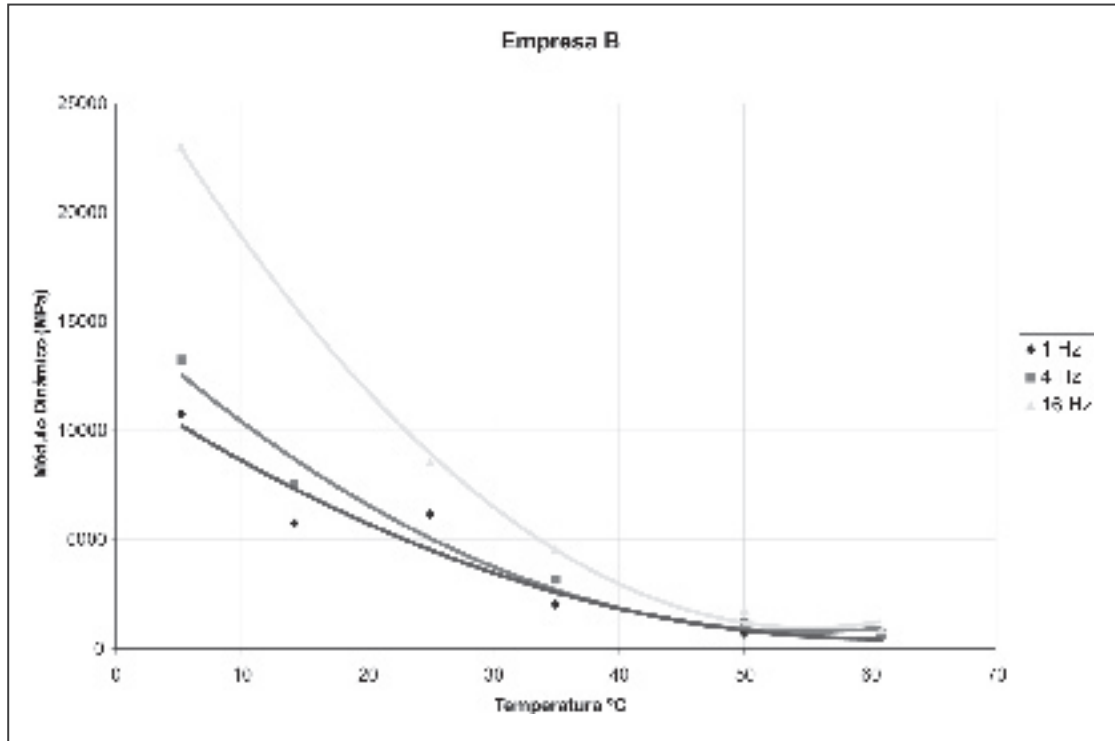
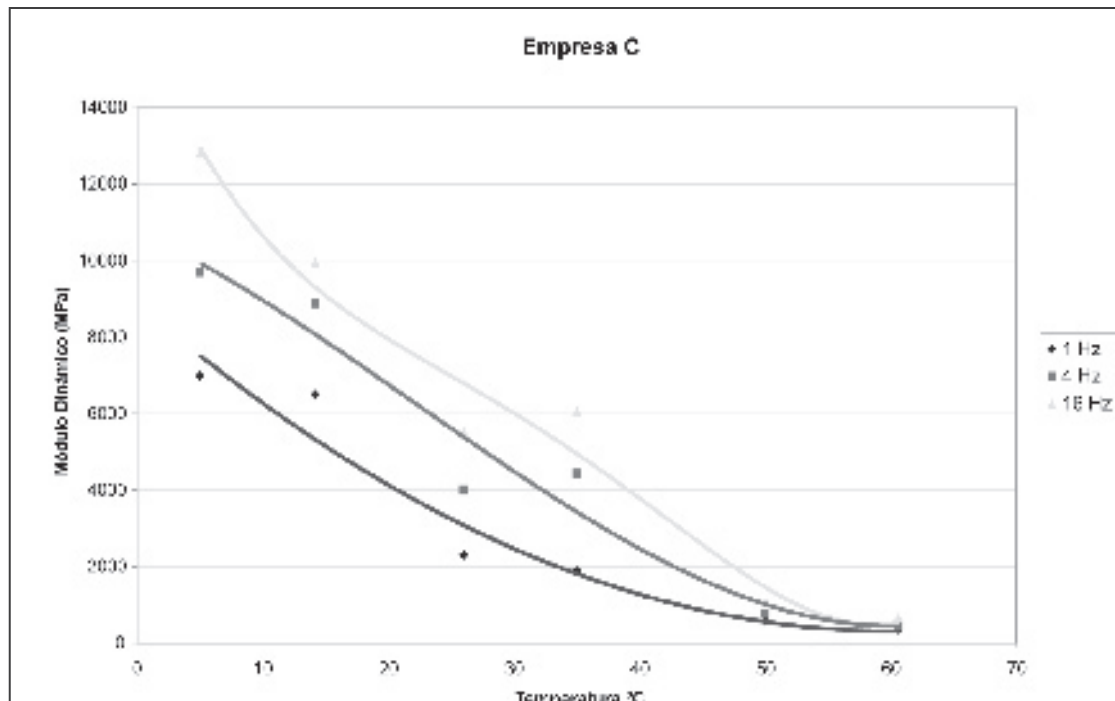


Figura 9



En la Tabla 8 se presentan los resultados de la variación de la relación de Poisson a diferentes temperaturas. La ecuación 2 representa el comportamiento fenomenológico.

Tabla 8

Temperaturas (T) °C	Poisson (ν)
20	0,135
30	0,216
50	0,297

$$\mu = 0,0045 (T) + 0.117 \quad (2)$$

En la Figura 10 se presenta el comportamiento de los módulos dinámicos obtenidos por el método ultrasónico, a una frecuencia de 54 kHz. Estos resultados permiten determinar una mejor tendencia de los valores obtenidos a bajas frecuencias.

En la Figura 11 se presenta una curva general del comportamiento del módulo dinámico por la variación de la frecuencia de aplicación de carga, al incrementar la temperatura. En ella se incluyen las mezclas de los tres proveedores y la ecuación de tipo exponencial para cada una de las mismas. Se observa un coeficiente de correlación satisfactorio

En las Figuras 12, 13 y 14 se presenta el comportamiento del amortiguamiento en función de la temperatura, para tres valores de frecuencia.

Figura 10

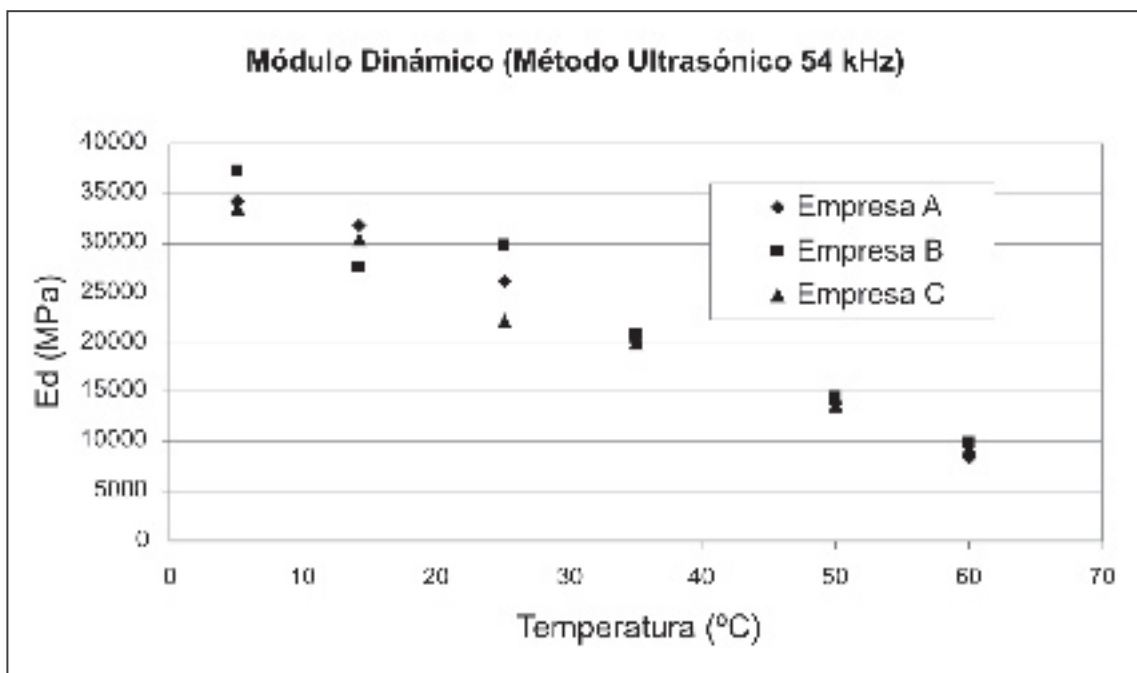


Figura 11

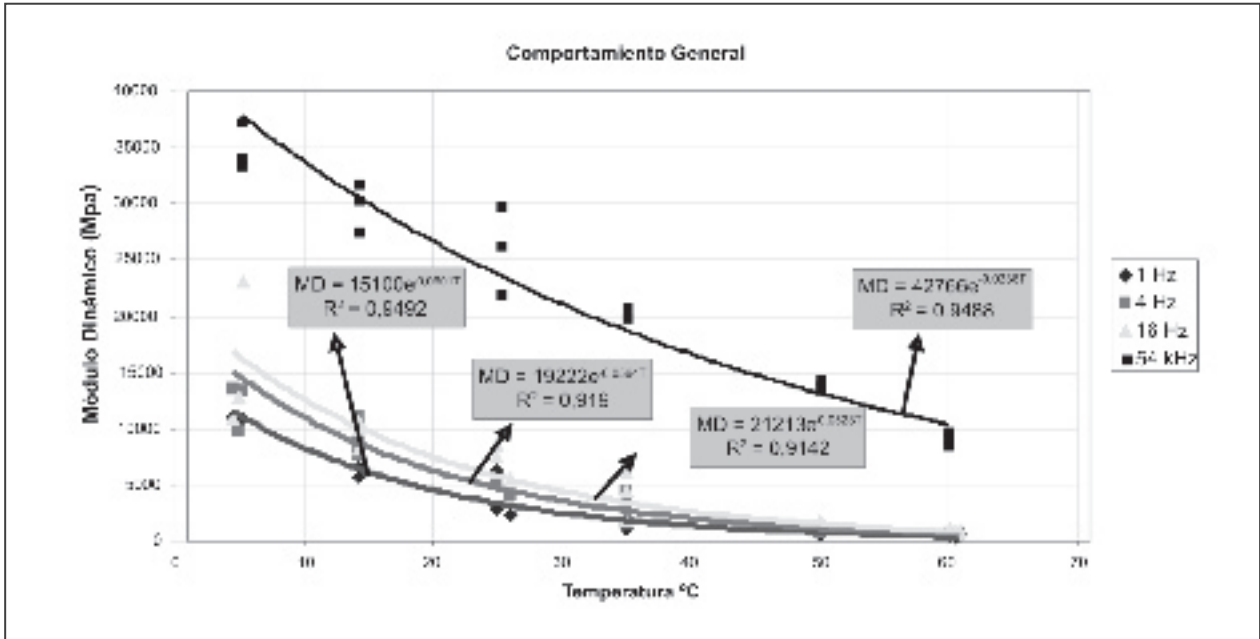


Figura 12

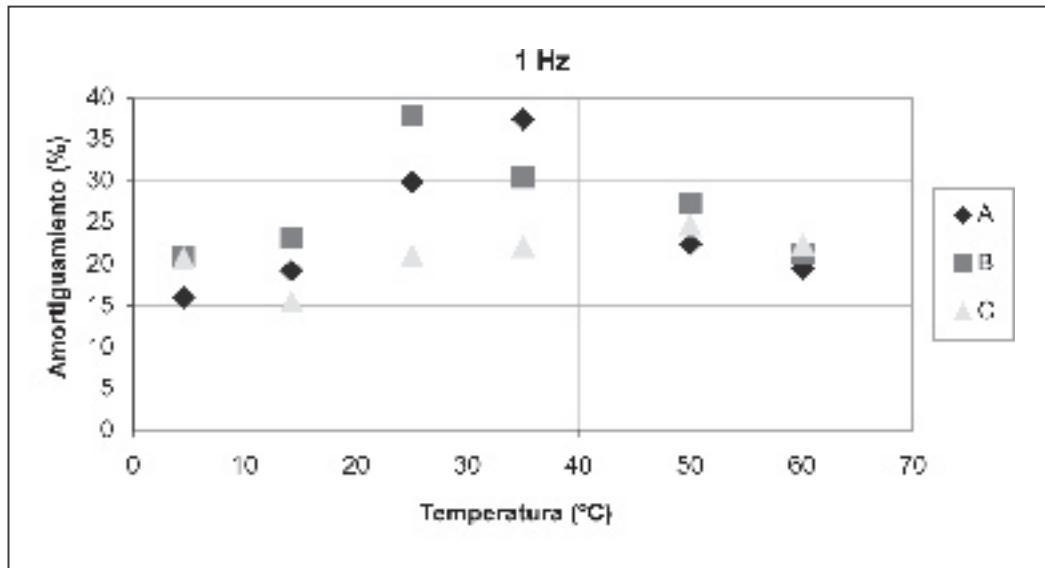


Figura 13

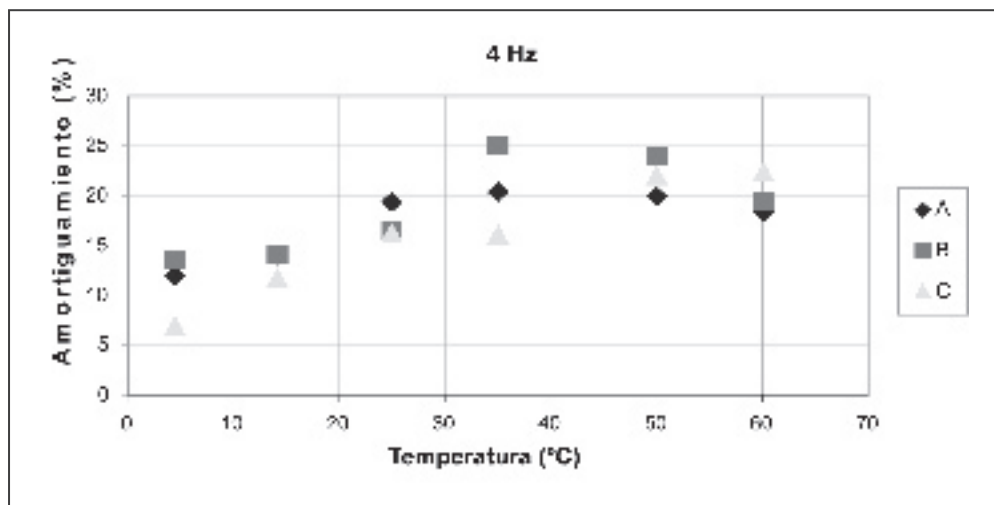
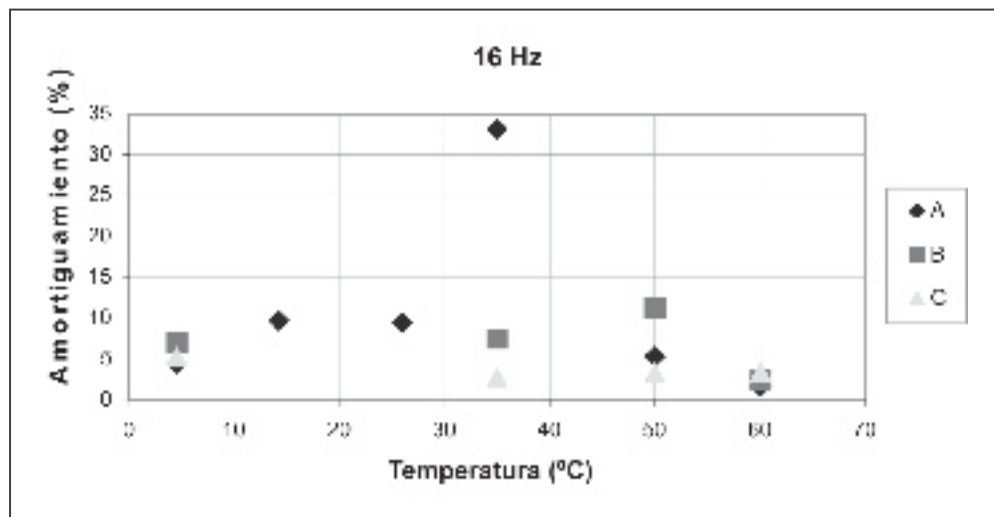


Figura 14



Las ecuaciones 3, 4 y 5 presentan la relación del módulo dinámico obtenido con el ultrasonido (M_{us}) y el módulo obtenido directamente en el triaxial dinámico (M_d).

$$\text{Para 1 Hz: } M_d = 124,52 * e^{0,000129 * M_{us}} \quad (3), r^2 = 0,9659$$

$$\text{Para 4 Hz: } M_d = 211,20 * e^{0,000122 * M_{us}} \quad (4), r^2 = 0,9417$$

$$\text{Para 16 Hz: } M_d = 325,95 * e^{0,000113 * M_{us}} \quad (5), r^2 = 0,9286$$

Conclusiones

En el proceso de conformación de las muestras por medio de la compactación estática, se generan desviaciones máximas del peso unitario del orden de un 2%, lo cual indica que se logra buena homogeneidad en la probeta.

El efecto de aumento de la frecuencia de carga se evidencia en un aumento del módulo dinámico. Dicho comportamiento es evidente a temperaturas bajas, pero en el caso de temperaturas altas cercanas al punto de ablandamiento del asfalto, se podría decir que el módulo dinámico varía muy poco y en algunos casos es igual.

Era de esperarse que se obtuvieran mayores módulos dinámicos en las mezclas fabricadas con materiales completamente triturados, pero el efecto de la susceptibilidad térmica del asfalto no permite tomar una decisión clara al respecto. Además se ratifica la importancia de la calidad del cemento asfáltico dentro de la mezcla.

Si se observa en las gráficas el comportamiento de temperatura contra módulo dinámico, se destaca que el módulo dinámico cambia apreciablemente a partir de temperaturas entre 25 °C y 35 °C. Para temperaturas cercanas y superiores a la del punto de ablandamiento, el módulo dinámico es prácticamente el mismo y relativamente bajo; esto hace pensar sobre el valor del módulo dinámico en lugares en los cuales la temperatura en la carpeta asfáltica puede ser del orden de 50 °C; hecho muy posible en horas del medio día. En el Valle de Aburrá se pueden alcanzar valores superiores a 40 °C en la superficie, a 2 cm de profundidad y 4 cm de profundidad en la carpeta, lo que conlleva a módulos no superiores a 2000 MPa a la frecuencia de 1 Hz como caso desfavorable y que representa la velocidad de los vehículos a la hora pico (12:00 m a 2:00 pm).

Es importante tener en cuenta que la relación de Poisson es una propiedad de difícil determinación y se requiere de montajes muy cuidadosos, pues se genera una gran dispersión en los resultados. Los valores entregados en la tabla 5 deben refinarse y el autor los entrega sólo como una guía del valor, pues se requiere de más mediciones para tener un valor confiable.

El objetivo de obtener el módulo dinámico por el método del ultrasonido (método indirecto) es el de obtener una mejor tendencia del comportamiento de las curvas de frecuencia contra módulo dinámico, para frecuencias mayores a 16 Hz. Sin embargo es posible encontrar alguna expresión que permita el uso de este método indirecto, pero es necesario verificarla para cada región.

El cómo se comporta el amortiguamiento permite encontrar un indicio de las mezclas más deformables y qué situación de carga es más crítica (asunto sobre el que existe muy poca literatura). Se observa en las gráficas 12 y 13 un comportamiento no esperado del amortiguamiento al incrementar la temperatura, salvo el caso de la gráfica 14 en la cual se presenta un comportamiento importante. Para el caso del efecto de las frecuencias, el resultado era de esperarse, pues a altas frecuencias se presentan módulos dinámicos altos y por ende amortiguamientos más bajos, lo que indicaría que una mezcla asfáltica se deforma menos cuando la velocidad de los vehículos es mayor. Se observa en las figuras correspondientes que la mezcla perteneciente a la empresa C presenta menor deformación permanente.

Bibliografía

Garnica, P.; Gómez, J. A. y Sesma, J. A. (2002). "Mecánica de Materiales para Pavimentos". En: *Instituto Mexicano del Transporte Publicación Técnica*. No. 197. México: Instituto Mexicano del Transporte.

National Cooperative Highway Research Program. (2004). "Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design". En: *Research Results Digest*, Nr 285, January.

_____. (1997). "Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design". En: *Georgia Tech Project E20-634*, June.

Reyes Lizcano, F. A. (2003). *Diseño Racional de Pavimentos*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería y Centro editorial Javeriano.

Timothy R., C.; Xinjun L., M. O. y Marasteanu, E. L. (2003). *Dynamic And Resilient Modulus Of Mn/Dot Asphalt Mixtures*. Minnesota: Department of Civil Engineering, University of Minnesota.

Bigl, S. R. and R. L. Berg. (1996). "Material Testing and Initial Pavement Design Modelling, Minnesota Road Research Project", en: *CRREL Report*, 96-14, September. Minnesota: US Army Corps of Engineers.

Witzack, M. W.. (2003). "Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design". En: *Final Report*, may. Tempe-Arizona. National Cooperative Highway Research Program.

Flintsch, G., Al-Qadi, Imad L., Loulizi, Amara y Mokarem, David. (2005). "Laboratory tests for hot-mix asphalt characterization in Virginia". En: *Final Report*, june. Charlottesville. Virginia Transportation Research Council.

Katicha. Samer W.. (2003). "Development of Laboratory to Field Shift Factors for Hot-Mix Asphalt Resilient Modulus". November. Blacksburg. Virginia Polytechnic Institute and State University

Dougan, Charles. Stephens, Jack. Mahoney, James. Hansen, Gilbert. (2003). *E* - DYNAMIC MODULUS Test Protocol - Problems and Solutions*. Connecticut: Transportation in Cooperation with the U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.