

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE CIVIL**

**DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**“CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE  
MEDIANTE LA OBTENCIÓN DE CURVAS MAESTRAS DE  
MÓDULO DINÁMICO”**

**AUTORES**

**EDWIN ALEXIS ESPIN REAL**

**FRANCISCO ANTONIO JARAMILLO GUIJARRO**

**DIRECTOR: ING. JUAN ENRIQUE MERIZALDE**

**QUITO, 2016**

## **DEDICATORIA**

A nuestras familias, de manera especial a nuestros padres quienes han sido un pilar fundamental en cada paso que hemos dado sobre todo a largo de nuestra formación universitaria, quienes con su arduo esfuerzo y apoyo incondicional en cada momento, nos impulsaron para culminar una meta más en nuestras vidas. Anhelamos profundamente tener su apoyo y compañía para convertirnos en el día a día en mejores profesionales.

A todas las personas que nos colaboraron de una u otra manera para la culminación de esta Disertación de grado.

## **AGRADECIMIENTO**

A la Pontificia Universidad Católica del Ecuador por habernos brindado la oportunidad de educarnos tanto académica como moralmente.

A nuestro director de tesis Ing. Juan Enrique Merizalde, por su esfuerzo y dedicación quien con sus conocimientos y motivación ha logrado que culminemos nuestros estudios con éxito.

A nuestros lectores Ing. Gustavo Yáñez e Ing. Patricio Castro quienes de manera constante fueron una gran ayuda en el desarrollo de esta disertación de grado desde el inicio hasta la presente culminación.

A nuestros padres y hermanos por ser un motor incesante de amor y soporte en toda nuestra carrera universitaria.

Finalmente, agradecemos a nuestros amigos, quienes cumplieron el papel principal en convertir de esta etapa universitaria en una experiencia inolvidable.

## **Resumen**

El motivo de esta disertación es mostrar un comportamiento semejante a la realidad dentro de muestras asfálticas en caliente obteniendo curvas maestras de la relación del módulo dinámico con la aplicación de cargas en diferente combinación de rangos de frecuencia y temperatura, implementando una nueva metodología de diseño como lo es el método Mecanístico-Empírico M-E PDG.

Las curvas maestras son utilizadas para caracterizar el desempeño de materiales bituminosos. Las pruebas del módulo dinámico se realizaron en base a la norma AASHTO TP62-03, con una combinación de 5 temperaturas y 6 frecuencias. El trabajo se llevó a cabo utilizando 3 probetas por planta de producción de mezcla asfáltica, con las cuales se realiza la caracterización de la mezcla mediante los ensayos de la Gravedad Especifica Teórica Máxima Rice, Contenido de Asfalto median el uso del Horno de Ignición, Gravedad Especifica Bulk y Ensayo del Módulo Dinámico. Con los resultados obtenidos se procede a la construcción de la curva maestra la misma que se realizó en una hoja de cálculo en Microsoft Excel con la función solver, la cual es una herramienta para la optimización mediante la técnica no lineal de regresión de los mínimos cuadrados y utilizando el principio de superposición de carga-temperatura que permite realizar un arreglo de datos usando la función sigmoïdal, resolviendo simultáneamente los coeficientes de forma de dicha función dando como resultados un mejor ajuste de la curva.

## **Abstract**

The reason of this thesis is to show the similar behavior of reality in hot mix asphalt with obtaining master curves of dynamic modulus the relation related to the application of a different combination of frequency and temperatures ranges, applying a new design methodology as the Mechanistic-Empirical M-E PDG method.

The master curves are used to characterize the performance of bituminous materials. Dynamic modulus testing was performed based on the standard normative AASHTO TP62-03, with a combination of 6 frequencies and 5 temperatures. The work was carried out using 3 specimens per asphalt production, with which the characterization of the mixture is done by testing the Specific Gravity Theoretical Maximum Rice, Asphalt Content Using the Ignition Method, Bulk Specific Gravity and Dynamic Modulus Test. With the results we proceed to the construction of the master curve in Microsoft Excel with the solver function, which is a tool for optimization by nonlinear regression technique of least squares and using the superposition principle load-temperature that allows an array of data using the sigmoidal function, simultaneously solving coefficients form of the function giving as results a better curve fit.

## **ÍNDICE DE CONTENIDO.**

1. CAPÍTULO I – GENERALIDADES .....	1
1.1. MARCO TEORICO.....	1
1.1.1 Introducción.....	1
1.1.2. Alcance.....	2
1.1.3. Objetivos .....	2
1.2. MÓDULO DINÁMICO.....	3
1.2.1 Definición.....	3
1.2.2. Expresiones Matemáticas .....	6
1.2.3. Usos del Módulo Dinámico.....	7
1.3. DESCRIPCIÓN DE LA GENERACIÓN DE LA CURVA MAESTRA .....	8
1.4. DESCRIPCIÓN DE LAS MEZCLAS A UTILIZAR .....	15
1.5. METODOLOGÍA.....	17
1.5.1. MEZCLA 1: Planta EPMMOP- Carpeta Asfáltica.....	18
1.5.2. MEZCLA 2: Planta EPMMOP-Base Asfáltica. ....	20
1.5.3. MEZCLA 3: Planta OCAMPO-Carpeta Asfáltica. ....	21
2. CAPÍTULO II - ENSAYOS DE LABORATORIO.....	23
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA.....	24
2.1.1 Gravedad Especifica Teórica Máxima Rice.....	24
2.1.2. Contenido de Asfalto.....	25
2.1.3. Gravedad Específica Bulk. ....	26
2.2. ENSAYO MÓDULO DINÁMICO. ....	27
2.3. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS .....	29
2.3.1. Gravedad Específica Teórica Máxima Rice.....	30
2.3.2. Contenido de Asfalto.....	30
2.3.3. Gravedad Específica Bulk. ....	31
3. CAPÍTULO III.....	32
3.1. Caracterización de la mezcla .....	32

3.1.1. MEZCLA 1 .....	32
3.1.2. MEZCLA 2 .....	36
3.1.3. MEZCLA 3 .....	40
3.2. Módulo Dinámico .....	45
3.2.1. Tabulación de Datos.....	45
3.2.2. Metodología para elaborar la hoja de cálculo en Microsoft Excel para la construcción de las curvas maestras .....	49
3.2.3. Caracterización de la mezcla para módulo dinámico.....	50
3.2.3. Generación de la curva maestra .....	55
3.2.4. Análisis de las Curvas Maestras .....	68
4. CAPITULO IV .....	79
4.1. Conclusiones .....	79
4.2. Recomendaciones .....	81
5. BIBLIOGRAFÍA.....	83

### **ÍNDICE DE ECUACIONES.**

Ecuación 1-1 Módulo complejo. (Yu, 2012:11).....	6
Ecuación 1-2 Angulo de Fase por Witzcak (Yu, 2012:11).....	6
Ecuación 1-3 Realcion entre módulo complejo modulo dinamico.....	6
Ecuación 1-4 Ecuación de Shift Factor (Yusoff, Chailleux y Airey, 2011:324).....	9
Ecuación 1-5 Ecuación empírica de William Landel y Ferry (Pellinen; Witzcak y Bonaquist, 2003:87).....	9
Ecuación 1-6 Ecuación de Arrhenius (Pellinen; et al, 2003:87).....	10
Ecuación 1-7 Ecuación Log-linear (Pellinen et al, 2003:88): .....	11
Ecuación 1-8 Ecuación Viscosity Temperature Susceptibility [VTS} (Pellinen et al, 2003:88).....	11
Ecuación 1-9 Usos de la Ecuacion de la Funcion Sigmoidal (Pellinen et al, 2003:85).....	12
Ecuación 1-10 Logaritmo de la frecuencia reducido (Pellinen et al, 2003:84) .....	13
Ecuación 2-1 Gravedad específica teórica máxima Rice. ....	30
Ecuación 2-2 Gravedad específica Bulk.....	31

## **ÍNDICE DE FIGURAS.**

Figura. 1-1 Módulo Dinámico (Leiva, 2006). .....	4
Figura. 1-2 Angulo de Fase y Carga Cíclica (Sanchez 2009) .....	4
Figura. 1-3 Curva Maestra del Módulo Dinámico. (Ulloa; Elizondo y Badilla, 2007:5).....	8
Figura. 1-4 Rango de valores para C1 y C2 (Pellinen et al 2003).....	10
Figura. 1-5 Valores para $\beta$ (Pellines et al, 2003) .....	11
Figura. 1-6 Función Sigmoideal (Pellinen et al, 2003:86) .....	12
Figura. 1-7 Módulo dinámico del laboratorio en función del tiempo de carga (Leiva, 2006)13	
Figura. 1-8 Modulo Dinámico vs Frecuencia Reducida (Yusoff et al, 2011:325).....	14
Figura. 1-9 Determinación de la curva maestra de rigidez para mezcla asfáltica (Leiva, 2006) .....	14
Figura. 1-10 Criterios de confiabilidad para los resultados de la Curva Maestra. (Yusoff et al 2011:328).....	15
Figura. 1-11 Ubicación geográfica planta asfáltica DMQ (Google Maps). .....	16
Figura. 1-12 Ubicación geográfica planta asfáltica Ocampo (Google Maps). .....	17
Figura. 2-1 Modulo dinámico VS Porcentaje de vacíos (Croney et al 1998:208).....	25
Figura. 2-2 Modulo dinámico VS Porcentaje de asfalto (Croney et al 1998:209). .....	26
Figura. 3-1 Granulometría mezcla 1 en escala semi-logaritmica .....	33
Figura. 3-2 Tabla de precisión de la Gravedad Especifica Bulk (INVE223-07:E223-6).....	36
Figura. 3-3 Granulometría mezcla 2 en escala semi-logaritmica. ....	37
Figura. 3-4 Granulometría mezcla 3 en escala semi-logaritmica. ....	41
Figura. 3-5 Relación del módulo dinámico y tiempo de carga.....	52
Figura. 3-6 Factor de corrección horizontal vs temperatura.....	52
Figura. 3-7 Construcción de la curva maestra para mezclas asfálticas (tiempo).....	53
Figura. 3-8 Relación del módulo dinámico y frecuencia de carga. ....	54
Figura. 3-9 Construcción de la curva maestra para mezclas asfálticas (frecuencia). ....	54
Figura. 3-10 Curva maestra de la muestra M1. ....	56
Figura. 3-11 Curva maestra de la muestra M2. ....	57
Figura. 3-12 Curva maestra de la muestra M3 .....	58
Figura. 3-13 Curva maestra promedio de la mezcla 1.....	59
Figura. 3-14 Curva maestra de la muestra N1 .....	60
Figura. 3-15 Curva maestra muestra N2.....	61

Figura. 3-16 Curva maestra Muestra N3. ....	62
Figura. 3-17 Curva maestra de la mezcla 2. ....	63
Figura. 3-18 Curva maestra muestra 1.....	64
Figura. 3-19 Curva maestra muestra 2.....	65
Figura. 3-20 Curva maestra muestra 3.....	66
Figura. 3-21 Curva maestra mezcla 3.....	67
Figura. 3-22 Curvas maestras de las tres mezclas. ....	72

### **ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.**

Fotografía 1-1 Ubicación de la carretilla junto a la mezcla.....	18
Fotografía 1-2 Obtención de la mezcla.....	19
Fotografía 1-3 Recipiente hermético para transportar la mezcla.....	19

### **ÍNDICE DE TABLAS.**

Tabla 1-1 Especificaciones generales para carpeta asfáltica (Ministerio De Obras Publicas Y Comunicaciones, 2002:IV-95).....	20
Tabla 1-2 Especificaciones generales para bases asfálticas (Ministerio De Obras Publicas Y Comunicaciones, 2002:IV-49).....	21
Tabla 1-3 Especificaciones generales para carpeta asfáltica (Ministerio De Obras Publicas Y Comunicaciones, 2002:IV-95).....	22
Tabla 3-1 Resultado de la gravedad especifica máxima teórica RICE.....	34
Tabla 3-2 Resultado del contenido de asfalto.....	34
Tabla 3-3 Resultado de la gravedad especifica BULK.....	35
Tabla 3-4 Resultado de la gravedad especifica máxima teórica RICE.....	38
Tabla 3-5 Resultado del contenido de asfalto.....	38
Tabla 3-6 Resultado de la gravedad especifica BULK.....	39
Tabla 3-7 Resultado de la gravedad especifica máxima teorice RICE.....	42
Tabla 3-8 Resultado del contenido de asfalto.....	42
Tabla 3-9 Resultado de la gravedad especifica BULK.....	43
Tabla 3-10 Resumen de resultados de ensayos. ....	44
Tabla 3-11 Módulos dinámicos para la mezcla 1: Planta EPMMOP.....	46
Tabla 3-12 Módulos dinámico para la mezcla 2: Planta EPMMOP.....	47
Tabla 3-13 Módulos dinámicos para la mezcla 3: Planta OCAMPO.....	48

Tabla 3-14 Caracterización de la mezcla asfáltica para módulo dinámico. ....	51
Tabla 3-15 Módulos dinámicos obtenidos con la hoja de cálculo.....	68
Tabla 3-16 Módulos dinámicos promedio.....	70

## **ÍNDICE DE ANEXOS.**

**Anexo 1** ASTM D2041/D2041M – 11 Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.

**Anexo 2** AASHTO T 308: Determining the Asphalt Binder Content of Hot Mix Asphalt (HMA) by the Ignition Method.

**Anexo 3** ASTM D2726/D2726M – 14: Standard Test Method For Bulk Specific Gravity and Density Of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures.

**Anexo 4** AASHTO TP 62-03, Determining Dynamic Modulos of Hot Mix Asphalt (HMA).

**Anexo 5** Programa para el cálculo del módulo dinámico

**Anexo 6** Resultado de los ensayos de caracterización de la mezcla 1

**Anexo 7** Resultado de los ensayos de caracterización de la mezcla 2

**Anexo 8** Resultado de los ensayos de caracterización de la mezcla 3

**Anexo 9** Gráficas para la construcción de curvas maestras.

# 1. CAPÍTULO I – GENERALIDADES

## 1.1. MARCO TEORICO

### 1.1.1 Introducción

Hoy en día para que un país pueda desarrollarse desde un punto de vista tanto económico como social debe tener una red vial de excelencia, su estado y nivel de servicio deben de ser de alta calidad, es decir, carreteras de primer orden, tanto autopistas como caminos vecinales, para que así la población pueda comunicarse de mejor manera aportando al desarrollo del país.

Actualmente en el Ecuador se puede evidenciar el constante crecimiento de la infraestructura vial para formar nexos de comunicación socio-económica, y junto con este crecimiento el parque automotor del país también crece y de manera acelerada, esto hace que se lleve a cabo un especial énfasis en implementar y mejorar la calidad de las obras viales a nivel nacional para que puedan resistir el impacto que genera el crecimiento del país y sobre todo asegurar la utilización de materiales apropiados que garanticen el buen desempeño de la infraestructura.

En la ciudad de Quito existe un gran deterioro de las principales vías de acceso y avenidas, debido a que en la construcción de las mismas se utilizan mezclas asfálticas elaboradas dentro de la ciudad junto con un diseño de la estructura del pavimento usando métodos convencionales, y a la falta de investigación para encontrar técnicas o nuevas metodologías de diseño que permitan mejorar las propiedades físico/mecánicas de un pavimento flexible.

Si bien es cierto el Método AASHTO 93 ha sido el principal método utilizado para el diseño de pavimentos, ante este panorama varios países latino americanos han decidido implementar una nueva metodología de diseño como lo es el método Mecánico – Empírico M-E PDG, el cual consiste en estudiar el comportamiento ante cargas dinámicas de un pavimento, esto mostrará un comportamiento semejante a la realidad dentro de un pavimento flexible.

El desarrollo de este tema contemplará, proporcionar a los diseñadores un dato de referencia como es el módulo dinámico, con el cual se tenga conocimiento de las características y condiciones necesarias para la aplicación del método antes mencionado.

El método consiste en aplicar un esfuerzo de compresión axial sinusoidal (medio seno inverso) a un espécimen de concreto asfáltico para una temperatura y frecuencia de carga dadas. Se mide la recuperación de la deformación axial del espécimen y se emplea para calcular el módulo dinámico. Los valores del módulo dinámico se pueden emplear tanto para el diseño de la mezcla asfáltica como para el diseño del espesor de la capa de pavimento asfáltico. (Instituto Nacional de Vías [INVIAS], 2010:E754-2)

### **1.1.2. Alcance**

El objetivo final de la tesis es obtener tres curvas maestras, con las que se espera representar el módulo dinámico de tres mezclas asfálticas en caliente, una muestra de carpeta asfáltica y otra de base asfáltica las cuales son producidas en la planta asfáltica del DMQ y la tercera muestra de carpeta asfáltica fue tomada de la planta de asfalto Ocampo.

### **1.1.3. Objetivos**

#### **1.1.3.1. Objetivo General**

Construir curvas maestras de mezclas asfálticas en caliente utilizadas en la ciudad de Quito, generando información para el diseñador de pavimentos como lo es el módulo dinámico, el mismo que permitirá el desarrollo adecuado de la teoría de diseño Mecanístico – Empírico M-E PDG dentro del sector.

#### **1.1.3.2. Objetivos Específicos**

1. Promover el uso del método de diseño de pavimentos Mecanístico – Empírico M-E PDG, propuesto por la AASHTO en el año 2008.
2. Caracterizar las mezclas asfálticas y verificar el cumplimiento de parámetros de diseños de las mezclas, por medio de ensayos granulométricos, Gravedad Específica teórica máxima Rice, Gravedad Específica Bulk y Contenido de asfalto mediante el horno de Ignición.
3. Comparar información del catálogo de curvas maestras generado por el Laboratorio de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador con la información que se obtendrá con el desarrollo del tema.

## 1.2. MÓDULO DINÁMICO

### 1.2.1 Definición.

El módulo dinámico de una mezcla asfáltica se define como el valor absoluto de la relación entre el valor del esfuerzo máximo y el de la deformación unitaria máxima, obtenido en un ensayo a compresión (uniaxial o triaxial), a flexión y tracción indirecta, utilizando una carga de tipo sinusoidal (Higuera, Naranjo y Cetina 2011:48).

La norma American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO] TP 62 – 03 (2001: TP 62-3), define tres conceptos relacionados con el estudio de módulo dinámico:

*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  $|E^*|$ .

*Módulo Complejo:* Es un número complejo que define la relación entre esfuerzo y deformación para un material visco-elástico lineal,  $E^*$ .

*Angulo de fase:* el ángulo en grados entre los picos de las funciones sinusoidales de esfuerzo y deformación en un ensayo controlado de esfuerzos.

Haciendo un análisis de los conceptos antes mencionados se puede expresar que el módulo dinámico de una mezcla asfáltica en caliente (material visco-elástico) se lo obtiene mediante la relación del esfuerzo y deformación unitaria producidos en los picos de la curva de carga continua sinusoidal, se conoce como material visco-elástico aquel cuyo comportamiento es de tipo reológico (estudio de los principios físicos que regulan el movimiento de los fluidos) y exhibe tanto propiedades viscosas como elásticas cuando sufre una deformación. Siendo la viscosidad, la propiedad que permite al material resistir deformaciones ante cargas transversales y elasticidad aquella propiedad que permite al material deformarse proporcionalmente al esfuerzo aplicado.

Complementando el concepto, 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 ( $\omega$ ). Como se muestra en la Figura. 1-1 Módulo Dinámico (Leiva, 2006).

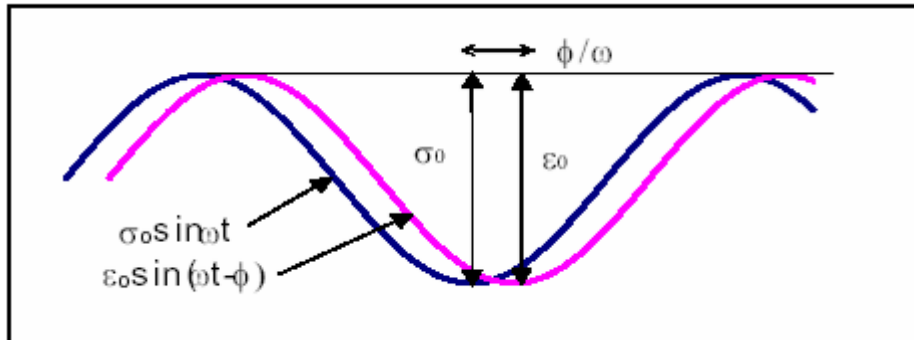


Figura. 1-1 Módulo Dinámico (Leiva, 2006).

Observando el gráfico anterior se puede obtener como información que existe un desfase entre la respuesta de deformación con respecto al esfuerzo aplicado al mismo, esta variación es lo que se denomina ángulo de fase y el mismo tendrá valores entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ .

Dicho ángulo es un indicador de las propiedades visco elásticas de un material, es así que los límites mencionados nos dan a conocer que para un valor de  $0^\circ$  un material se comportará de manera totalmente elástica mientras que para un valor de  $90^\circ$  su comportamiento será totalmente viscoso.

El término dinámico viene dado por la naturaleza de la carga aplicada a las muestras de laboratorio, la cual es cíclica. En la Figura. 1-2 Angulo de Fase y Carga Cíclica (Sanchez 2009) se representan dichos enunciados.

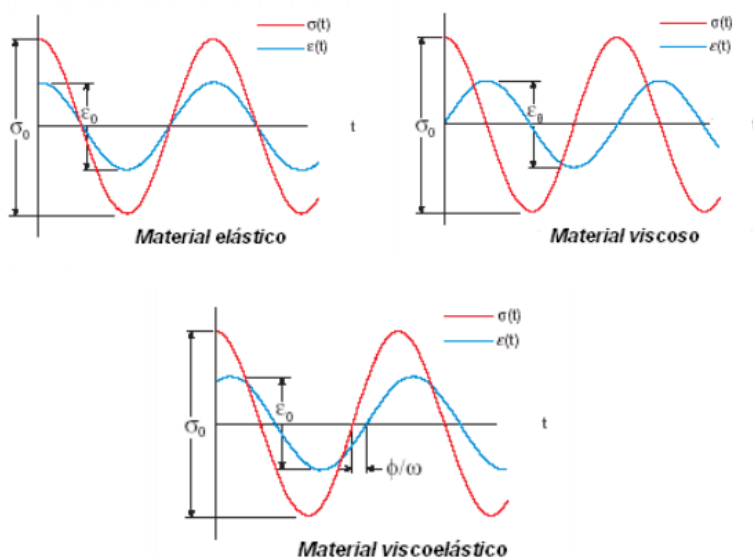


Figura. 1-2 Angulo de Fase y Carga Cíclica (Sanchez 2009)

Los parámetros a considerar en el estudio y obtención del módulo dinámico son los siguientes: temperatura, magnitud, frecuencia de carga y características de la mezcla como el contenido de ligante asfáltico y la viscosidad, granulometría de los agregados y porcentaje de vacíos. En la Guía de Diseño Mecánico-Empírico del Pavimento del Manual de Práctica M-E PDG de la AASHTO (Leiva, 2006) menciona tres niveles para determinar el módulo dinámico de una mezcla asfáltica en caliente, los cuales son:

- Nivel 1: el cual toma en cuenta los datos obtenidos de ensayos de laboratorio realizados,
- Nivel 2: en el cual se hace uso de modelos matemáticos con los cuales es posible obtener estimaciones, además de hacer uso de correlaciones con otras propiedades del material medidas en laboratorio o en campo.,
- Nivel 3: en el cual no se requiere ensayos de laboratorio para el ligante asfáltico pero si de ensayos que den a conocer ciertas propiedades volumétricas; consiste en la utilización de estimaciones que sean consideradas adecuadas por el diseñador.

Estos tres niveles tienen una jerarquización de acuerdo a su grado de importancia, () basados en la magnitud del proyecto, el tipo de vía y el recurso disponible para el uso de uno de ellos.

El nivel uno provee el grado más alto de precisión, es decir, los cálculos realizados bajo este nivel tendrán el menor grado de incertidumbre o error. El módulo dinámico en este caso será utilizado para el diseño de pavimentos que soporten cargas de tránsito muy pesado.

El nivel dos entrega un nivel medio de precisión, haciendo uso de monogramas como por ejemplo los desarrollados por Bonnaure y otros, basados en el módulo dinámico del asfalto y en las propiedades volumétricas de la muestra, este nivel puede ser empleado cuando no se tiene la disponibilidad de equipos para realizar ensayos de materiales necesarios.

El último nivel proporciona el menor grado de precisión, usado para vías con bajo nivel de tránsito, sin la necesidad de usar ensayos de laboratorio en donde se puede llegar a un diseño bajo estimaciones o coeficientes que se encuentran en la guía de diseño propuesta por la AASHTO 2008

Para esta disertación utilizamos los datos obtenidos en el laboratorio mediante los ensayos para la determinación del módulo dinámico y posteriormente la construcción de la curva maestra, lo que hace referencia al nivel uno considerado en el M-E PDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide).

### 1.2.2. Expresiones Matemáticas

El módulo dinámico puede ser matemáticamente expresado con la ecuación que se detalla a continuación, en la misma se encuentra reflejada la relación antes mencionada esfuerzo – deformación bajo una carga sinusoidal al mismo tiempo y frecuencia:

*Ecuación 1-1 Módulo complejo. (Yu, 2012:11)*

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 \sin \omega t}{\varepsilon_0 \sin(\omega t - \phi)}$$

*Ecuación 1-2 Angulo de Fase por Witzcak (Yu, 2012:11)*

$$\phi = \frac{t_i}{t_p} \times 360$$

*Ecuación 1-3 Relación entre módulo complejo modulo dinámico*

$$|E^*| = E^*$$

Dónde:

$E^*$  = Módulo Complejo

$|E^*|$  = Módulo Dinámico

$\sigma$  = Esfuerzo máximo

$\varepsilon_0$  = Deformación unitaria máxima

$\phi$  = Ángulo de fase

$t_i$  = Diferencia de tiempo entre un ciclo esfuerzo y deformaciones.

$t_p$  = tiempo de un ciclo de deformación.

$t$  = Tiempo

$\omega$  = Velocidad Angular, su fórmula es:

$$\omega = 2\pi f$$

$f$  = Frecuencia

### **1.2.3. Usos del Módulo Dinámico.**

En la Guía de Diseño Mecánico-Empírico de Pavimento (M-E PGD) propuesto por la AASHTO, se presenta un Manual de Práctica para el diseño óptimo de la estructura del pavimento, cuyo propósito es proveer a los diseñadores una herramienta práctica para el diseño y evaluación de estructuras de pavimento nuevo o rehabilitado basado en los principios Mecánicos-Empíricos, asegurando que se comporte satisfactoriamente bajo ciertas condiciones climáticas y de tránsito, sin superar valores límites en los indicadores de deterioro.

El método Mecánico empírico está basado en la aplicación de la mecánica estructural, con la cual nos será posible determinar la respuesta de los diferentes elementos estructurales que conforman el pavimento, tales como esfuerzos y deformaciones, debido a las cargas aplicadas por el tráfico (parte Mecánica), utilizando los fundamentos de la teoría elástica. Por otro lado se realizan estimaciones estadísticas con las cuales se obtienen datos de deformación permanente o fractura por fatiga del pavimento (parte Empírica). Al combinar estos dos elementos se tiene como resultado este método de diseño.

El procedimiento M-E PDG ayuda a predecir el comportamiento del pavimento sometido a esfuerzo y deformaciones, utiliza los parámetros de la curva maestra del módulo dinámico para el diseño de la estructura del pavimento, considerando de esta manera la variación de temperatura y carga que se puede producir, dando como resultado una mejor predicción del envejecimiento de la mezcla asfáltica, debido a que el software utilizado realiza una simulación diaria de los efectos producidos y los registra para poder contemplar si la estructura cumplirá con su objetivo al final del tiempo de análisis.

### 1.3. DESCRIPCIÓN DE LA GENERACIÓN DE LA CURVA MAESTRA

Con los resultados obtenidos en laboratorio, el siguiente paso es la construcción de la curva maestra de la mezcla con la cual se completará la caracterización de la muestra. Esta curva tiene como objetivo encontrar los valores de rigidez que dependen de la temperatura y de la frecuencia de carga. El diseño mecánico empírico parte como dato de referencia del módulo dinámico el cual se obtiene a partir de una curva maestra que se construye con el principio de superposición tiempo-temperatura. Consiste en seleccionar una temperatura estándar de referencia, ajustando los datos de diferentes temperaturas a esta temperatura con respecto al tiempo hasta que las curvas se unan en una única función suavizada, es decir que existe un valor equivalente de modulo para ciertas combinaciones de frecuencia-temperatura ((Pellinen; Witczak y Bonaquist, 2003:87). Con lo cual se logra integrar el conjunto de curvas en una sola función, como se muestra en la Figura. 1-3 Curva Maestra del Módulo Dinámico.

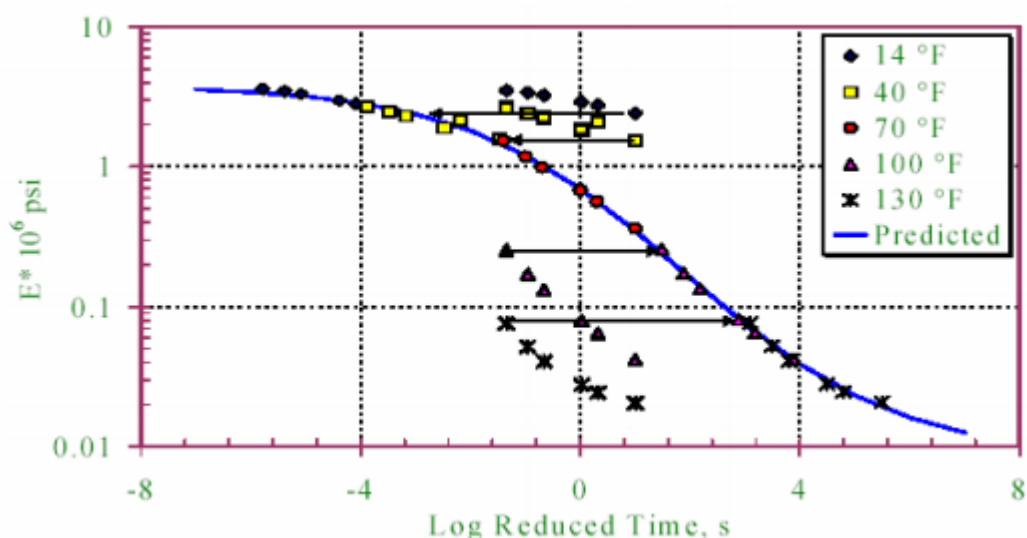


Figura. 1-3 Curva Maestra del Módulo Dinámico. (Ulloa; Elizondo y Badilla, 2007:5)

Para generar una curva maestra donde se muestre las propiedades reológicas, es decir el comportamiento de materiales visco-elásticos sometido a cargas mecánicas, se representan por el módulo dinámico y el ángulo de fase, junto con la determinación de factores de cambio o factor de corrección horizontal (Shift Factor) dependientes de cambios de temperatura en los parámetros reológicos. Este comportamiento de los bitúmenes puede ser expresado por:

*Ecuación 1-4 Ecuación de Shift Factor (Yusoff, Chailleux y Airey, 2011:324)*

$$a_T = \frac{f_r}{f}$$

Donde:

$a_T$  = Factor de corrección horizontal,

$f_r$  = Frecuencia reducida a una temperatura de referencia,

$f$  = Frecuencia a la cual fue realizado el ensayo.

El factor de corrección  $a_T$  solo produce movimientos horizontales y no influye en ningún movimiento vertical dentro de la construcción de la curva maestra. Según Yusoff et al (2011:324), el desplazamiento vertical es:

El desplazamiento vertical representa los cambios de densidad inducidos por la temperatura e implica cambios a lo largo del eje del módulo dinámico, ya que el rango de temperatura de los datos experimentales para bitumen es por lo general relativamente estrecha, los desplazamientos verticales sólo modifican ligeramente los resultados y por otra parte, el significado físico de desplazamiento vertical no es un guion principal para el betún, cuya estructura molecular es extremadamente complejo. Además, los cambios verticales dependen de la historia térmica de la muestra y se han encontrado para dar un cambio pobre de predicción tras el calentamiento para la mayoría de los betunes.

Existen varias funciones para la representación de curvas maestras, que se dividen en dos grupos, polinomial y sigmoideal. En el grupo de funciones polinomiales se encuentran:

*Ecuación 1-5 Ecuación empírica de William Landel y Ferry (Pellinen; Witczak y Bonaquist, 2003:87)*

$$\log a(T) = \frac{-c_1(T - T_o)}{c_2 + T - T_o}$$

$a(T)$  = Factor de corrección horizontal para  $T > T_g$  (Temperatura de transición vítrea.),

$T$  = Temperatura, °C,

$T_o$  = Temperatura referencial, °C, y

$C_1$  y  $C_2$  = Constantes Empíricas.

Esta ecuación se usa para temperaturas mayores a la temperatura de transición vítrea de materiales viscos elásticos. Las constantes C1 y C2 son parámetros de ajuste empíricos que dependen del material y de la temperatura de referencia a la que se encuentre dicho material. Para la obtención de estas constantes es necesario es necesario modificar la Ecuación 1-5 Ecuación empírica de William Landel y Ferry (Pellinen; Witczak y Bonaquist, 2003:87), de tal manera que C1 y C2 dependerá del Shift Factor y de la diferencia entre la temperatura de referencia y la temperatura de análisis, obteniendo como resultado la posibilidad de realizar graficas en las cuales se puede determinar los valores de C1 y C2 utilizando valores de Shif Factor arbitrarios para posteriormente obtener los valores reales de dicho factor. Un estudio realizado por Anderson, Christensen y Bahia en 1991 determino un rango de valores para las constantes empíricas C1 y C2 para mezclas asfálticas modificadas y no modificadas, como se muestra en la Figura. 1-4.

Statistics	Non-modified binders		Modified binders	
	C <sub>1</sub> (2)	C <sub>2</sub> (3)	C <sub>1</sub> (4)	C <sub>2</sub> (5)
Avg.	28,615	242,666	10,379	87,006
Mín.	33	268	19	149
Max.	125,158	9,999,919	119,439	999,919

Figura. 1-4 Rango de valores para C1 y C2 (Pellinen et al 2003)

Los rangos para dichos factores detallados en mezclas asfálticas no modificadas se utilizaran para la hoja de cálculo explicada más adelante en esta Disertación.

Ecuación 1-6 Ecuación de Arrhenius (Pellinen; et al, 2003:87)

$$\log a(T) = \frac{\Delta E_a}{2.303R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_o} \right)$$

$a(T)$  = Factor de corrección horizontal para  $T > T_g$ ,

$\Delta E_a$  = Energía aparente activada,

$R$  = Constante universal de gas = 8.314 J/°K-mol,

$T$  = Temperatura, °K,

$T_o$  = Temperatura referencial, °K.

Para Yusoff et al (2011:326), “la ecuación de Arrhenius necesita determinar solamente una constante,  $E_a$ , cual describe la energía mínima utilizada antes de que cualquier movimiento intermolecular ocurra”.

*Ecuación 1-7 Ecuación Log-linear (Pellinen et al, 2003:88):*

$$\log a \left( \frac{T}{T_o} \right) = \beta (T - T_o)$$

$\beta$  = La pendiente de la relación entre  $\log a(T)$  y temperatura.

A a temperaturas bajo a 0°C el  $\log a(T)$  varían linealmente con la temperatura para varios aglutinantes, por lo que esta relación funciona en mezclas asfálticas, y se cumple así la Ecuación 1-7 (Pellinen et al, 2003).

En la Figura. 1-5, se especifica los valores para  $\beta$  para mezclas no modificadas y modificadas.

Statistics (1)	Non-Modified $\beta$ (2)	Modified $\beta$ (3)
Avg.	-0.486	-0.414
Min.	-0.753	-0.783
Max.	-0.203	-0.247

*Figura. 1-5 Valores para  $\beta$  (Pellinen et al, 2003)*

*Ecuación 1-8 Ecuación Viscosity Temperature Susceptibility [VTS] (Pellinen et al, 2003:88)*

$$\log(\log \eta) = A + VTS[\log T_R]$$

$\eta$  = Viscosidad, coeficiente de Poise,

$T_R$  = Temperatura, °Rankine

$A$  = Intercepción de Regresión,

$VTS$  = Pendiente de regresión de la ecuación de Viscosity Temperature Susceptibility.

La técnica de desplazamiento de VTS se utiliza en el módulo dinámico predictivo de ecuaciones ("Dynamic Modulus Predictive Equation"), desarrollado por Witczak. Este

modelo de desplazamiento se base en el desplazamiento de la viscosidad y la temperatura. (Pellinen et al, 2003).

Al utilizar funciones de tipo polinomial pueden existir inconvenientes debido a que en altas y bajas temperaturas se obtienen valores irracionales del módulo dinámico. Es por esta razón que la función sigmoideal es la adecuada para realizar el respectivo ajuste ya que su aproximación asintótica a los límites de los valores del módulo dinámico permite un mejor acomodo de la curva. Por lo cual en la obtención de curvas maestras en esta disertación utilizaremos el método de la Ecuación 1-5 Ecuación empírica de William Landel y Ferry (Pellinen; Witczak y Bonaquist, 2003:87).

La gráfica de la curva maestra presenta como ordenadas al (Logaritmo en base 10 del módulo dinámico), y en las abscisas al (Logaritmo en base 10 de la frecuencia reducida, siendo esta la frecuencia de ensayo multiplicada por el Shift Factor  $a(T)$ , en Hz). La Figura. 1-6 Función Sigmoideal Representa un modelo de los componentes de dicha

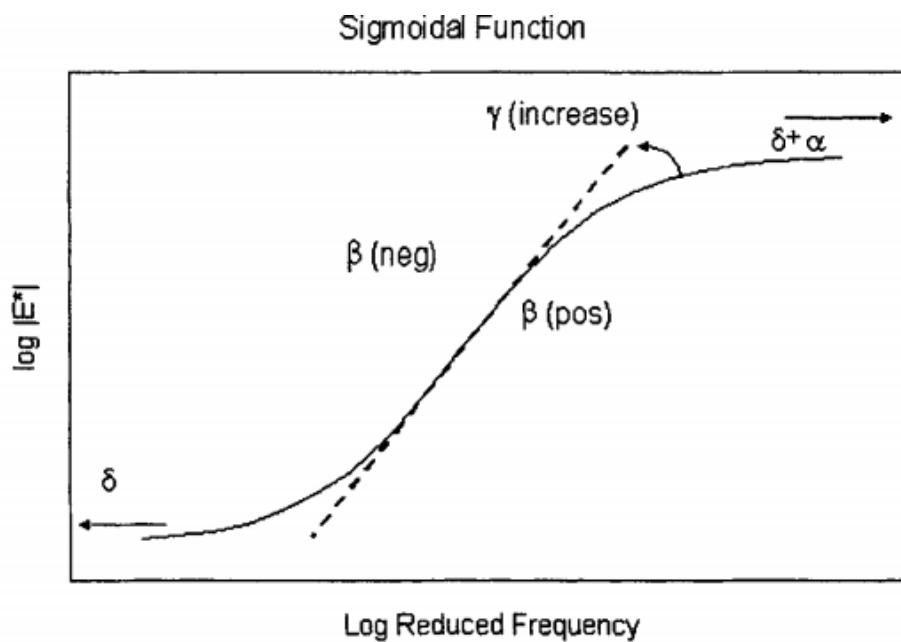


Figura. 1-6 Función Sigmoideal (Pellinen et al, 2003:86)

curva.

Para obtener el número de valores necesarios para la construcción correcta de la curva se utiliza las siguientes ecuaciones:

*Ecuación 1-9 Usos de la Ecuacion de la Funcion Sigmoideal (Pellinen et al, 2003:85)*

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

$|E^*|$  = Módulo dinámico;

$\xi$  = Frecuencia reducida;

$\delta$  = Valor mínimo del módulo;

$\alpha$  = Rango de Valores del Módulo;

$\beta, \gamma$  = Parámetros de Forma

En los parámetros de forma,  $\gamma$  tiene influencia en la parte que la curva tiene forma empinada, es decir la relación entre el valor mínimo y máximo, mientras que el parámetro  $\beta$  representa la posición horizontal del punto de inflexión en la curva.

*Ecuación 1-10 Logaritmo de la frecuencia reducida (Pellinen et al, 2003:84)*

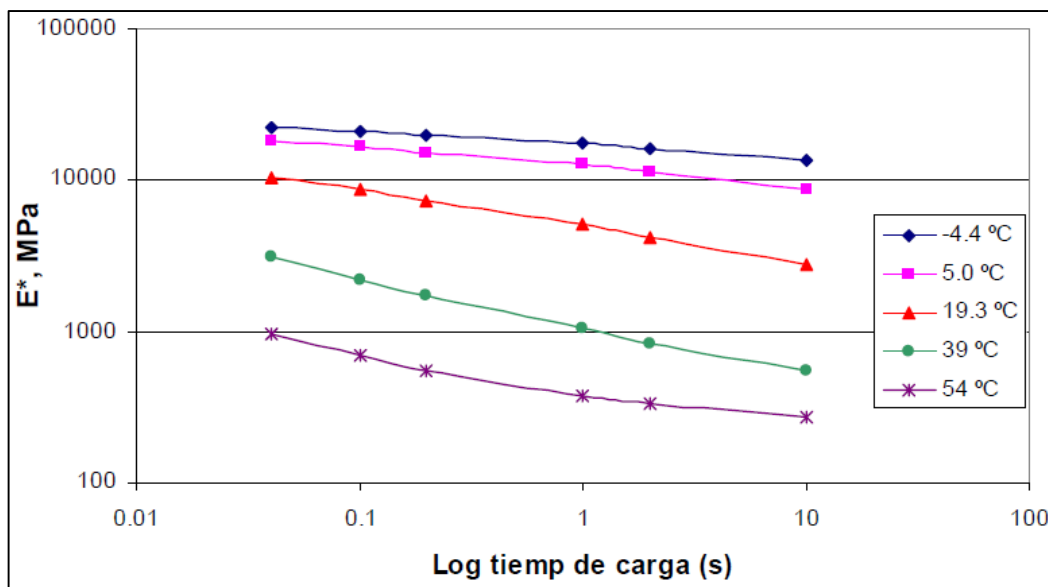
$$\log(\xi) = \log(f) + \log[a(T)]$$

Donde:

$f$  = Frecuencia en la que se realiza el ensayo;

$[a(T)]$  = Factor de corrección (Shift Factor).

La razón fundamental por el cual se suma la el  $\log(f)$  y el  $\log[a(T)]$ , es debido a que al momento de graficar, si en las abscisas se dibujará el  $\log(f)$  obtendríamos diferentes curvas como se puede apreciar en la Figura. 1-7.



*Figura. 1-7 Módulo dinámico del laboratorio en función del tiempo de carga (Leiva, 2006)*

Entonces, con lo mencionado anteriormente,  $a(T)$ , como factor de desplazamiento únicamente horizontal tiene como objetivo unificar las diferentes funciones graficadas en una sola curva suavizada a una temperatura normalizada, como se puede observar en la Figura. 1-8.

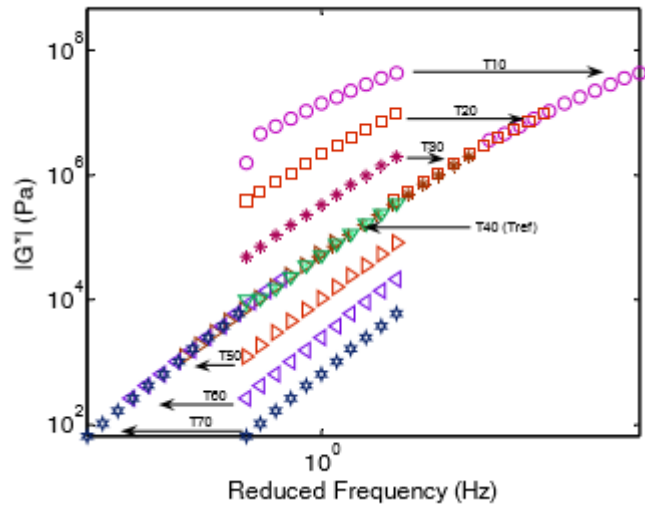


Figura. 1-8 Modulo Dinámico vs Frecuencia Reducida (Yusoff et al, 2011:325)

El resultado después de la adición, es una curva maestra como se puede observar en la Figura. 1-9 y por ende es por el cual se grafica en las abscisas el logaritmo de la frecuencia reducida.

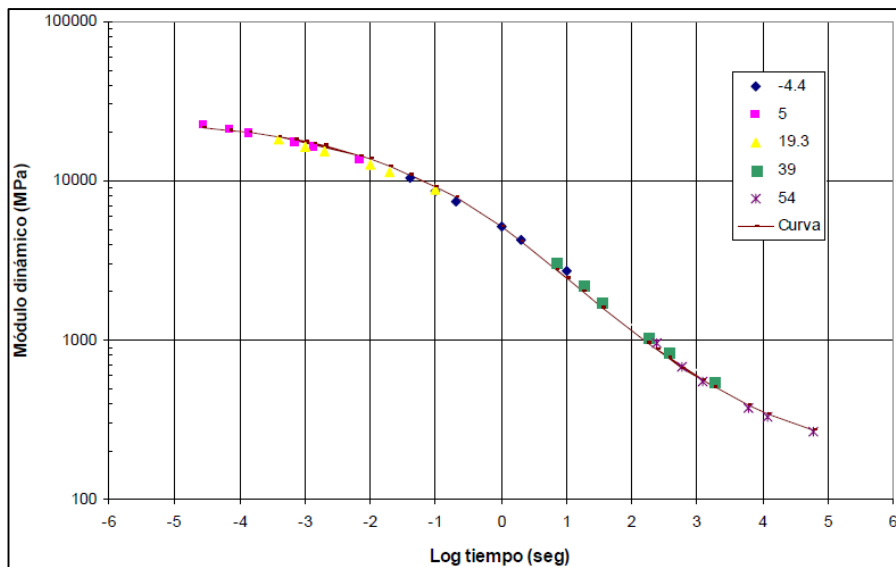


Figura. 1-9 Determinación de la curva maestra de rigidez para mezcla asfáltica (Leiva, 2006)

Para corroborar cuan confiable es la gráfica de una curva maestra, se puede realizar un gráfico en donde este el Shif Factor VS la Temperatura, obteniendo una línea de tendencia linear y el valor de  $R^2$ , que estable cual es la relación de cuanto se ve afectado el Shif Factor en función de que la Temperatura aumenta. Yusoff et all (2011:328) encontramos una tabla en donde podemos observar que tan confiable son nuestros resultados.

Criteria	$R^2$	$S_e/S_y$
Excellent	$\geq 0.90$	$\leq 0.35$
Good	0.70 – 0.89	0.36 – 0.55
Fair	0.40 – 0.69	0.56 – 0.75
Poor	0.20 – 0.39	0.76 – 0.89
Very Poor	$\leq 0.19$	$\geq 0.90$

Figura. 1-10 Criterios de confiabilidad para los resultados de la Curva Maestra. (Yusoff et al 2011:328)

La norma AASHTO TP 62-07, especifica las frecuencias y temperaturas a las cuales se deben realizar el ensayo, que serán descritos en el capítulo 2, el dominio de la curva puede ser tanto en temperatura como frecuencia, en el caso de este estudio se lo realizará basados a una temperatura base de 21°C seleccionado arbitrariamente de donde se partirá para realizar los cálculos de la curva maestra mediante el desplazamiento de los puntos para la conformación de la misma.

#### 1.4. DESCRIPCIÓN DE LAS MEZCLAS A UTILIZAR

En esta disertación, se analizará tres diferentes diseños de mezclas asfálticas en caliente, elaboradas por plantas asfálticas que operan dentro del Distrito Metropolitano de Quito. Con los cuales se ampliará el catálogo de curvas maestras existente en el laboratorio de materiales de construcción de la PUCE. En las figuras continuación se podrá observar el lugar donde se encuentran ubicadas las plantas de producción asfáltica. Las mezclas serán proporcionadas por las siguientes plantas asfálticas:

- Planta Asfáltica del DMQ (Flecha Azul en la Figura. 1-11 Ubicación geográfica planta asfáltica DMQ (Google Maps).)

- Planta Asfáltica Ocampo (Flecha Amarilla en la Figura. 1-12 Ubicación geográfica planta asfáltica Ocampo (Google Maps).)

La planta asfáltica del DMQ nos proporcionará 2 mezclas, las cuales utilizan el mismo asfalto pero sus agregados son pertenecientes a dos minas diferentes, la planta asfáltica Ocampo nos ayudará con la mezcla restante.

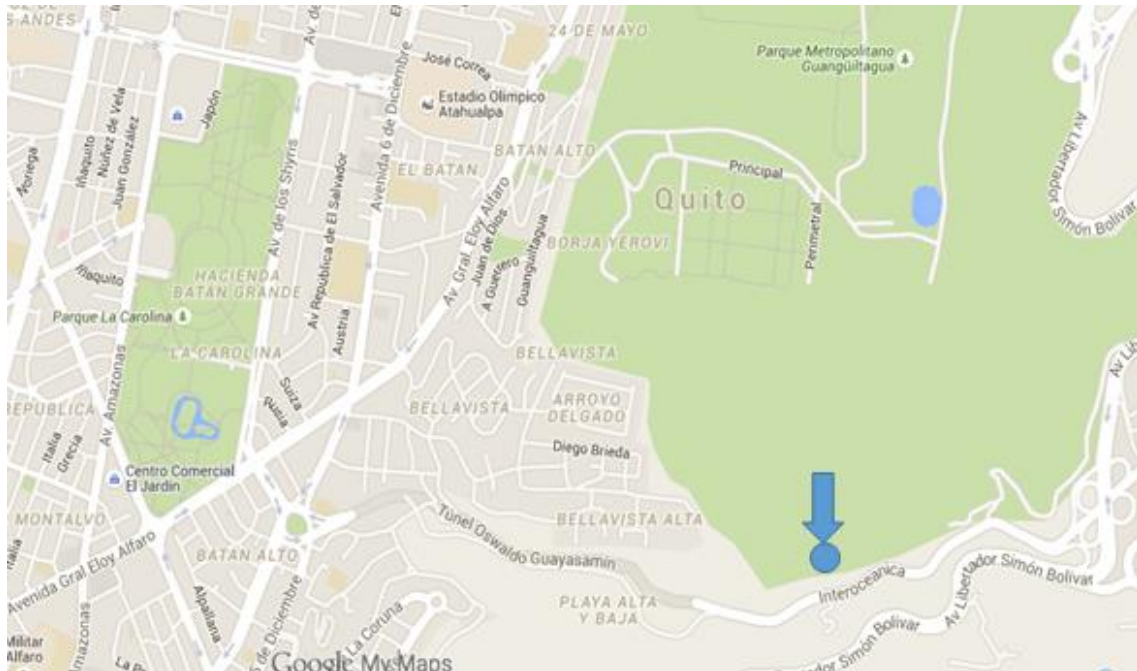


Figura. 1-11 Ubicación geográfica planta asfáltica DMQ (Google Maps).



Figura. 1-12 Ubicación geográfica planta asfáltica Ocampo (Google Maps).

Fuente: Google Maps

## 1.5. METODOLOGÍA.

El trabajo de muestreo se lo desarrolló en campo, en la planta de producción asfáltica se colocó una carretilla junto a la banda transportadora en su parte más baja y con una pala se extraía la mezcla para posteriormente colocarla en la carretilla, a continuación se colocaba la muestra en recipientes metálicos para su fácil transporte. Estos recipientes deben ser herméticos para evitar la inserción de agentes contaminantes y para evitar pérdida de material.

Al realizar el muestreo de esta manera, existirá segregación de material en la mezcla por lo que cuando la misma se encuentre en el laboratorio se debe realizar una homogenización de esta y colocarla en diferentes bandejas, cubiertas con papel aluminio, para su posterior utilización en los diferentes ensayos.

Los ensayos que se realizaron a las muestras tomadas en campo fueron los siguientes:

- Contenido de asfalto mediante el horno de ignición
- Granulometría de los agregados

- Gravedad específica máxima teórica RICE
- Gravedad específica de la mezcla compactada BULK
- Módulo dinámico

Los mismos que se encuentran descritos en el Capítulo II del presente documento.

### **1.5.1. MEZCLA 1: Planta EPMMOP- Carpeta Asfáltica.**

La muestra fue tomada en campo dentro de la planta, la cual está ubicada en la Av. Interoceánica, en el sector del túnel Oswaldo Guayasamín, a 500m pasando el peaje que se encuentra sobre esta avenida.

Para el diseño de la mezcla se clasifican a los agregados en tres tipos, denominados: grueso, medio y fino. La planta de la EPMMOP trabaja con agregados triturados (medio y grueso) provenientes de la mina de Pintag, mientras que el material fino proviene de una mina ubicada en Guayllabamba.

El asfalto utilizado en la mezcla es el producido por la Refinería Estatal de Esmeraldas (Petroproducción) AC – 20. El contenido de cemento asfalto óptimo utilizado en este diseño es de 6.3%.



*Fotografía 1-1 Ubicación de la carretilla junto a la mezcla.*



*Fotografía 1-2 Obtención de la mezcla.*



*Fotografía 1-3 Recipiente hermético para transportar la mezcla.*

Al tomar la muestra directamente de la planta no se comprueba la temperatura de la mezcla, puesto que la mezcla sale de la maquinaa una temperatura especifica.

Para que las muestras no tengan ningún agente contaminante, se decidió trasladarlas en recipientes herméticos. Identificados debidamente.

A continuación se presentan los datos relevantes que se utilizaron en el diseño de esta mezcla asfáltica.

Tamaño máximo nominal del agregado: 3/4”.

Franjas granulométricas de la mezcla de diseño de las Especificaciones Generales para construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F-2002 para Carpeta Asfáltica producida en planta:

*Tabla 1-1 Especificaciones generales para carpeta asfáltica (Ministerio De Obras Publicas Y Comunicaciones, 2002:IV-95)*

	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada		
1"	100		
3/4"	90	-	100
3/8"	56	-	80
#4	35	-	65
#8	23	-	49
#50	5	-	19
#200	2	-	8

### **1.5.2. MEZCLA 2: Planta EPMMOP-Base Asfáltica.**

La muestra fue tomada en campo dentro de la planta, la cual está ubicada en la Av. Interoceánica, en el sector del túnel Oswaldo Guayasamín, a 500m pasando el peaje que se encuentra sobre esta avenida.

Para el diseño de la mezcla se clasifican a los agregados en tres tipos, denominados: grueso, medio y fino. La planta de la EPMMOP trabaja para esta muestra con agregados triturados (medio y grueso) provenientes de la mina de EPMMOP, mientras que el material fino de la misma mina de la mezcla anterior.

El asfalto utilizado en la mezcla es el producido por la Refinería Estatal de Esmeraldas (Petroproducción) AC – 20. El contenido de cemento asfalto óptimo utilizado en este diseño es igual a la mezcla anterior.

Al tomar la muestra directamente de la planta no se comprueba la temperatura de la mezcla, puesto que la mezcla sale de la máquina a una temperatura específica.

Para que las muestras no tengan ningún agente contaminante, se decidió trasladarlas en recipientes herméticos. Identificados debidamente.

A continuación se presentan los datos relevantes que se utilizaron en el diseño de esta mezcla asfáltica.

Franjas granulométricas de la mezcla de diseño de las Especificaciones Generales para construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F-2002 para Base Asfáltica producida en planta:

*Tabla 1-2Especificaciones generales para bases asfálticas (Ministerio De Obras Publicas Y Comunicaciones, 2002:IV-49)*

Tamiz	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada		
1"	100		
3/4"	70	-	100
3/8"	50	-	80
#4	35	-	65
#8	23	-	50
#50	15	-	30
#200	3	-	12

### **1.5.3. MEZCLA 3: Planta OCAMPO-Carpeta Asfáltica.**

Esta muestra fue tomada en campo en la planta, la cual está ubicada en la vía Calacali a 1.8 km del redondel de la mitad del mundo.

Para el diseño de la mezcla se clasifican a los agregados en tres tipos, denominados: grueso, medio y fino. La planta de la EPMMOP trabaja para esta muestra con agregados triturados (medio y grueso) provenientes de la mina de EPMMOP, mientras que el material fino de la misma mina de la mezcla anterior.

El asfalto utilizado en la mezcla es el producido por la Refinería Estatal de Esmeraldas (Petroproducción) AC – 20.

Al tomar la muestra directamente de la planta no se comprueba la temperatura de la mezcla, puesto que la mezcla sale de la máquina a una temperatura específica.

Para que las muestras no tengan ningún agente contaminante, se decidió trasladarlas en recipientes herméticos. Identificados debidamente.

A continuación se presentan los datos relevantes que se utilizaron en el diseño de esta mezcla asfáltica.

Franjas granulométricas de la mezcla de diseño de las Especificaciones Generales para construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F-2002 para Base Asfáltica producida en planta:

*Tabla 1-3 Especificaciones generales para carpeta asfáltica (Ministerio De Obras Publicas Y Comunicaciones, 2002:IV-95)*

Tamiz	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada		
1"	100		
3/4"	90	-	100
3/8"	56	-	80
#4	35	-	65
#8	23	-	49
#50	5	-	19
#200	2	-	8

## 2. CAPÍTULO II - ENSAYOS DE LABORATORIO

Una mezcla asfáltica presenta un comportamiento mecánico complejo, ya que al ser un material reológico, sus características visco elásticas proporcionadas principalmente por el asfalto, permiten que el estudio de la mezclas ante la aplicación de un esfuerzo se vea influenciado por la temperatura, el nivel de la carga y la duración de dicha carga. A temperaturas bajas y tiempos muy cortos de aplicación de carga, las mezclas se comportan elásticamente. Por el contrario, a temperaturas altas y largos periodos de aplicación de cargas, la respuesta de las mezclas es viscosa.

A temperaturas elevadas, la propiedad mecánica de mayor importancia para el estudio de la mezcla es su estabilidad, mientras que a temperaturas bajas la resistencia a la fisuración por esfuerzos térmicos es el principal motivo de análisis. A temperaturas medias, los datos que nos interesan son su módulo y su resistencia a fatiga. De estas cuatro propiedades, la de mayor relevancia en varios estudios para la caracterización de mezclas es su estabilidad ya que tiene directa relación con la resistencia a las deformaciones plásticas. Se debe tener muy en cuenta la estabilidad de la mezcla depende de las características del ligante, pero que, en muchos casos, es predominante la granulometría de los áridos y el rozamiento interno de su esqueleto mineral. Estudios realizados en España, donde años atrás tuvieron problemas con las deformaciones plásticas, lo pudieron solucionar cambiando la granulometría y composición de las mezclas utilizadas en ese momento, logrando un aumento en el rozamiento interno de su esqueleto mineral y rebajando el porcentaje de árido fino y de ligante. Obtuvieron un mejor comportamiento con este nuevo tipo de mezcla. (Pérez y Miro, 2009)

La fatiga de un pavimento es otra de las propiedades que se debe tomar en cuenta al caracterizar y analizar al momento de realizar la mezcla asfáltica. A lo largo de su vida útil el pavimento es sometido a diferentes tipos solicitaciones, de entre las cuales algunas pueden producir rotura en su estructura así como fisuraciones leves debido a su fatiga. Esta propiedad depende de la granulometría y porcentaje de vacíos de la mezcla y en especial de las características del ligante empleado.

A bajas temperaturas, el principal problema de las mezclas bituminosas es su fisuración por retracción térmica. Al bajar la temperatura se produce un aumento en el módulo de rigidez de y se reduce la ductilidad del ligante asfáltico, produciéndose un problema en el cual el ligante no puede soportar el incremento de tensiones y deformaciones, dando

como resultado que la mezcla se fisure. El comportamiento de la mezcla a bajas temperaturas está regido en su mayor parte al tipo de ligante empleado y al porcentaje del mismo utilizado en su diseño.

Lo previamente expuesto pone de manifiesto que el caracterizar una mezcla asfáltica de manera adecuada y completa tiene un grado de complejidad muy alto, esto se debe a la necesidad de ensayos que permitan conocer propiedades que se presentan a futuro en el comportamiento de un pavimento flexible, por lo cual es necesario ejecutar al menos, los ensayos básicos que han sido realizados en esta disertación que son la base y otorgan datos primordiales en el diseño de una mezcla, además de servir para la elaboración de ensayos mucho más complejos y con ellos el estudio de los problemas expuestos.

El caracterizar una mezcla asfáltica tiene como objetivo obtener los parámetros básicos así como esenciales que permitan el posterior desarrollo de ensayos que brinden características específicas para diversos estudios de mezclas asfálticas. Existen varios modelos para caracterizar mezclas, los cuales han sido basados en la experiencia de laboratorios para la predicción del comportamiento mecánico de las mismas. Con el objetivo de estudiar la relación existente entre los ensayos propuestos en este trabajo de disertación con el módulo dinámico de mezclas asfálticas, se van a mencionar propiedades de pavimentos flexibles en las cuales son necesarios los datos obtenidos en los ensayos mencionados para su estudio.

## **2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA.**

En esta Disertación se realizó los siguientes ensayos, los cuales servirán para establecer una relación más amplia con otras propiedades complejas de una mezcla asfáltica. Los cuales son:

### **2.1.1 Gravedad Específica Teórica Máxima Rice.**

La Gravedad Específica Teórica Máxima Rice es un valor calculado de la mezcla asfáltica con la que se logra obtener el porcentaje de vacíos con aire que representaría la misma, estos valores son importantes para el proceso de compactación.

La norma de referencia para el proceso de este ensayo es la ASTM D2041/D2041M – 11 Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.

Shook y Kallas se dedicaron a una extensiva investigación entre el módulo dinámico de mezclas asfálticas usando varias frecuencias de cargas sinusoidales. Con muestras de 100mm de diámetro y 200mm de alto con frecuencias de 1, 4, y 16 ciclos por segundo, encontraron que el efecto del contenido de asfalto y el estado de compactación, está definido por la cantidad de vacíos de aire. El ensayo se realizó con una aplicación de 100 penetraciones (mezcla A) en una carpeta asfáltica normal, mientras que con una carpeta asfáltica más dura se usó un número de penetraciones de 50 (mezcla B). (Croney y Croney, 1998:208). La siguiente Figura. 2-1 Modulo dinámico VS Porcentaje de vacíos (Croney et al 1998:208). Muestra la relación que existe en el módulo dinámico ( $E^*$ ), el porcentaje de vacíos y la temperatura.

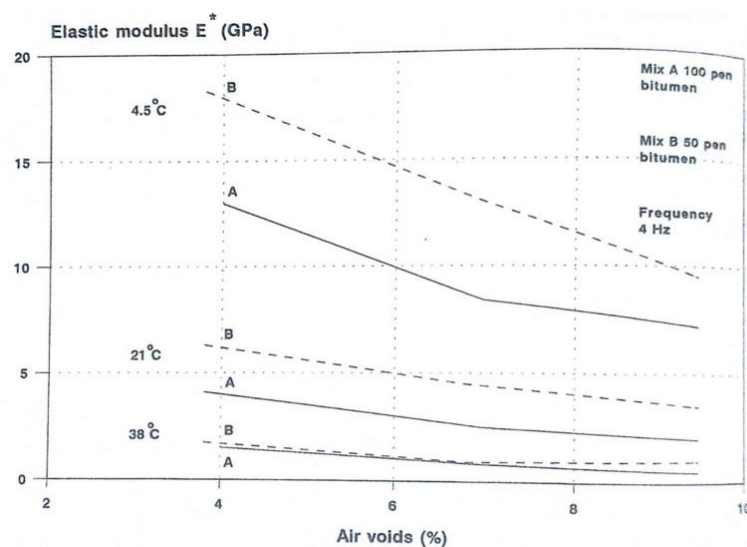


Figura. 2-1 Modulo dinámico VS Porcentaje de vacíos (Croney et al 1998:208).

Del trabajo de Shock y Kallas, se puede apreciar que la temperatura es indirectamente proporcional con el módulo dinámico, al igual que el porcentaje de vacíos es indirectamente proporcional, por lo cual, a menor valor de temperatura y porcentaje de vacíos el valor de  $E^*$  es mayor.

### 2.1.2. Contenido de Asfalto.

El contenido de asfalto de una mezcla asfáltica caliente después de un previo diseño y colocado, tiene como objetivo un control de calidad como una aceptación de especificaciones, la cantidad de este aglutinante es uno de los factores que afecta el modulo dinámico, mientras más suave sea este aglutinante más bajo será el módulo dinámico y viceversa (Ali, Irfan, Ahmed, Khanzanda y Mahmood 2015:858), con la

investigación realizada por Shock y Kallas, obtuvieron el modulo dinámico de probetas en donde cambiaron el porcentaje de asfalto en un 2%, obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Figura. 2-2 Modulo dinámico VS Porcentaje de asfalto (Croney et al 1998:209).

La norma de referencia para el proceso de este ensayo es la AASHTO T 308: Determining the Asphalt Binder Content of Hot Mix Asphalt (HMA) by the Ignition Method. Este ensayo permite utilizar el residuo del material granular para realizar el ensayo de granulometría usando la norma correspondiente.

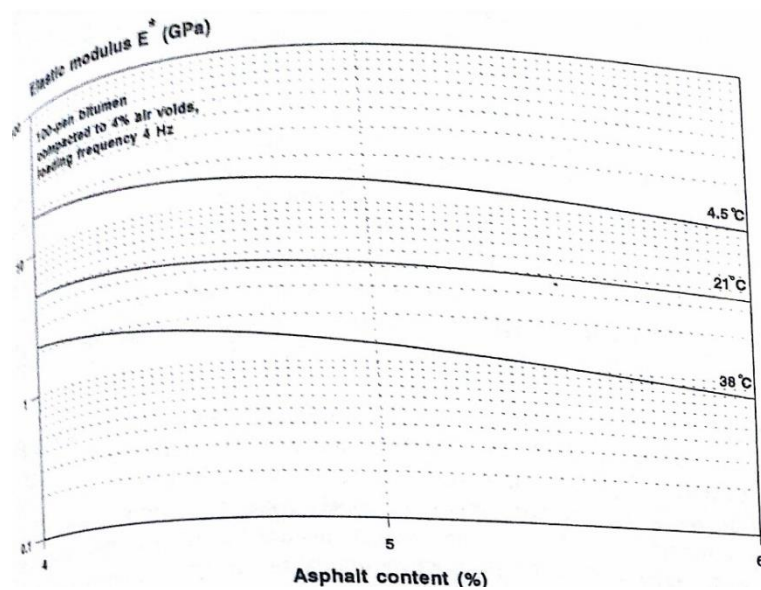


Figura. 2-2 Modulo dinámico VS Porcentaje de asfalto (Croney et al 1998:209).

### 2.1.3. Gravedad Específica Bulk.

La Gravedad Especifica Bulk al igual que la Gravedad Especifica Teórica Máxima Rice son útiles para poder encontrar el porcentaje de vacíos llenos de aire en mezcla, además este ensayo es utilizado para encontrar el peso unitario de mezclas bituminosas. El valor de la gravedad específica es adimensional por lo que se debe convertir en valores de densidad multiplicando por la densidad del agua del ensayo.

La norma de referencia es la ASTM D2726/D2726M – 14: Standard Test Method For Bulk Specific Gravity and Density Of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures.

La relación que tiene esta característica y el modulo dinámico es el mismo que la Gravedad Especifica Teórica Máxima Rice. Es decir que al obtener el porcentaje de vacíos basado en este método, se cumple al igual que el otro procedimiento que el porcentaje de vacíos es indirectamente proporcional al Módulo Elástico.

## **2.2. ENSAYO MÓDULO DINÁMICO.**

Todos los pavimentos flexibles son sensibles a la temperatura y un rango de cargas, es porque el asfalto es un material visco elástico-plástico, en casos extremos como altas temperaturas y un tiempo de aplicación de carga muy larga (paso lento de los vehículos), el módulo de una mezcla se aproxima al de un material granular, pero cuando existen temperaturas bajas y un tiempo de aplicación de carga corta, el material se comportar en un estado de elasticidad pura.

El Módulo Dinámico,  $E^*$  es una de las propiedades fundamentales que definen la respuesta de una mezcla de asfalto en caliente, además es una característica principal necesaria como por ejemplo en los tres niveles jerárquicos de la guía de diseño del pavimento empírico-mecanicista desarrollado en el National Cooperative Highway Research Program 1-37A., (Yasir, Muhammad, Sarfraz, Shahab, y Tariq, M. 2016:858) otro uso del Módulo Dinámico,  $E^*$  es que su valor se puede usarse para un chequeo de calidad.

Para poder caracterizar una mezcla de asfalto mediante el módulo dinámico  $E^*$ , este se incorpora mediante curvas maestras con efectos de tiempo y temperatura, estas curvas describen y representan la característica de las mezclas de asfalto sobre un rango de temperaturas y frecuencias. Durante varias décadas se han desarrollado varios métodos para poder graficar una curva maestra con todo lo antes expuesto, en el caso de este estudio se usara el método hecho por Witczak y sus colegas como está detallado en el capítulo 1.

La norma de referencia para este procedimiento es la AASHTO TP 62-03, Determining Dynamic Modulos of Hot Mix Asphalt (HMA).

Después de realizar estos ensayos se puede establecer tres relaciones adicionales las cuales son:

- **Rigidez**

Se la define como la relación entre el esfuerzo y la deformación a una temperatura y tiempo de carga específicos, este parámetro está en función de la granulometría de los agregados, rigidez del ligante asfáltico, grado de compactación y contenido de asfalto de la mezcla. Esta propiedad puede ser analizada obteniendo el módulo de rigidez dinámico de la mezcla, ya que ello nos permite evaluar las propiedades mecánicas de la mezcla, lo que hace de esta un parámetro fundamental en el diseño de pavimentos.

- **Resistencia a la fatiga**

Está definida como la habilidad de una mezcla para soportar esfuerzos de flexión repetidamente sin romperse.

A lo largo de la vida útil de un pavimento se pueden producir dos clases de fallas en su estructura, la primera es aquella en la cual existe un daño de baja magnitud que no permite que un vehículo logre desplazarse de manera adecuada y segura, es decir una falla funcional, y la segunda es catalogada como una falla estructural en la cual toda la estructura del pavimento es incapaz de soportar las cargas a las que es solicitado.

Estas sollicitaciones cíclicas generadas por las ruedas de los automóviles son aquellas que van causando la fatiga del pavimento, haciendo que este sufra una serie de deformaciones que se transformarán en esfuerzos de tracción, una vez formados un cierto número de estos esfuerzos empiezan a producir micro fisuras y una reducción en la rigidez del pavimento.

Para el control de estos fenómenos mencionados se han elaborado ensayos de fatiga que nos ayudan a predecir el esfuerzo admisible a tracción y evaluar el mismo de acuerdo a un cierto número de repeticiones de carga, dando como resultado la siguiente expresión:

$$N = K_1 * \varepsilon^{K_2}$$

Dónde:

N: Representa el número de ciclos de carga hasta la fatiga del material al nivel de deformación  $\varepsilon$

$\varepsilon$ : Deformación unitaria de tracción

$K_1, K_2$ : Constantes que describen el comportamiento a fatiga del material

Estudios realizados para determinar los parámetros que permiten la determinación de los valores de  $K_1$  y  $K_2$ , dan como resultado que estos valores son afectados principalmente por el módulo dinámico de la mezcla, el contenido de asfalto, la granulometría y naturaleza del agregado, el porcentaje de vacíos y la temperatura del pavimento. (Castro y Quintero, 2010).

- **Deformación plástica**

Se define como el cambio que sufre un cuerpo, tamaño o forma, debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas. Las deformaciones plásticas son comúnmente conocidas como los pequeños canales que se forman en las huellas por donde ruedan las llantas de los vehículos que circulan por un pavimento flexible.

Una vez que se ha sobrepasado un cierto número de repeticiones de carga las mezclas asfálticas no regresan a su forma original, produciéndose cambios irreversibles y perdiendo así sus propiedades elásticas. Algunas de las causas por las que se produce este problema son: espesores delgados de pavimento, reducción volumétrica de material, altas temperaturas. Son numerosos los agentes que intervienen en la formación de este problema, desde los agregados y ligante que forman la mezcla hasta factores naturales como la temperatura y el agua.

Para el Laboratorio Vial de Imae es importante definir el Modulo Dinámico ya que:

Es una propiedad que describe la relación entre tensiones impuestas y deformaciones resultantes, es fuertemente dependiente de la temperatura y la frecuencia de ensayo así como de otros factores tales como la rigidez del ligante asfáltico utilizado, la composición granulométrica de los agregados y los contenidos volumétricos de asfalto y vacíos.

### **2.3. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS**

Los ensayos realizados fueron escogidos con el propósito de determinar algunas de las propiedades volumétricas de las mezclas, además de datos de referencia que sirven para comprobar que estas cumplen con las Normas AASHTO.

### 2.3.1. Gravedad Específica Teórica Máxima Rice.

La gravedad específica máxima teórica y la densidad de mezclas de pavimentos bituminosos son propiedades principales con valores influenciados por la composición de la mezcla dependiendo a los tipos y cantidades de agregados pétreos y ligante asfáltico.

Estos valores son utilizados para el cálculo de vacíos de las mezclas de pavimento compactadas, la cantidad de bitumen absorbido por el agregado y para proporcionar los valores objetivos para la compactación de mezclas asfálticas.

*Ecuación 2-1 Gravedad específica teórica máxima Rice.*

$$G_{mm} = \frac{A}{A + D - E}$$

Dónde:

$G_{mm}$  = Gravedad específica máxima de la mezcla

$A$  = Masa Seca de la Muestra en el Aire, [g]

$D$  = Masa de la tapa y del recipiente con agua a 25°C [g]

$E$  = Masa de la tapa y del recipiente con agua a 25°C [g]

### 2.3.2. Contenido de Asfalto.

Este método cubre la determinación del contenido de asfalto de mezclas asfálticas en caliente mediante ignición a temperaturas que alcanzan el punto de inflamación del asfalto en horno. Los medios para calentar la muestra pueden ser por el método de convección o el método de irradiación infrarroja directa (IR). El agregado sobrante después del ensayo puede ser utilizado para el análisis de granulometría usando la norma correspondiente (AASHTO T30).

Este ensayo puede ser usado para determinaciones cuantitativas del contenido de asfalto y gradación en mezclas asfálticas en calientes y especímenes de pavimento para control de calidad, aceptación de especificaciones y estudios de evaluación de la muestra. Este método no requiere el uso de solventes.

Los cálculos necesarios para este ensayo los realiza el horno de ignición. Y las diferencias entre las masas son colocadas en la hoja del informe del ensayo presentado en el capítulo III del presente documento.

### 2.3.3. Gravedad Específica Bulk.

La densidad Bulk o el peso específico Bulk es la relación entre el peso de la briqueta en aire y el volumen de la masa compactada incluyendo los vacíos permeables.

Los resultados obtenidos en este ensayo pueden ser utilizados para determinar el peso unitario de mezclas bituminosas densas compactadas y en conjunto con el método de ensayo D3203, para obtener el porcentaje de vacíos. Los mismos que pueden ser utilizados para la obtención del grado de compactación relativa.

Debido a que la Gravedad específica es adimensional se la debe convertir en densidad multiplicándola por la densidad del agua a la temperatura del ensayo para realizar los cálculos pertinentes.

*Ecuación 2-2 Gravedad específica Bulk.*

$$G_{BULK} = \frac{A}{B - C}$$

Dónde:

$G_{BULK}$  = Gravedad Específica Bulk.

$A$  = Masa del espécimen seco en aire, gr

$B - C$  = Masa del volumen de agua para el volumen del espécimen a 25°C

$B$  = Masa del espécimen en aire saturado con superficie seca, gr

$C$  = Masa del espécimen sumergida en agua, gr

### 3. CAPÍTULO III

#### TABULACIÓN, ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO

##### 3.1. Caracterización de la mezcla

Para todas las mezclas utilizadas en este trabajo, se realizó una caracterización obteniendo solo 5 parámetros que se considera esenciales dentro de una mezcla asfáltica, los cuales son:

- Granulometría de los Agregados
- Gravedad teórica máxima rice
- Contenido de asfalto
- Gravedad específica Bulk
- Porcentaje de vacíos de la mezcla
- Módulo dinámico

Al tomar el diseño realizado en planta de todas las mezclas, se obtuvo los parámetros descritos anteriormente para conocer los datos principales utilizados en el diseño, con lo cual se puede realizar una breve caracterización de las mezclas y comprobar que los datos obtenidos se encuentren dentro de las especificaciones impuestas por las normas AASHTO, las mismas que se utilizaron como guía para el desarrollo de los ensayos de laboratorio.

##### 3.1.1. MEZCLA 1

###### 3.1.1.1. Granulometría

Se trabajó con un mínimo de tres especímenes para realizar el ensayo de granulometría de los agregados, al haber obtenido la mezcla directamente desde la planta fue necesario realizar la granulometría con la materia prima que se obtuvo una vez que se eliminó el ligante asfáltico mediante el ensayo de la determinación del mismo mediante el método del horno de ignición. A continuación se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** del material con los límites especificados en la norma MOP 001 – F – 2002.

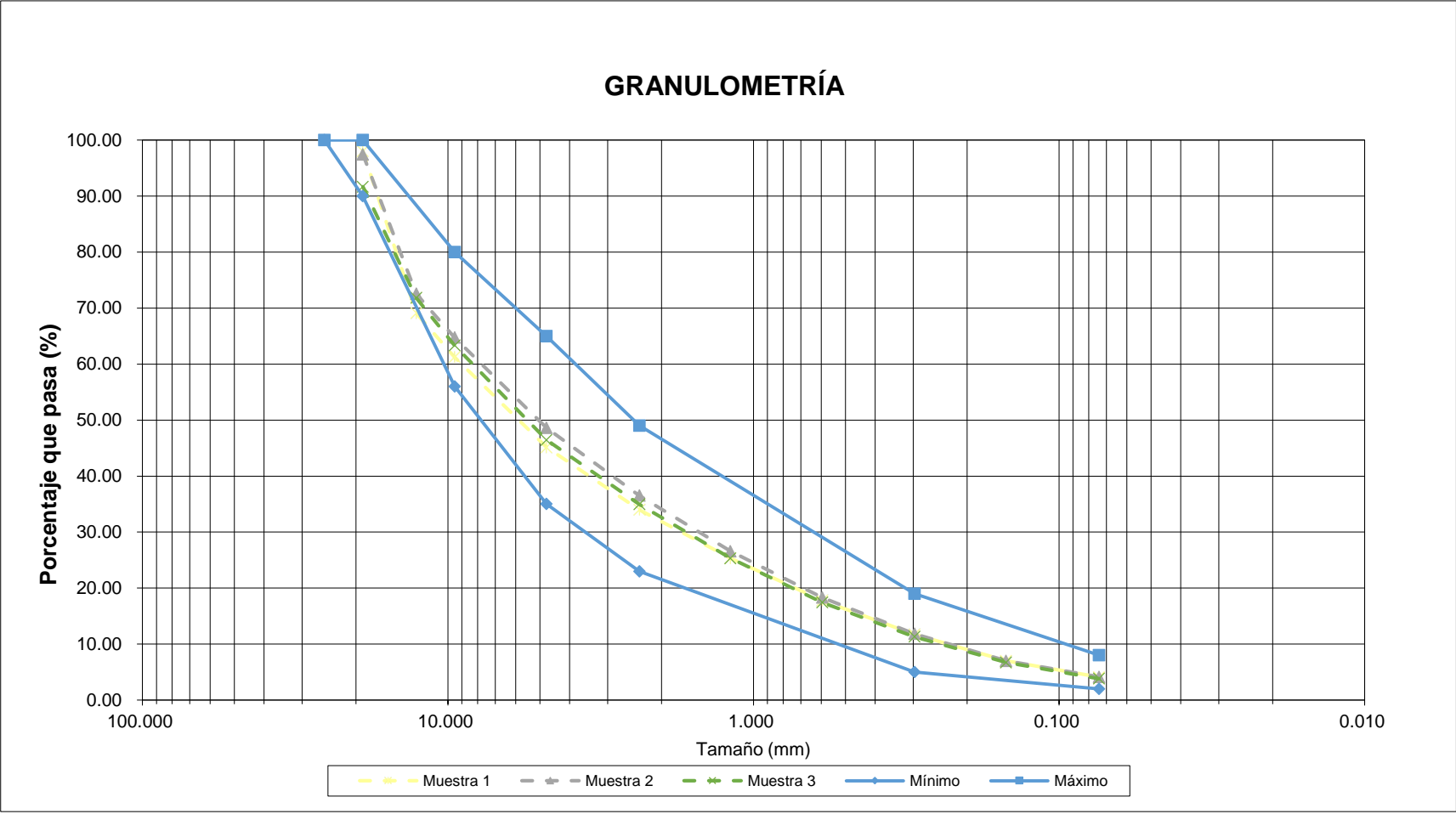


Figura. 3-1 Granulometría mezcla 1 en escala semi-logaritmica

### 3.1.1.2. Rice

Una vez realizado el ensayo de Gravedad teórica máxima, se pudo obtener como resultado la *Tabla 3-1 Resultado de la gravedad especifica máxima teórica RICE*. Mostrada a continuación:

*Tabla 3-1 Resultado de la gravedad especifica máxima teórica RICE.*

Muestra	Gmm
1	2,276
2	2,296
3	2,292
Promedio	<b>2,288</b>

Como se puede observar en los resultados, estos cumplen con la precisión requerida por la norma, la cual dice que los resultados para especímenes de una misma mezcla no deben diferir en más de 0.02 si lo realiza un solo operador y de 0.06 si lo realizan varios (ASTM D2041/D2041M-11 2003:4), de ser el caso se considerarían como datos sospechosos y no válidos.

Es importante obtener este dato ya que el mismo sirve como referencia para el cálculo de porcentaje de vacíos de la mezcla, así como el porcentaje de bitumen y puede servir como dato de referencia para una futura comparación.

### 3.1.1.3. Contenido de asfalto mediante el uso del horno de ignición

A continuación se presenta los resultados obtenidos de porcentaje de asfalto utilizando el horno de ignición.

Con los datos obtenidos se puede determinar el contenido de asfalto de la mezcla, el cual tiene un valor de:

*Tabla 3-2 Resultado del contenido de asfalto.*

Muestra	Porcentaje de Asfalto
1	6,87
2	6,99
3	6,77
Promedio	<b>6,88</b>

Este dato es el único que podemos comparar con el diseño realizado en planta, el mismo fue el único que fue proporcionado y el cual para la planta tuvo un valor de 6.5%. Este valor no debería tener una diferencia significativa entre el valor calculado en el laboratorio y el valor utilizado en planta pero como se puede observar los dos valores difieren en 0.38 lo cual equivale a un 5.52% de error, un valor no tan elevado de diferencia al analizar y trabajar con una misma mezcla.

Estas diferencias se pueden presentar por el hecho de trabajar con una mezcla obtenida directamente de la planta, al producir la misma se debe tener la precaución de no colocar el porcentaje justo de asfalto obtenido en el diseño ya que puede existir pérdidas dentro de la maquina en el proceso de mezclado así como también al momento de transportar la mezcla. Por esta razón se puede concluir que el porcentaje de asfalto puede exceder un poco al momento que la mezcla sale de planta y puede disminuir al momento que se hace su colocación por las pérdidas antes mencionadas.

#### **3.1.1.4. Gravedad Específica Bulk**

En la *Tabla 3-3 Resultado de la gravedad especifica BULK*. se presenta los resultados de las mediciones de las probetas obtenidas, tanto en un inicio, después de ser compactadas, es decir la muestra en su totalidad y la muestra dividida en tres porciones una vez realizado el ensayo de módulo dinámico para obtener los resultados comprobando que la muestra se encuentre homogénea en su totalidad, además de los resultados de gravedad específica Bulk, densidad y porcentaje de agua absorbida.

*Tabla 3-3 Resultado de la gravedad especifica BULK.*

Muestra	Gravedad Bulk
1	2,142
2	2,144
3	2,129
Promedio	<b>2,138</b>

En la *Figura. 3-2 Tabla de precisión de la Gravedad Especifica Bulk (INVE223-07:E223-6)*. se muestra la precisión que se debe tener en los resultados del ensayo para comprobar que se realizó el mismo de manera adecuada y tener una aceptación en los datos calculados que permitan una caracterización adecuada de la mezcla.

Precisión	Desviación estándar (1s)	Variación aceptable entre dos resultados (D2s)
Precisión de un solo operador:		
Gravedad específica bulk (seca)	0.009	0.025
Gravedad específica bulk (sss)	0.007	0.02
Gravedad específica aparente	0.007	0.02
% Absorción <sup>a</sup>	0.088	0.25
Precisión Multilaboratorios:		
Gravedad específica bulk (seca)	0.013	0.038
Gravedad específica bulk (sss)	0.011	0.032
Gravedad específica aparente	0.011	0.032
% Absorción <sup>a</sup>	0.145	0.41

<sup>a</sup> La precisión estimada esta basada en agregados con absorción de menos del 2%

Figura. 3-2 Tabla de precisión de la Gravedad Específica Bulk (INVE223-07:E223-6).

Tanto para el porcentaje de absorción el cual fue menor al 2 % y la precisión de un solo operador como para la de multilaboratorios, en ambos casos se cumple con la variación aceptable entre dos resultados, dando a entender que el ensayo fue realizado de manera correcta y que los datos son completamente válidos para una futura comparación o utilización de los mismos.

### 3.1.2. MEZCLA 2

#### 3.1.2.1. Granulometría

Se trabajó con un mínimo de tres especímenes para realizar el ensayo de granulometría de los agregados, al haber obtenido la mezcla directamente desde la planta fue necesario realizar la granulometría con la materia prima que se obtuvo una vez que se eliminó el ligante asfáltico mediante el cálculo del porcentaje del mismo en el horno de ignición. A continuación se presenta en *la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.* de los materiales usados con los límites especificados en la norma MOP 001 – F – 2002.

## GRANULOMETRÍA

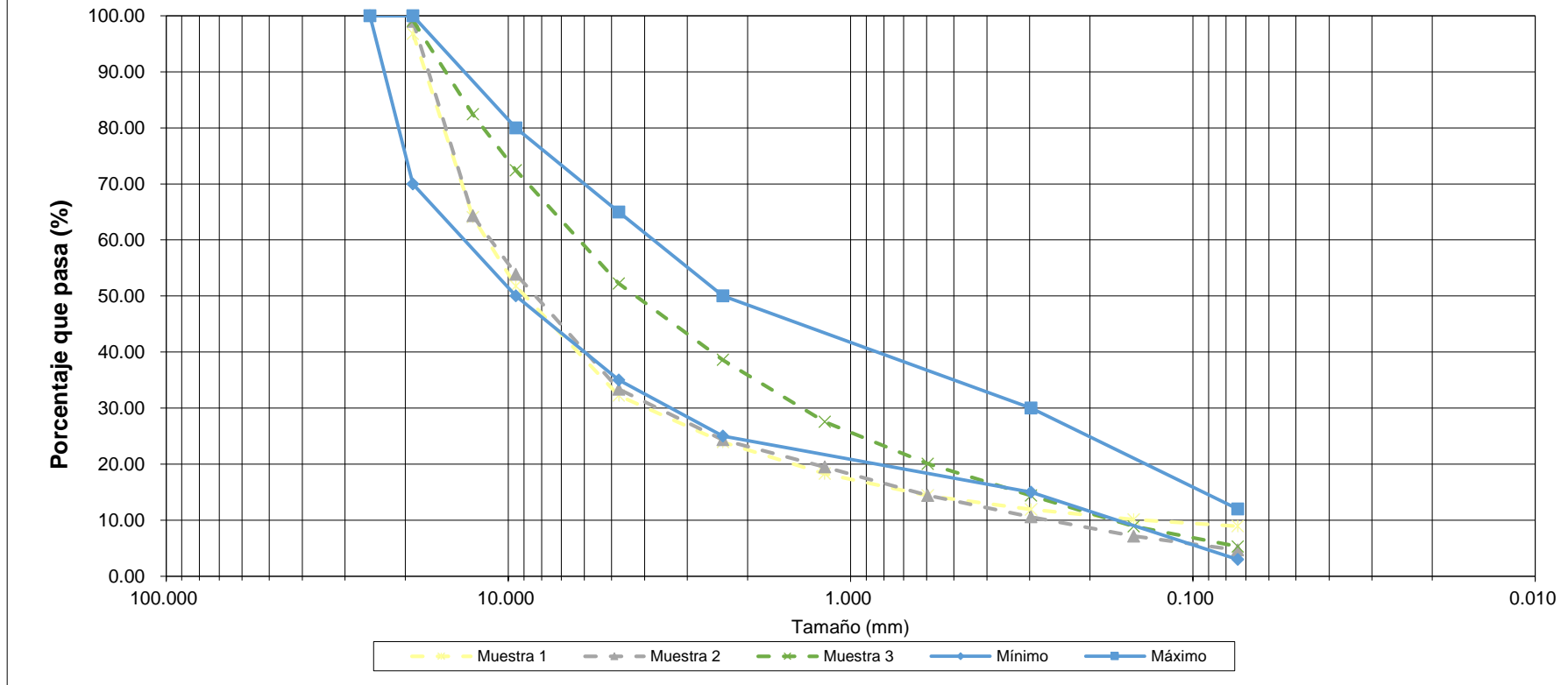


Figura. 3-3 Granulometría mezcla 2 en escala semi-logarítmica.

### 3.1.2.2. Rice

Una vez realizado el ensayo de Gravedad teórica máxima, se pudo obtener como resultado la *Tabla 3-4 Resultado de la gravedad especifica máxima teórica RICE*.

Mostrada a continuación:

*Tabla 3-4 Resultado de la gravedad especifica máxima teórica RICE.*

Muestra	Gmm
1	2,423
2	2,429
3	2,429
Promedio	<b>2.427</b>

Como se puede observar en los resultados, estos cumplen con la precisión requerida por la norma, la cual dice que los resultados para especímenes de una misma mezcla no deben diferir en más de 0.02 si lo realiza un solo operador y de 0.06 si lo realizan varios (ASTM D2041/D2041M-11 2003:4), de ser el caso se considerarían como datos sospechosos y no válidos.

Es importante obtener este dato ya que el mismo sirve como referencia para el cálculo de porcentaje de vacíos de la mezcla, así como el porcentaje de bitumen y puede servir como dato de referencia para una futura comparación.

### 3.1.2.3. Contenido de asfalto mediante el uso del horno de ignición

A continuación se presenta los resultados obtenidos de porcentaje de asfalto utilizando el horno de ignición.

Con los datos obtenidos se puede determinar el contenido de asfalto de la mezcla, el cual tiene un valor de:

*Tabla 3-5 Resultado del contenido de asfalto.*

Muestra	Porcentaje de Asfalto
1	4,74
2	4,93
3	4,97
Promedio	<b>4.88</b>

Este dato es el único que podemos comparar con el diseño realizado en planta, el mismo fue el único que fue proporcionado y el cual para la planta tuvo un valor de 4.5%. Este valor no debería tener una diferencia significativa entre el valor calculado en el laboratorio y el valor utilizado en planta pero como se puede observar los dos valores difieren en 0.38 lo cual equivale a un 7.78% de error, un valor elevado de diferencia al analizar y trabajar con una misma mezcla.

Estas diferencias se pueden presentar por el hecho de trabajar con una mezcla obtenida directamente de la planta, al producir la misma se debe tener la precaución de no colocar el porcentaje justo de asfalto obtenido en el diseño ya que puede existir pérdidas dentro de la maquina en el proceso de mezclado así como también al momento de transportar la mezcla. Por esta razón se puede concluir que el porcentaje de asfalto puede exceder un poco al momento que la mezcla sale de planta y puede disminuir al momento que se hace su colocación por las pérdidas antes mencionadas.

#### **3.1.1.4. Gravedad Específica Bulk**

En la *Tabla 3-6 Resultado de la gravedad específica BULK.* se presenta los resultados de las mediciones de las probetas obtenidas, tanto en un inicio, después de ser compactadas, es decir la muestra en su totalidad y la muestra dividida en tres porciones una vez realizado el ensayo de módulo dinámico para obtener los resultados comprobando que la muestra se encuentre homogénea en su totalidad, además de los resultados de gravedad específica Bulk, densidad y porcentaje de agua absorbida.

*Tabla 3-6 Resultado de la gravedad específica BULK.*

Muestra	Gravedad Bulk
1	2,274
2	2,258
3	2,281
Promedio	<b>2,271</b>

En la *Figura. 3-2 Tabla de precisión de la Gravedad Específica Bulk (INVE223-07:E223-6).* se muestra la precisión que se debe tener en los resultados del ensayo para comprobar que se realizó el mismo de manera adecuada y tener una aceptación en los datos calculados que permitan una caracterización adecuada de la mezcla.

Tanto para el porcentaje de absorción el cual fue menor al 2 % y la precisión de un solo operador como para la de multilaboratorios, en ambos casos se cumple con la variación aceptable entre dos resultados, dando a entender que el ensayo fue realizado de manera correcta y que los datos son completamente válidos para una futura comparación o utilización de los mismos.

### **3.1.3. MEZCLA 3**

#### **3.1.3.1. Granulometría**

Se trabajó con un mínimo de tres especímenes para realizar el ensayo de granulometría de los agregados, al haber obtenido la mezcla directamente desde la planta fue necesario realizar la granulometría con la materia prima que se obtuvo una vez que se eliminó el ligante asfáltico mediante el cálculo del porcentaje del mismo en el horno de ignición. A continuación se presenta en la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.* del material granular usado con los límites especificados en la norma MOP 001 – F – 2002.

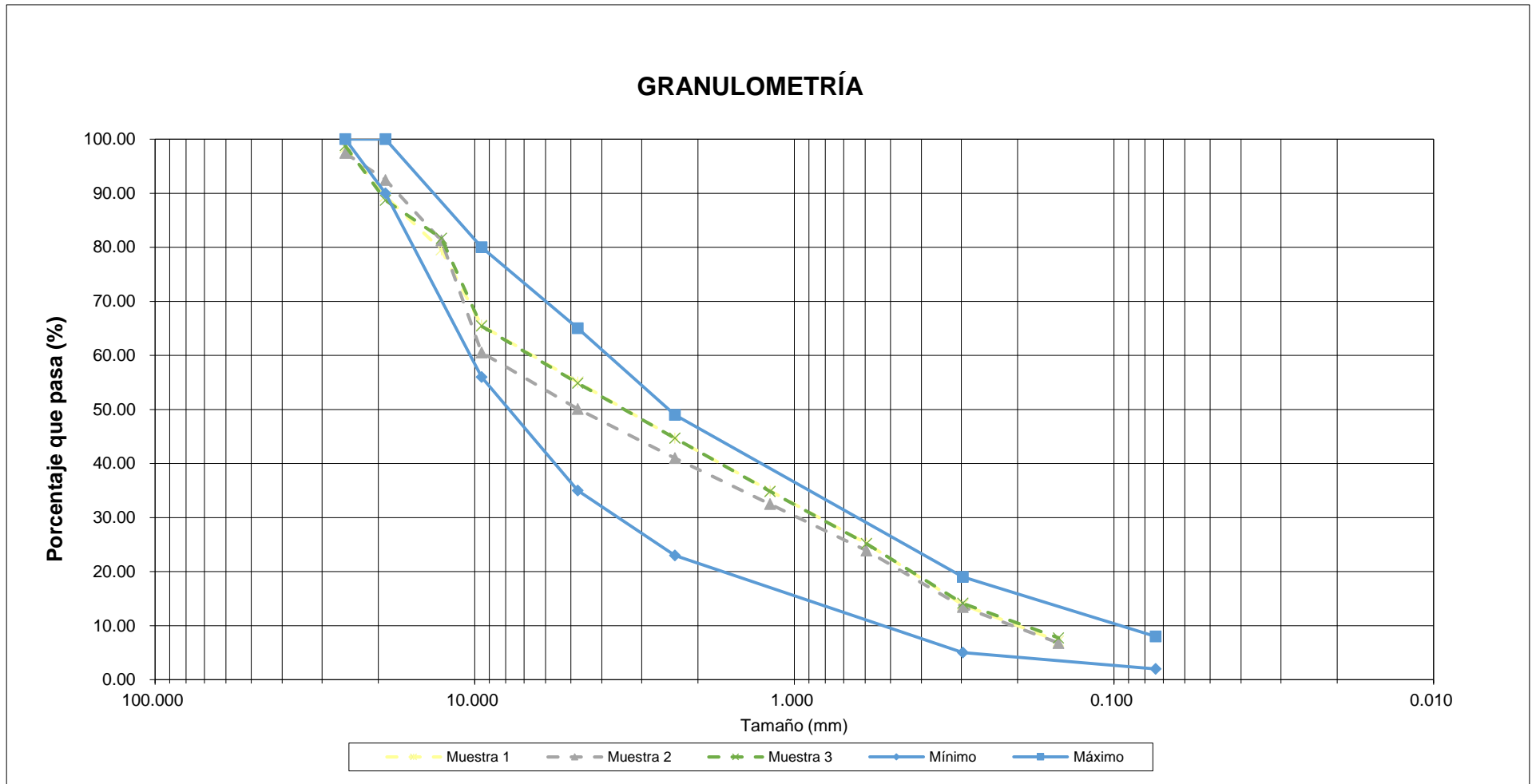


Figura. 3-4 Granulometría mezcla 3 en escala semi-logaritmica.

### 3.1.3.2. Rice

Una vez realizado el ensayo de Gravedad teórica máxima, se pudo obtener como resultado la *Tabla 3-7 Resultado de la gravedad especifica máxima teorice RICE* mostrada a continuación:

*Tabla 3-7 Resultado de la gravedad especifica máxima teorice RICE.*

Muestra	Gmm
1	2,278
2	2,291
3	2,292
Promedio	<b>2,287</b>

Como se puede observar en los resultados, estos cumplen con la precisión requerida por la norma, la cual dice que los resultados para especímenes de una misma mezcla no deben diferir en más de 0.02 si lo realiza un solo operador y de 0.06 si lo realizan varios (ASTM D2041/D2041M-11 2003:4), de ser el caso se considerarían como datos sospechosos y no válidos.

Es importante obtener este dato ya que el mismo sirve como referencia para el cálculo de porcentaje de vacíos de la mezcla, así como el porcentaje de bitumen y puede servir como dato de referencia para una futura comparación.

### 3.1.3.3. Contenido de asfalto mediante el uso del horno de ignición

A continuación se presenta los resultados obtenidos de porcentaje de asfalto utilizando el horno de ignición.

Con los datos obtenidos se puede determinar el contenido de asfalto de la mezcla, el cual tiene un valor de:

*Tabla 3-8 Resultado del contenido de asfalto.*

Muestra	Porcentaje de Asfalto
1	8,25
2	7,76
3	8,07
Promedio	<b>8,03</b>

Este dato es el único que podemos comparar con el diseño realizado en planta, el mismo fue el único que fue proporcionado y el cual para la planta tuvo un valor de 7.7%. Este valor no debería tener una diferencia significativa entre el valor calculado en el laboratorio y el valor utilizado en planta pero como se puede observar los dos valores difieren en 0.33 lo cual equivale a un 4.11% de error, un valor no tan elevado de diferencia al analizar y trabajar con una misma mezcla.

Estas diferencias se pueden presentar por el hecho de trabajar con una mezcla obtenida directamente de la planta, al producir la misma se debe tener la precaución de no colocar el porcentaje justo de asfalto obtenido en el diseño ya que puede existir pérdidas dentro de la maquina en el proceso de mezclado así como también al momento de transportar la mezcla. Por esta razón se puede concluir que el porcentaje de asfalto puede exceder un poco al momento que la mezcla sale de planta y puede disminuir al momento que se hace su colocación por las pérdidas antes mencionadas.

#### **3.1.3.4. Gravedad Específica Bulk**

En la tabla Tabla 3-9 Resultado de la gravedad especifica BULK. se presenta los resultados de las mediciones de las probetas obtenidas, tanto en un inicio, después de ser compactadas, es decir la muestra en su totalidad y la muestra dividida en tres porciones una vez realizado el ensayo de módulo dinámico para obtener los resultados comprobando que la muestra se encuentre homogénea en su totalidad, además de los resultados de gravedad específica Bulk, densidad y porcentaje de agua absorbida.

*Tabla 3-9 Resultado de la gravedad especifica BULK.*

Muestra	Gravedad Bulk
1	2.240
2	2.243
3	2.263
Promedio	<b>2.249</b>

En la *Figura. 3-2 Tabla de precisión de la Gravedad Especifica Bulk (INVE223-07:E223-6)*. se muestra la precisión que se debe tener en los resultados del ensayo para comprobar que se realizó el mismo de manera adecuada y tener una aceptación en los datos calculados que permitan una caracterización adecuada de la mezcla.

Tanto para el porcentaje de absorción el cual fue menor al 2 % tal y la precisión de un solo operador como para la de multilaboratorios, en ambos casos se cumple con la variación aceptable entre dos resultados, dando a entender que el ensayo fue realizado de manera correcta y que los datos son completamente válidos para una futura comparación o utilización de los mismos.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de los datos obtenidos en laboratorio con los cuales se realiza una parte de la caracterización de la mezcla, la misma que culminara una vez que se complemente con los resultados de módulo dinámico que se presenta en los siguientes numerales de esta disertación.

*Tabla 3-10 Resumen de resultados de ensayos.*

<b>IDENTIFICACIÓN</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>N1</b>	<b>N2</b>	<b>N3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Granulometría</b>									
	Laboratorio								
1"							99.27	98.92	99.14
3/4"	98.03	97.45	91.67	96.8	99	97.78	98.44	97.45	98.8
1/2"	69.1	72.55	71.83	64.1	64.31	82.42	89.46	92.44	88.68
3/8"	61.22	64.72	63.32	51.75	53.89	72.41	79.52	81.27	81.66
Nº4	45.14	48.6	46.45	32.25	33.37	52.23	65.58	60.54	65.43
Nº8	33.99	36.51	34.96	23.94	24.33	38.59	55.05	50.1	54.87
Nº16	25.32	26.59	25.31	18.27	19.47	27.55	44.68	40.99	44.67
Nº30	17.77	18.3	17.42	14.38	14.41	20.07	34.9	32.49	34.83
Nº50	11.73	11.84	11.31	11.91	10.58	14.38	25.24	23.9	25.17
Nº100	7.02	7	6.73	10.13	7.16	8.91	13.86	13.44	14.14
Nº200	4.11	4.14	3.83	8.94	4.69	5.29	7.14	6.77	7.72
<b>Contenido de asfalto</b>									
	Laboratorio								
%	6.77	6.87	6.99	4.97	4.93	4.74	8.07	8.25	7.76
<b>Gravedad específica teórica máxima</b>									
	Laboratorio								
Gmm	2.28	2.3	2.29	2.42	2.43	2.43	2.28	2.29	2.29
<b>Gravedad específica Bulk</b>									
	Laboratorio								
Gmb	2.14	2.14	2.13	2.23	2.23	2.24	2.24	2.243	2.264
<b>Porcentaje de vacíos</b>									
	Laboratorio								
%	6.14	6.96	6.99	8.23	7.85	7.82	1.75	2.05	1.14

## **3.2. Módulo Dinámico**

### **3.2.1. Tabulación de Datos**

Utilizando el programa para el ensayo de módulo dinámico TP 62-03 Dynamic Modulus Cooper Technology, se han obtenido los datos para cada una de las diferentes combinaciones de frecuencias y temperatura que se realizaron. A continuación se presenta en las tablas los datos resumidos para cada una de las mezclas asfálticas utilizadas:

Tabla 3-11 Módulos dinámicos para la mezcla 1: Planta EPMMOP.

TEMPERATURA (C)	FRECUENCIA (Hz)	MODULO DINAMICO (Mpa)		
		Muestra M1	Muestra M2	Muestra M3
-10	25	28497,10	25503,50	24007,90
	10	29946,50	25951,30	22919,40
	5	27941,50	24761,00	21492,40
	1	24847,30	22565,50	19077,70
	0,5	23275,80	21836,50	18559,80
	0,1	21263,20	20330,00	17199,40
4	25	22033,40	17622,50	15196,90
	10	24164,90	16635,80	13818,00
	5	21945,20	15515,90	12953,40
	1	18340,90	13210,90	10380,30
	0,5	16298,70	12185,60	9552,20
	0,1	12970,20	10090,30	7793,00
21	25	10261,50	9022,00	9560,70
	10	9064,80	7842,70	8162,40
	5	7761,00	7069,90	7154,20
	1	5546,90	5216,70	5114,90
	0,5	4732,30	4611,30	4437,00
	0,1	3332,20	3443,50	3149,20
37	25	4678,40	4419,30	3926,40
	10	3709,50	3890,10	3341,70
	5	3029,50	3358,50	2776,80
	1	1953,50	2294,20	1785,50
	0,5	1594,30	1974,60	1493,20
	0,1	1060,90	1456,20	1012,10
54	25	1306,40	1734,20	1141,80
	10	1057,50	1486,10	978,50
	5	845,30	1226,20	784,50
	1	573,70	858,30	532,20
	0,5	564,90	742,80	504,60
	0,1	379,00	579,60	408,90

Tabla 3-12 Módulos dinámico para la mezcla 2: Planta EPMOP.

TEMPERATURA (C)	FRECUENCIA (Hz)	MODULO DINAMICO (Mpa)		
		Muestra N1	Muestra N2	Muestra N3
-10	25	14316,70	20109,20	18792,70
	10	10752,90	19077,70	15136,60
	5	10612,30	18579,60	14576,80
	1	8939,00	16918,30	12826,40
	0,5	8731,80	16419,20	12353,30
	0,1	7724,80	15184,30	11572,90
	4	25	10951,10	14922,60
10		9530,20	14150,00	11562,20
5		9147,10	13236,90	11001,30
1		7434,80	10960,70	9260,50
0,5		6913,70	10051,40	8892,10
0,1		5744,00	8300,90	7532,50
21		25	6846,90	7303,30
	10	6008,10	6364,90	7154,00
	5	5300,70	5690,80	6520,50
	1	3886,50	4183,30	4761,00
	0,5	3378,60	3689,10	4192,20
	0,1	2573,00	2766,50	3057,70
	37	25	3359,90	3784,40
10		2936,10	3229,90	3593,60
5		2555,40	2763,00	3014,10
1		1792,00	1891,40	1986,50
0,5		1560,80	1653,70	1680,70
0,1		1237,00	1244,00	1155,90
54		25	836,00	1524,40
	10	747,70	1315,10	1185,00
	5	608,30	1088,20	958,20
	1	515,10	758,20	644,90
	0,5	413,00	673,10	576,50
	0,1	417,50	529,60	454,40

Tabla 3-13 Módulos dinámicos para la mezcla 3: Planta OCAMPO.

TEMPERATURA (C)	FRECUENCIA (Hz)	MODULO DINAMICO (Mpa)		
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
-10	25	22878,70	17042,00	28959,40
	10	18887,10	15731,20	31379,20
	5	18772,30	15337,20	29703,80
	1	17096,40	13831,80	27188,60
	0,5	16523,40	13470,50	26147,90
	0,1	15319,10	12370,10	24774,80
4	25	18465,80	14255,50	20029,40
	10	16811,20	13891,70	21110,90
	5	16534,40	13320,20	19779,50
	1	14740,70	11288,80	17345,80
	0,5	14094,70	10343,00	16019,40
	0,1	12575,50	8610,70	13535,80
21	25	11466,90	7154,30	11154,60
	10	10085,90	6363,40	10055,80
	5	9428,00	5676,20	8719,60
	1	7502,10	4148,80	6510,70
	0,5	6810,40	3655,50	5606,80
	0,1	5370,40	2714,40	4040,30
37	25	5478,50	3429,70	4498,80
	10	4734,10	3003,60	3759,80
	5	4163,50	2585,80	3196,50
	1	2931,30	1784,10	2207,40
	0,5	2580,40	1553,80	1874,70
	0,1	1922,10	1134,80	1394,30
54	25	2657,30	1305,60	1640,30
	10	2308,60	1151,10	1394,80
	5	1979,60	972,40	1155,00
	1	1404,30	682,80	807,60
	0,5	1230,10	603,90	712,10
	0,1	935,30	479,90	543,80

### 3.2.2. Metodología para elaborar la hoja de cálculo en Microsoft Excel para la construcción de las curvas maestras

Se detalla a continuación los pasos y la metodología que fue usada para el desarrollo del programa con el cual se construyeron las curvas maestras:

- Paso 1:

Una vez concluida la tabulación de datos de módulo dinámico se procede a utilizar los mismos de manera ordenada en el programa Microsoft Excel creando una tabla en la cual se deben colocar todos los parámetros que se encuentran en las ecuaciones descritas en el capítulo uno de la presente disertación.

- ✓ Temperatura en °C: -10, 4, 21, 37 y 54°C. son los cinco a los cuales se ambientó la muestras para realizar el ensayo
- ✓ Frecuencia en Hz: todas y cada una de las frecuencias de carga utilizadas descritas en la norma se utilizaran para cada una de las temperaturas descritas en el punto anterior.
- ✓ Módulo dinámico E en Mpa: su valor es el resultado del ensayo de módulo dinámico, mismo que se encuentra tabulado en las tablas del punto 3.2.1.
- ✓ Logaritmo de la frecuencia  $\log(f)$ : es el resultado de calcular el logaritmo en base 10 de cada una de las frecuencias del ensayo
- ✓ Logaritmo de la frecuencia reducida: haciendo uso de la ecuación 1.7. se obtiene este valor.
- ✓  $\log E^*$  medido: es el resultado de calcular el logaritmo en base 10 del módulo dinámico obtenido mediante el ensayo.
- ✓  $\log E^*$  predicho: se calcula utilizando la expresión matemática a partir de la fórmula sigmoideal descrita mediante la ecuación 1.6 del presente documento.
- ✓ Errores Cuadrados: es el cuadrado de la diferencia entre el  $\log E^*$  predicho y el  $\log E^*$  medido.
- ✓  $E^*$  predicho.

Dicha tabla se encuentra dentro del Anexo 5 en este trabajo.

- Paso 3:

Dentro de las ecuaciones mencionadas en el paso anterior existen parámetros no conocidos u obtenidos con los ensayos realizados, es por eso que para el funcionamiento adecuado del programa se utilicen celdas en las cuales se dispondrá de

valores iniciales para realizar un número determinado de iteraciones con los que se obtendrá el valor real de los mismo y nos permitirán tener el mejor ajuste de la curva maestra. Estos valores están designados en las ecuaciones con las siguientes variables:  $\delta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  y los diferentes valores de Shift Factor  $\log [a(T)]$ , correspondiente para cada una de las temperaturas de ensayo. Para la presente disertación la temperatura de referencia será de 21 °C en la cual el logaritmo del Shift factor es igual a cero

Todos los valores mencionados deben relacionarse de manera conjunta para obtener el mejor resultado de curva maestra y generar el mínimo error posible en la construcción de la misma. Utilizando la herramienta SOLVER del programa Microsoft Excel, podemos realizar las iteraciones necesarias de una manera más eficaz y obtener así los valores que mejores resultados nos proporcionen para la construcción de la curva.

Las iteraciones se deben realizar hasta que la suma de la diferencia al cuadrado entre el  $\log E^*$  predicho y el  $\log E^*$  medido sea la mínima posible.

- Paso 4:

Con los datos calculados en el paso anterior, se procede a la obtención de los últimos parámetros descritos en el paso 1 modulo predicho y logaritmo de frecuencia reducida, obteniendo las gráficas correspondientes a:

- ✓ Temperatura versus logaritmo del Shift Factor
- ✓ Logaritmo de frecuencia reducida versus el logaritmo de  $E^*$  predicho y del  $E^*$  medido.

Dando como resultado la curva maestra de módulo dinámico, la cual servirá para poder trabajar dentro del programa Mecánico – Empírico, desarrollado por la AASHTO y desarrollar un diseño adecuado de pavimento flexible.

### **3.2.3. Caracterización de la mezcla para módulo dinámico**

En la Tabla se muestran las variables calculadas que forman parte de las ecuaciones utilizadas para obtener la curva maestra para las 9 muestras tomadas en planta, además se realizaron gráficas para representar los coeficientes que corresponden a la relación de factor de cambio (shift factor) en función de la temperatura y la relación de módulo dinámico versus tiempo de carga para cada temperatura de ensayo, al realizar la unión de estos datos es como se obtiene la curva maestra.

Tabla 3-14 Caracterización de la mezcla asfáltica para módulo dinámico.

IDENTIFICACIÓN	M1	M2	M3	N1	N2	N3	1	2	3	Temperatura (°C)
% Vacíos	6.14	6.96	6.99	8.23	7.85	7.82	1.75	2.05	1.14	
d'	2.04	1.56	1.78	1.93	2.02	1.95	2.64	2.25	2.15	
$\beta$	-0.82	-0.87	-0.85	-1.28	-0.71	-1.05	-0.98	-0.80	-0.77	
$\alpha$	2.52	3.11	2.74	2.17	2.45	2.35	1.69	2.04	2.44	
$\Upsilon$	0.42	0.27	0.35	0.39	0.34	0.40	0.48	0.43	0.36	
Log [a(T)]	4.77	4.82	4.13	4.80	4.53	3.81	4.58	4.70	5.17	-10°
	2.47	2.50	2.23	2.59	2.35	2.06	2.37	2.44	2.68	4°
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21°
	-2.05	-2.08	-2.03	-2.34	-1.95	-1.88	-1.97	-2.03	-2.23	37°
	-4.00	-4.04	-4.12	-4.73	-3.80	-3.82	-3.84	-3.94	-4.33	54°

Los valores representados en la *Tabla 3-14 Caracterización de la mezcla asfáltica para módulo dinámico.*, son el resultado de las varias iteraciones realizadas por la hoja de cálculo con los cuales se logra obtener una curva maestra suavizada aplicando el factor de corrección como se muestra en el numeral 3.2.3., estos valores culminan con la caracterización de las mezclas asfálticas utilizadas y nos permiten realizar una comparación entre la Figura. 3-5 y Figura. 3-6 con la Figura. 3-7 y Figura. 3-9 las cuales al estar en función de diferentes parámetros como en este caso son tiempo y frecuencia respectivamente, deben tener los mismo resultados obtenidos con los ensayos.

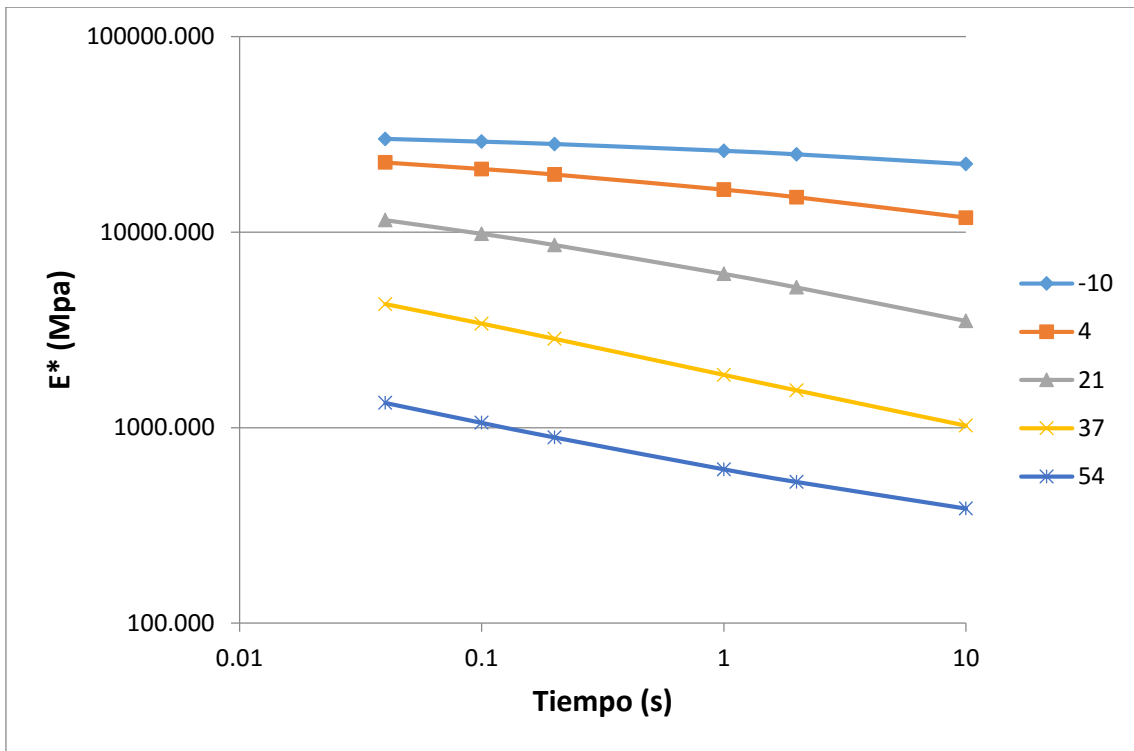


Figura. 3-5 Relación del módulo dinámico y tiempo de carga.

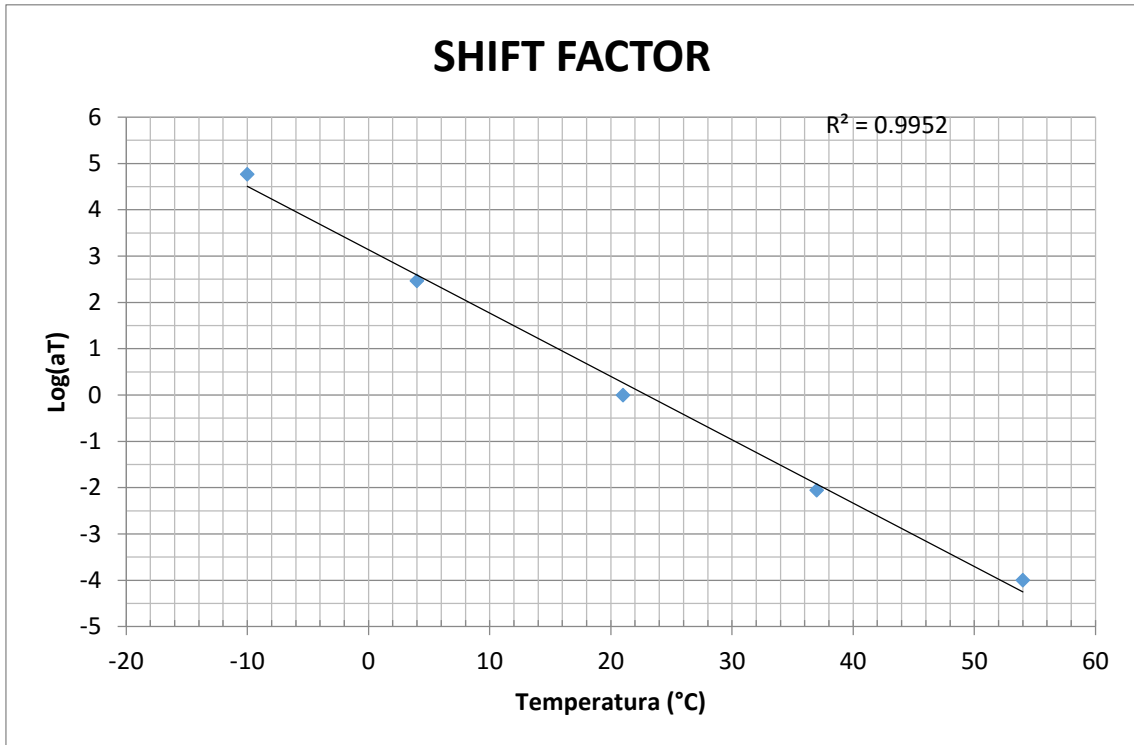


Figura. 3-6 Factor de corrección horizontal vs temperatura.

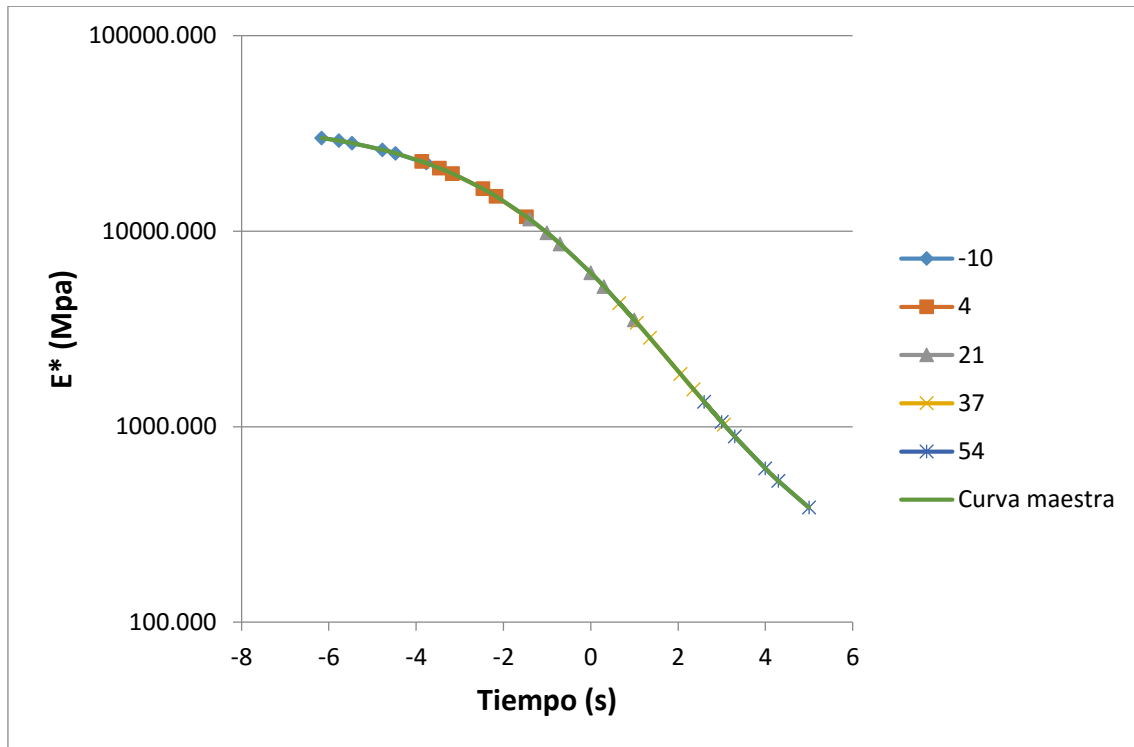


Figura. 3-7 Construcción de la curva maestra para mezclas asfálticas (tiempo).

Como se puede observar en la Figura. 3-5, Figura. 3-6 y Figura. 3-7 las tres tienen relación para la obtención de la curva maestra, la curva presentada en la Figura. 3-7 corresponde a los valores de módulo dinámico obtenidos en laboratorio, es decir, no se está aplicando el factor de corrección que se muestra en la Figura. 3-6, este valor se lo utilizará más adelante para obtener curvas más suavizadas y acordes a la realidad, puesto que al variar la temperatura de ensayo es necesario aplicar el factor de corrección o shift factor para obtener resultados correctos del módulo dinámico, esto significa que para cada una de las muestras y temperaturas de ensayo a las que fueron sometidas existe un factor de corrección propio porque la temperatura y este factor cambian juntos debido al principio de superposición tiempo – temperatura en materiales visco elásticos lineales.

Es necesario indicar que las curvas maestras se representan con 2 graficas diferentes que se describen a continuación:

Módulo Dinámico calculado vs Tiempo de carga:

En esta grafica se muestra la dependencia del módulo con respecto a la temperatura para un material visco elástico, como se muestra en la Figura. 3-7. En este caso se lo denomina Modulo de relajación elástica.

Módulo Dinámico corregido vs Frecuencia de carga:

En esta grafica se muestra la dependencia del módulo con respecto a la temperatura de un material visco elástico bajo excitaciones periódicas, como se muestra en la Figura. 3-9. En este caso se lo denomina Modulo elástico complejo o módulo dinámico.

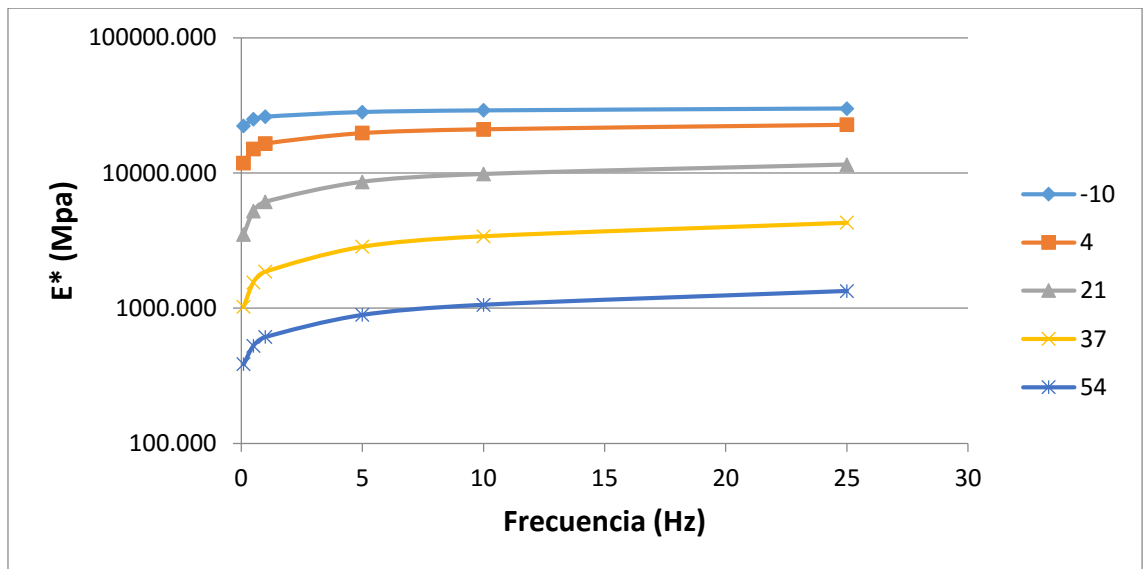


Figura. 3-8 Relación del módulo dinámico y frecuencia de carga.

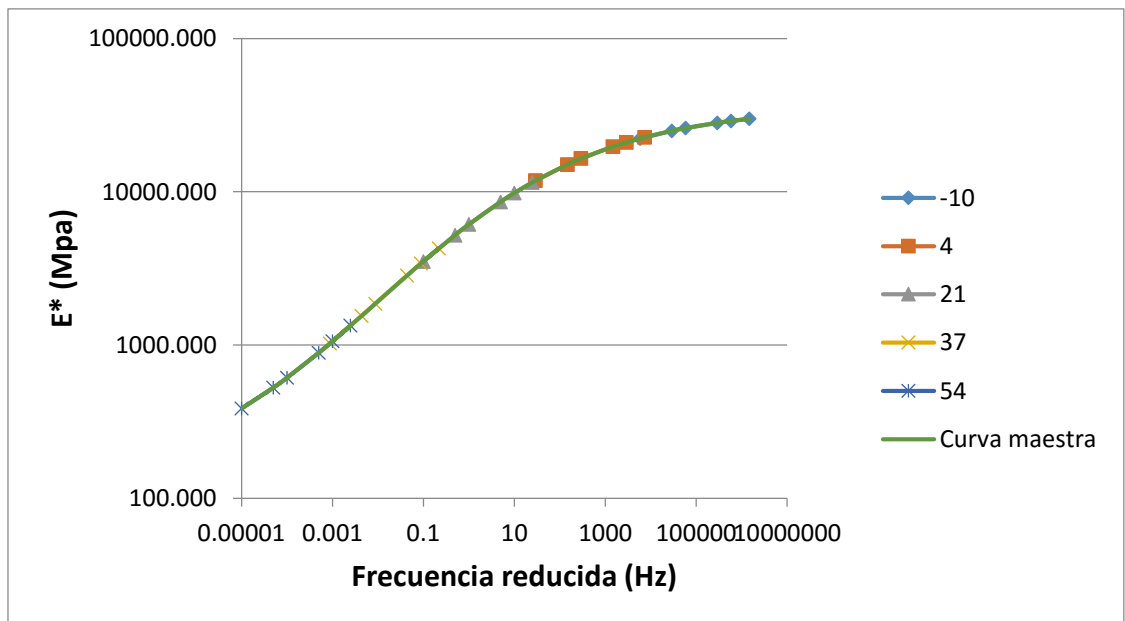


Figura. 3-9 Construcción de la curva maestra para mezclas asfálticas (frecuencia).

Con las gráficas mostradas en este numeral se puede observar la relación existente entre temperatura, tiempo y frecuencia de carga con el módulo dinámico. Comprobando así que estos parámetros a los cuales está sometido un pavimento flexible en la realidad como son, carga dinámicas por el tráfico, tiempo de la aplicación de carga (paso lento o rápido de los vehículos y la frecuencia con la que son aplicadas estas cargas (frecuencia de circulación del tráfico) son correctos como objeto de estudio para la obtención del módulo dinámico

### **3.2.3. Generación de la curva maestra**

En las gráficas se muestran todas las variables obtenidas con el programa después de un determinado número de iteraciones, así como también las gráficas de resultados determinadas en el paso 4 del numeral 3.2.2 las cuales son el resultado de la disertación realizada.

### 3.2.3.1. Mezcla 1

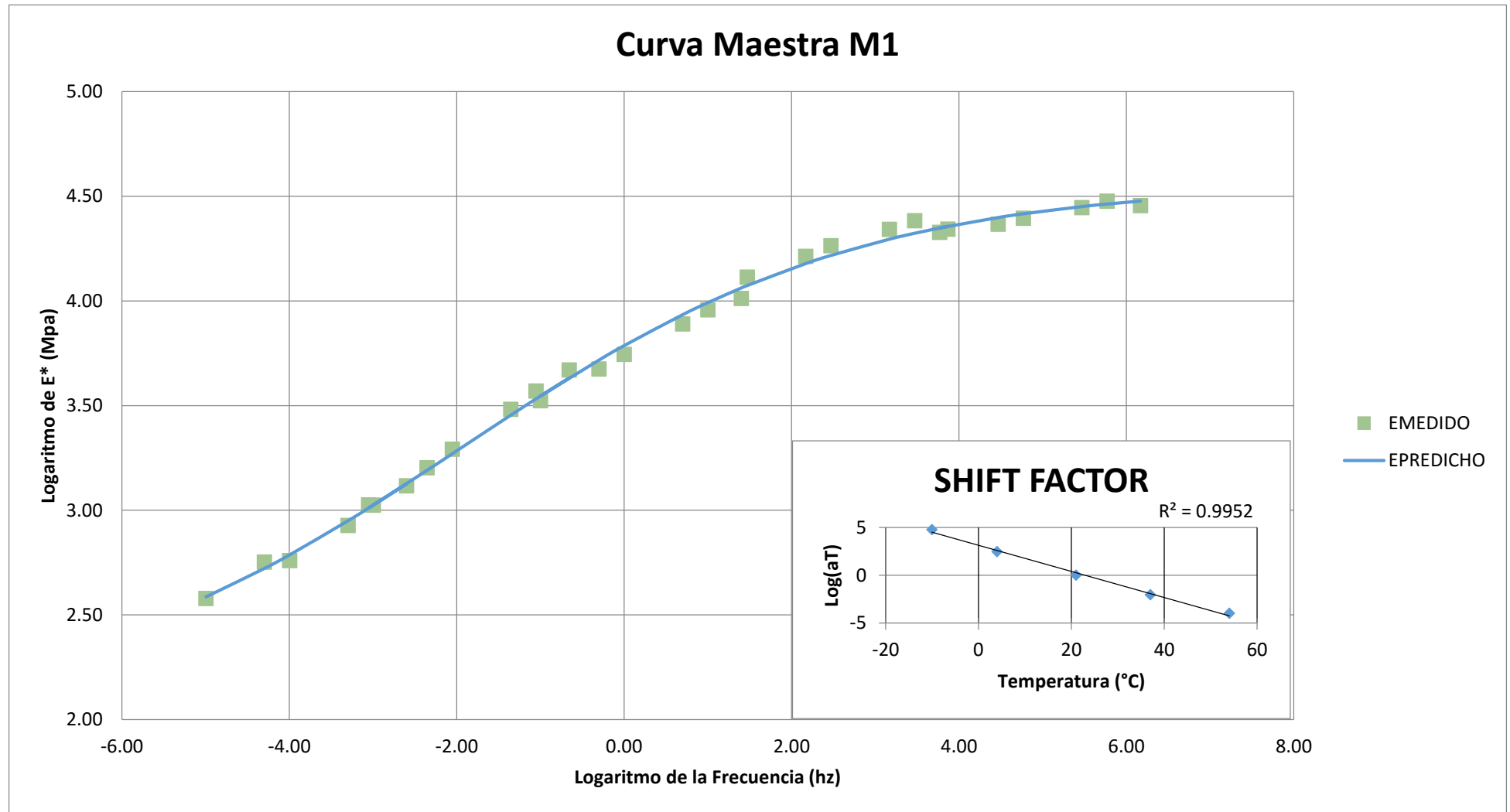


Figura. 3-10 Curva maestra de la muestra M1.

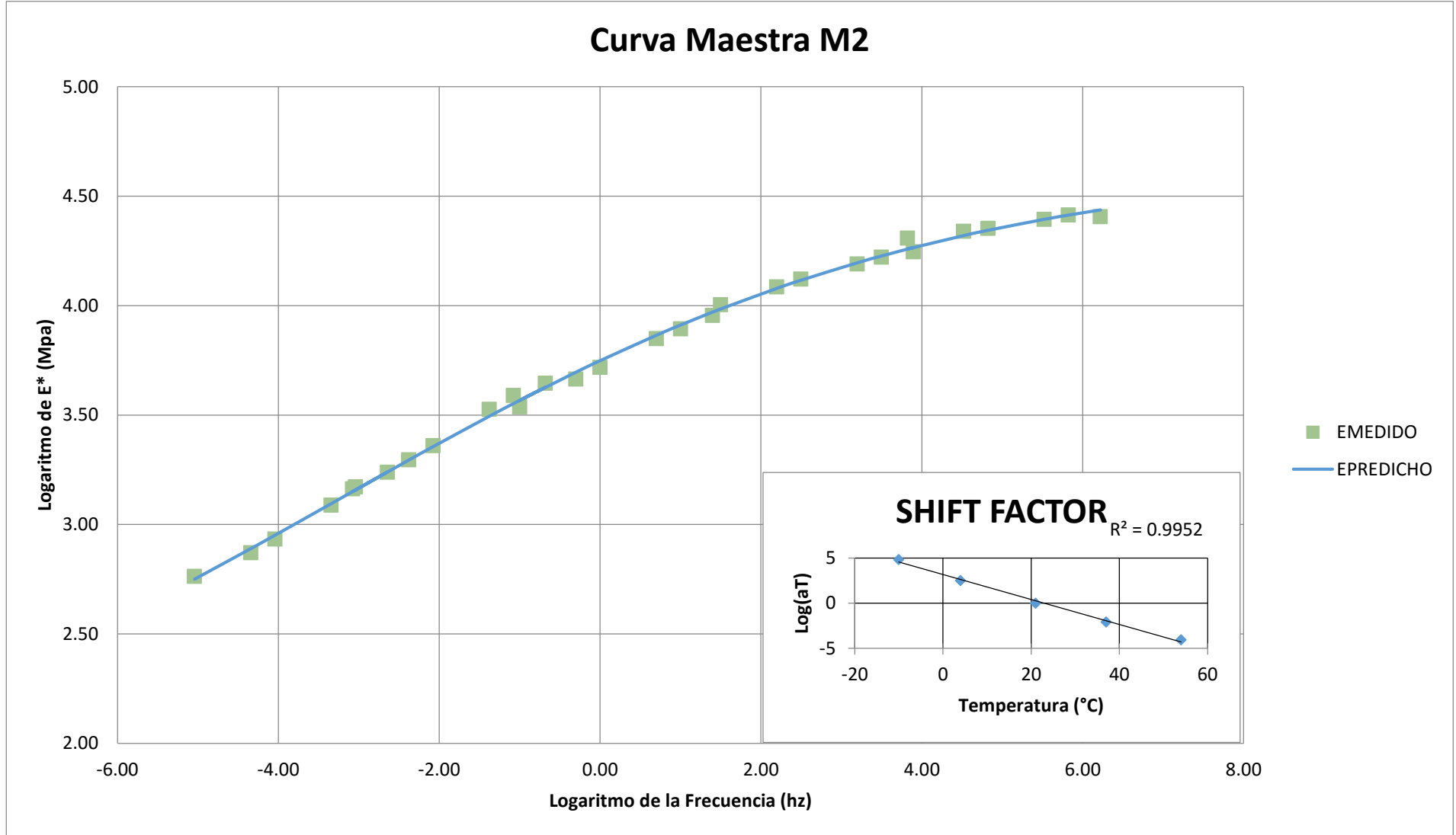


Figura. 3-11 Curva maestra de la muestra M2.

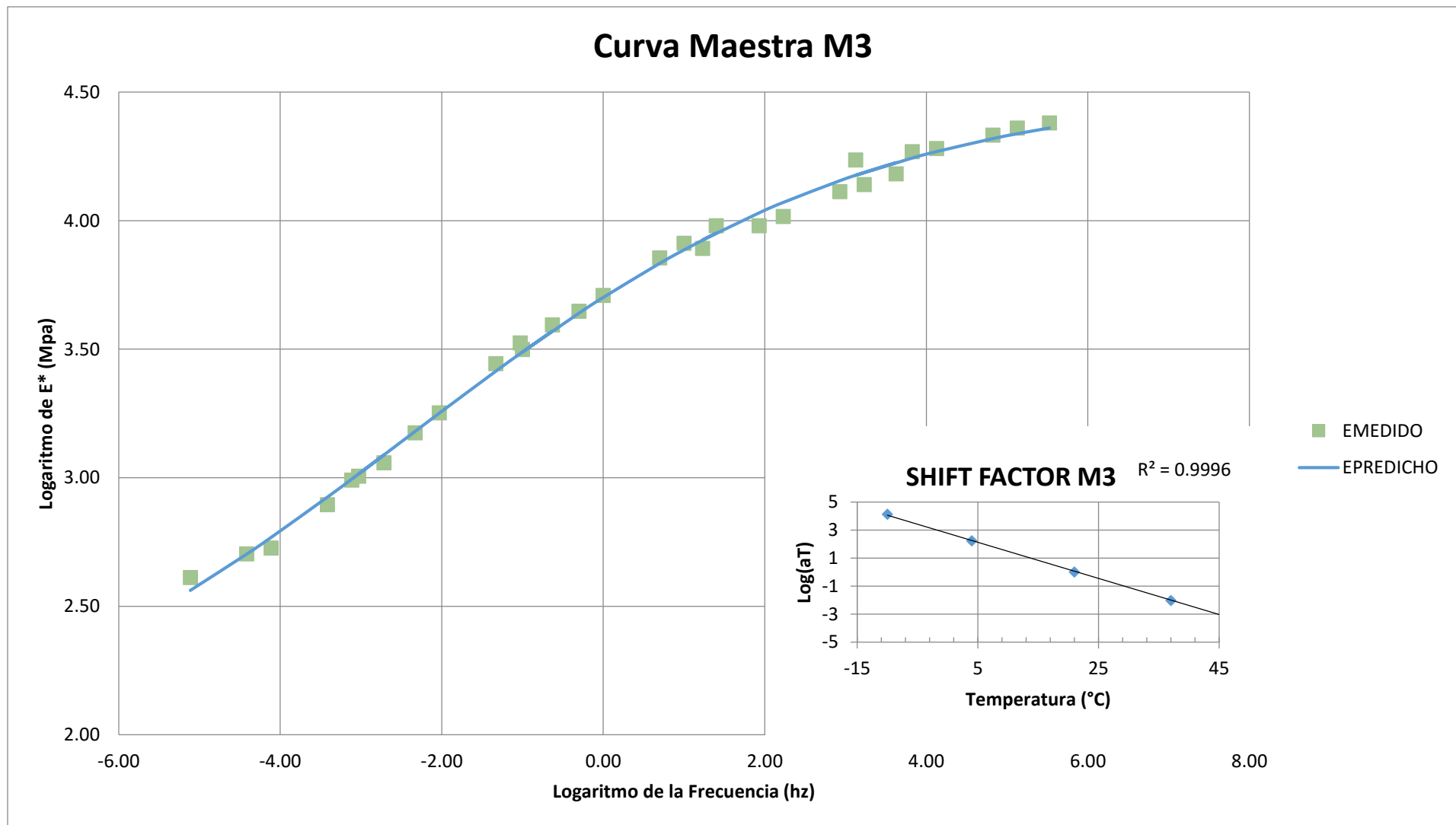


Figura. 3-12 Curva maestra de la muestra M3

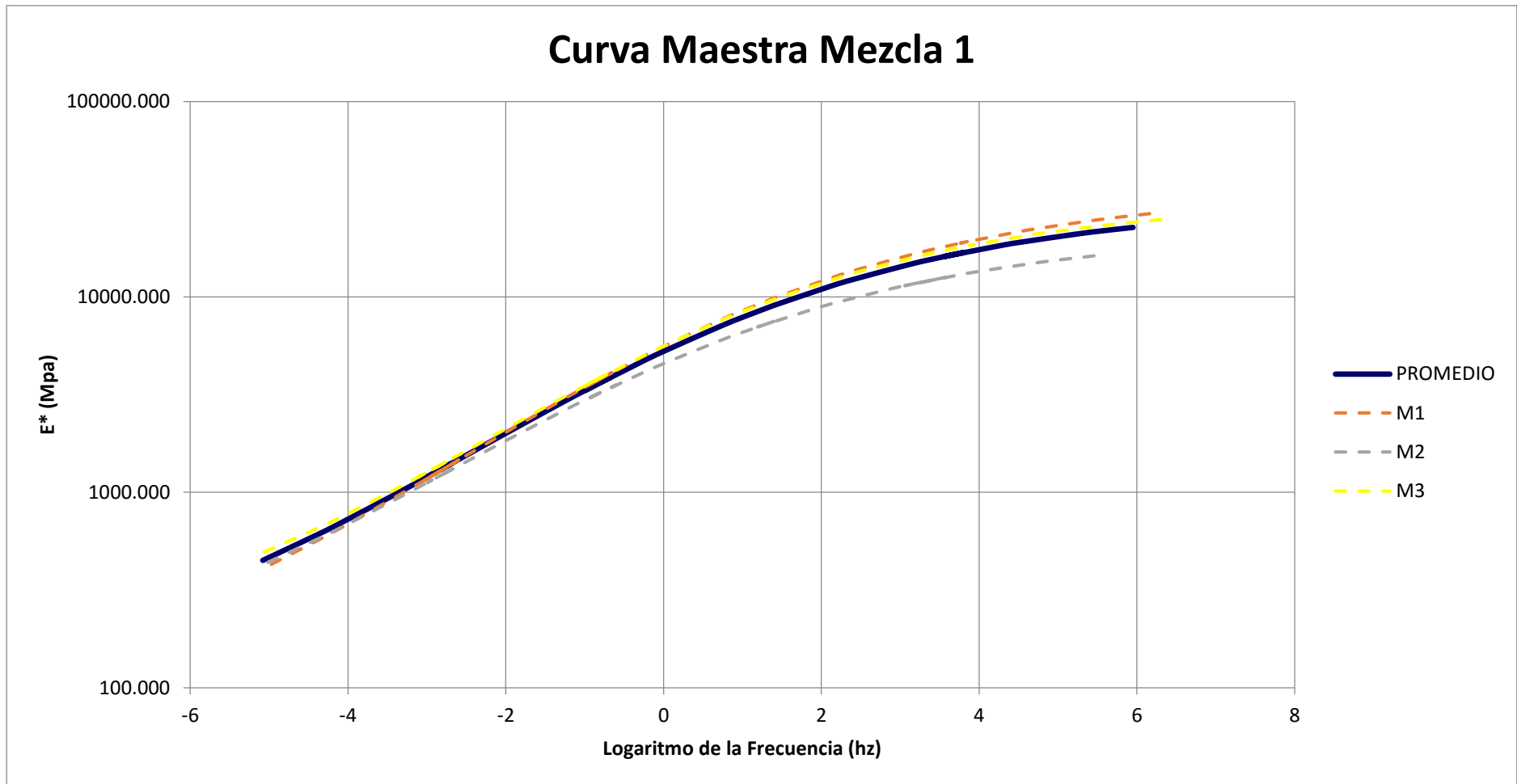


Figura. 3-13 Curva maestra promedio de la mezcla 1.

### 3.2.3.2. Mezcla 2

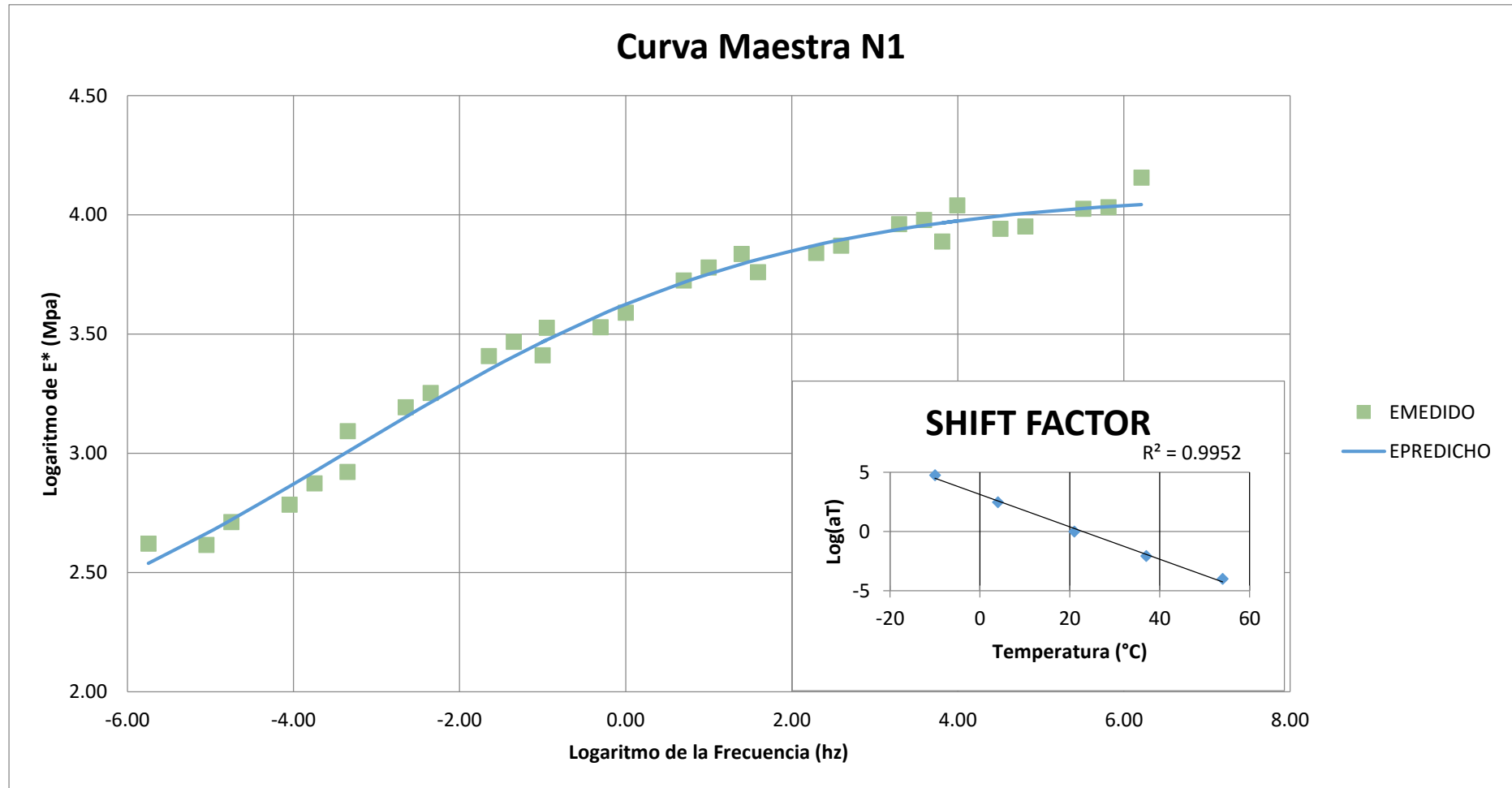


Figura. 3-14 Curva maestra de la muestra N1

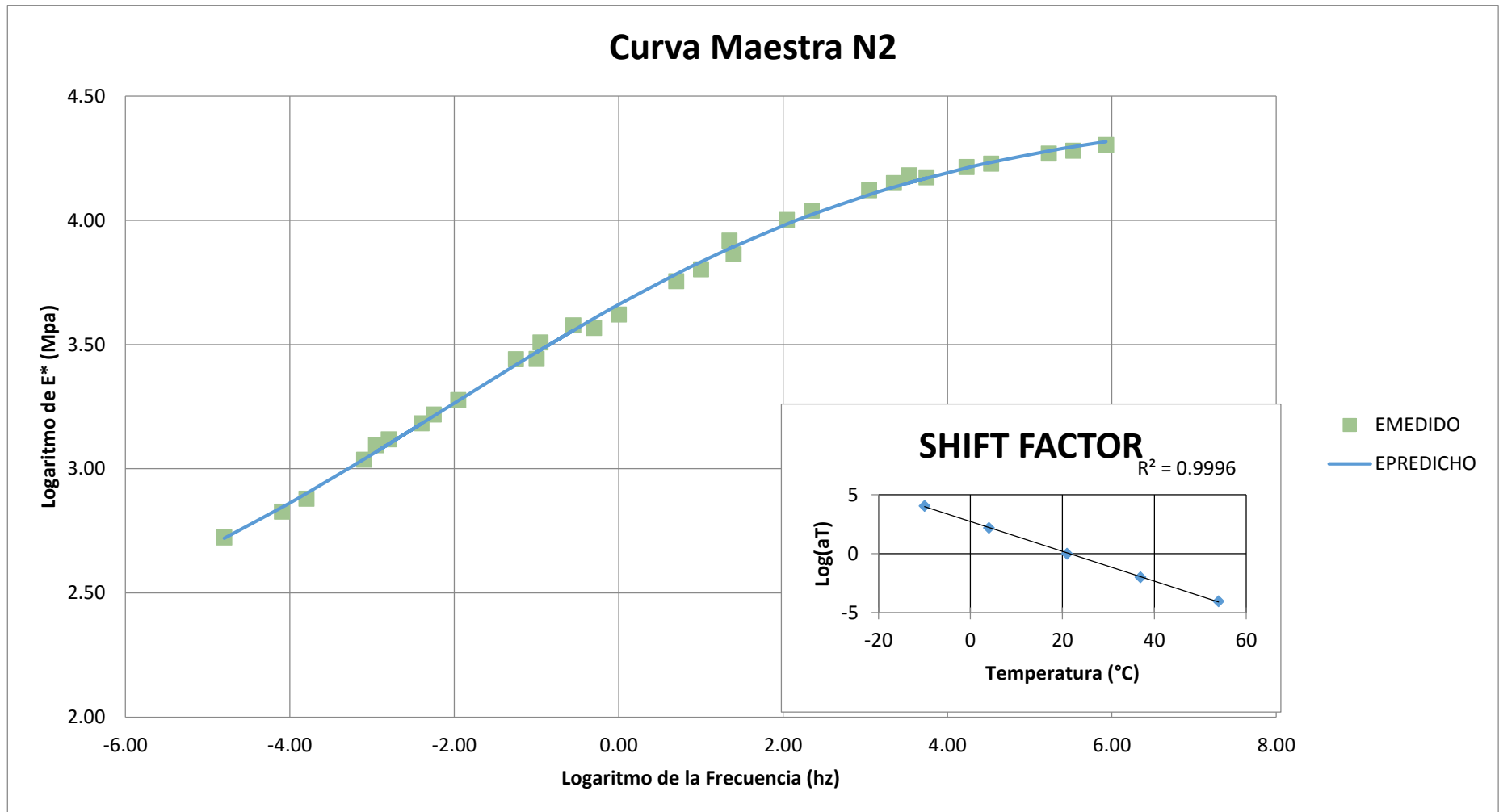


Figura. 3-15 Curva maestra muestra N2

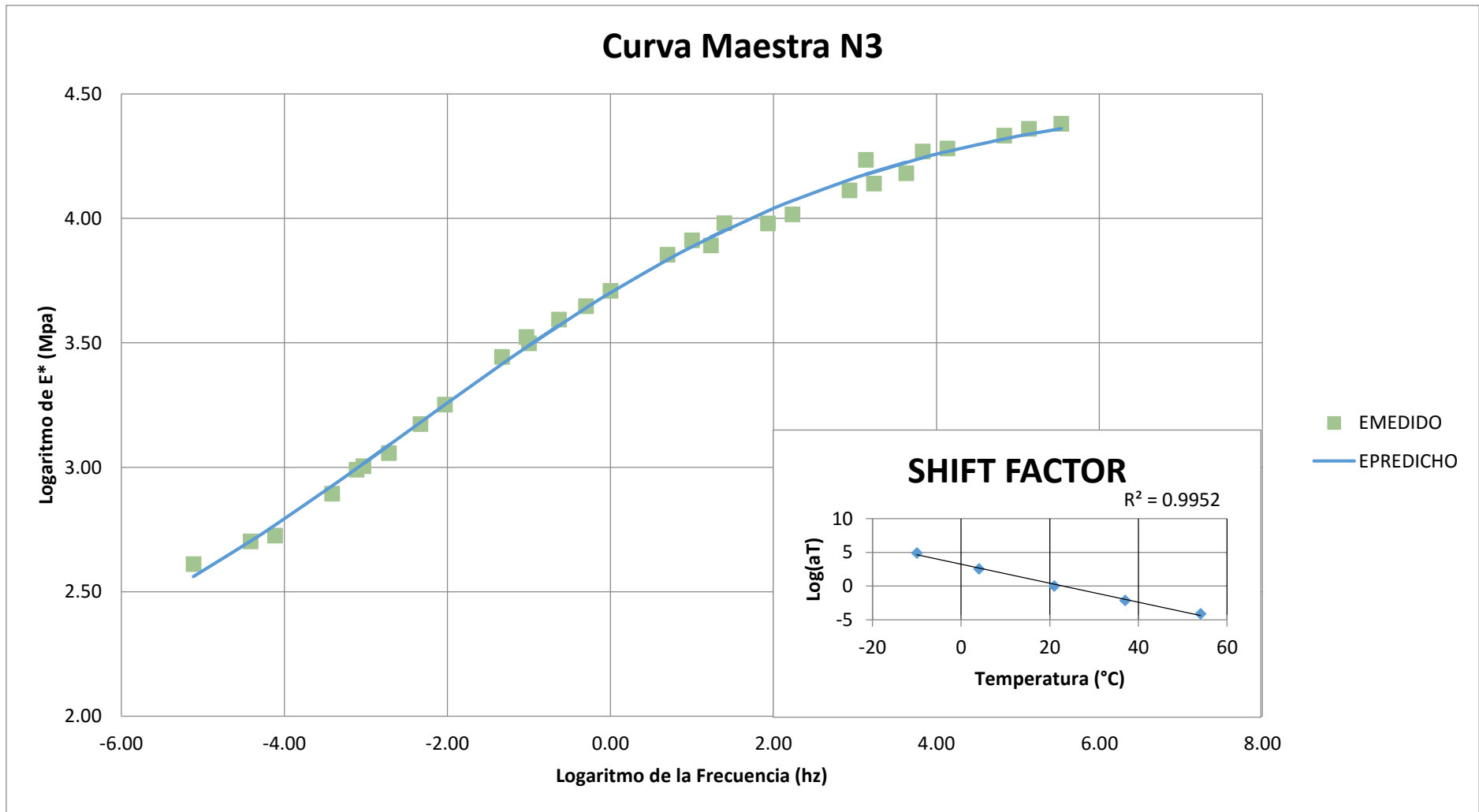


Figura. 3-16 Curva maestra Muestra N3.

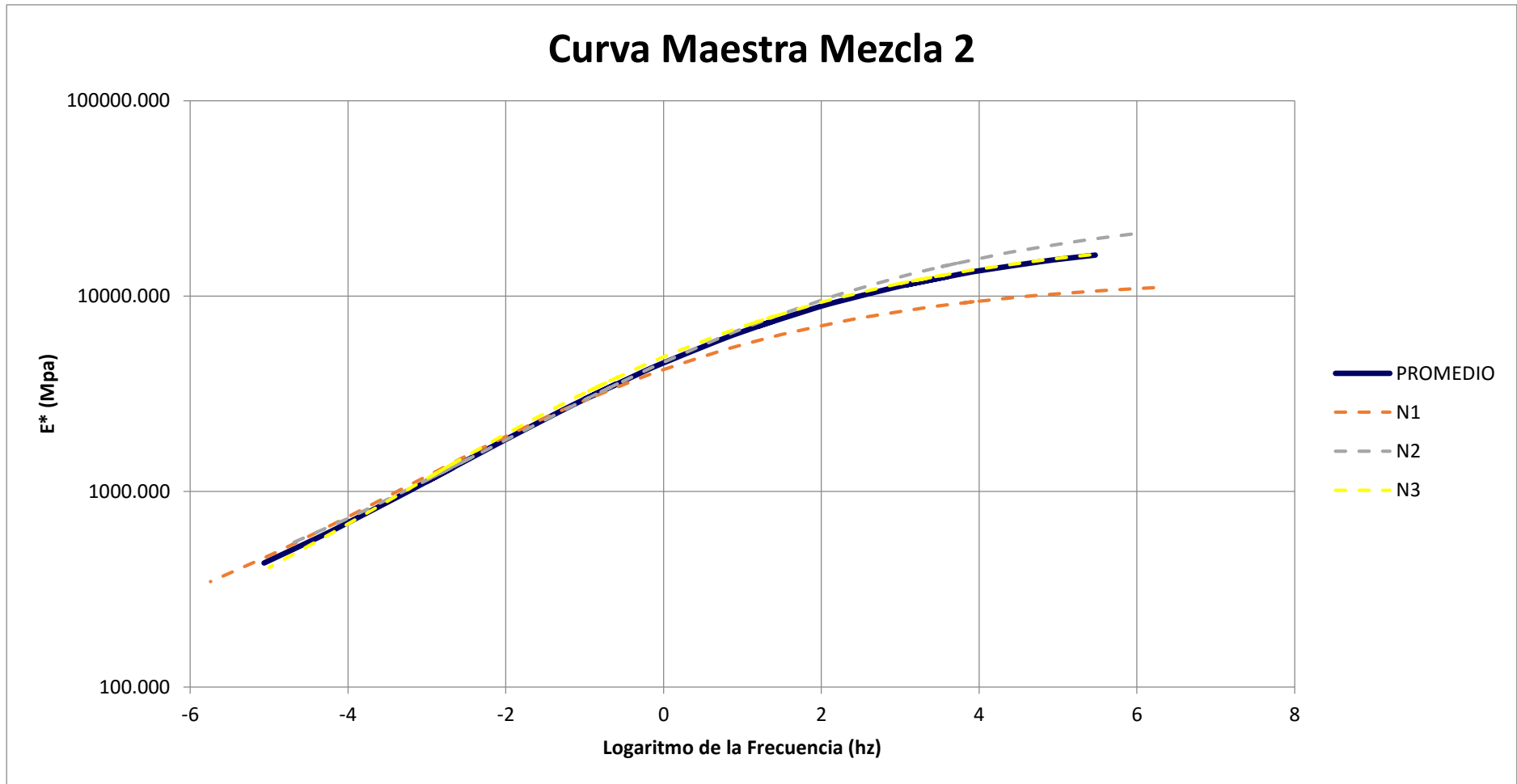


Figura. 3-17 Curva maestra de la mezcla 2.

### 3.2.3.3. Mezcla 3

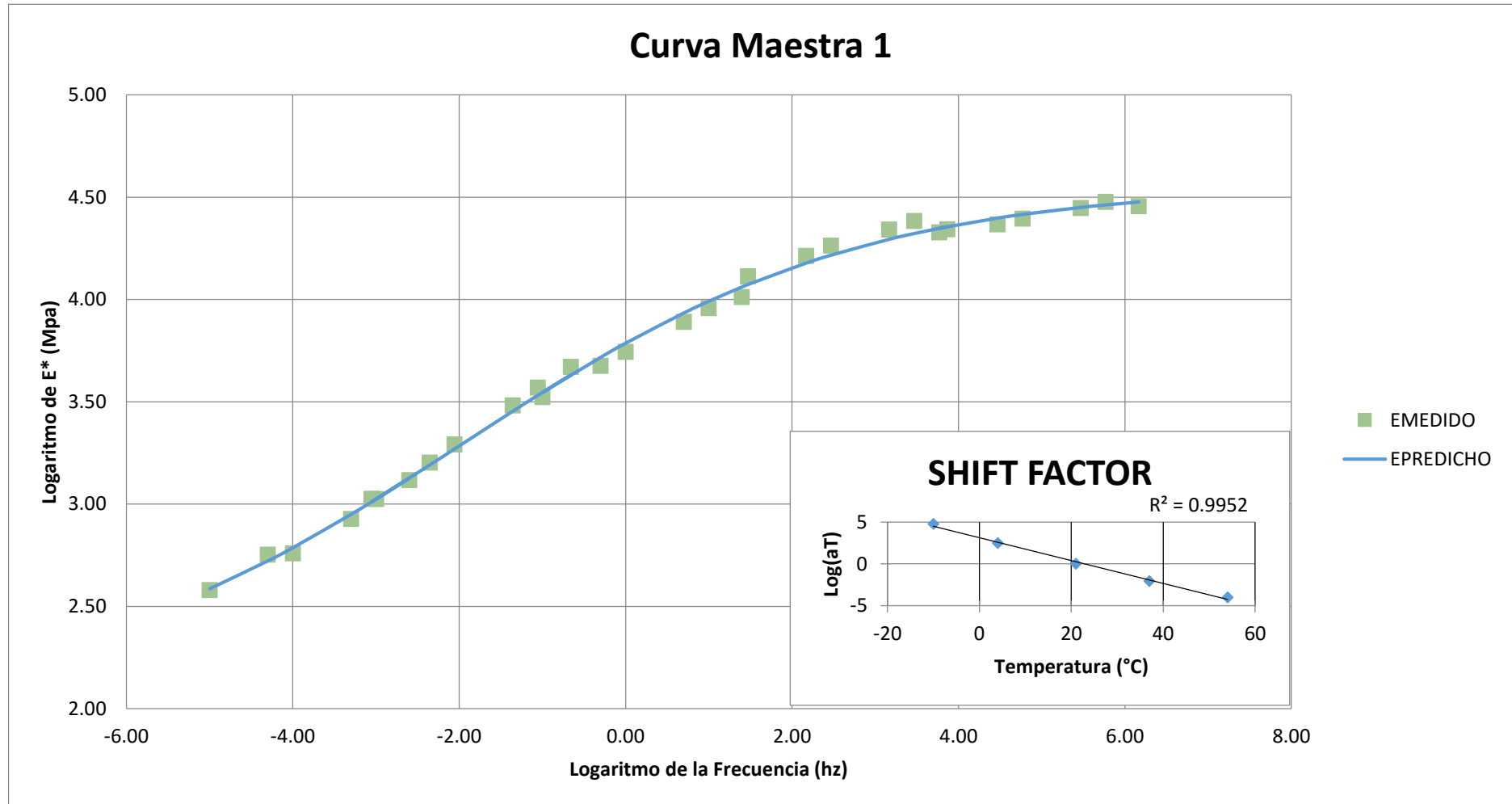


Figura. 3-18 Curva maestra muestra 1

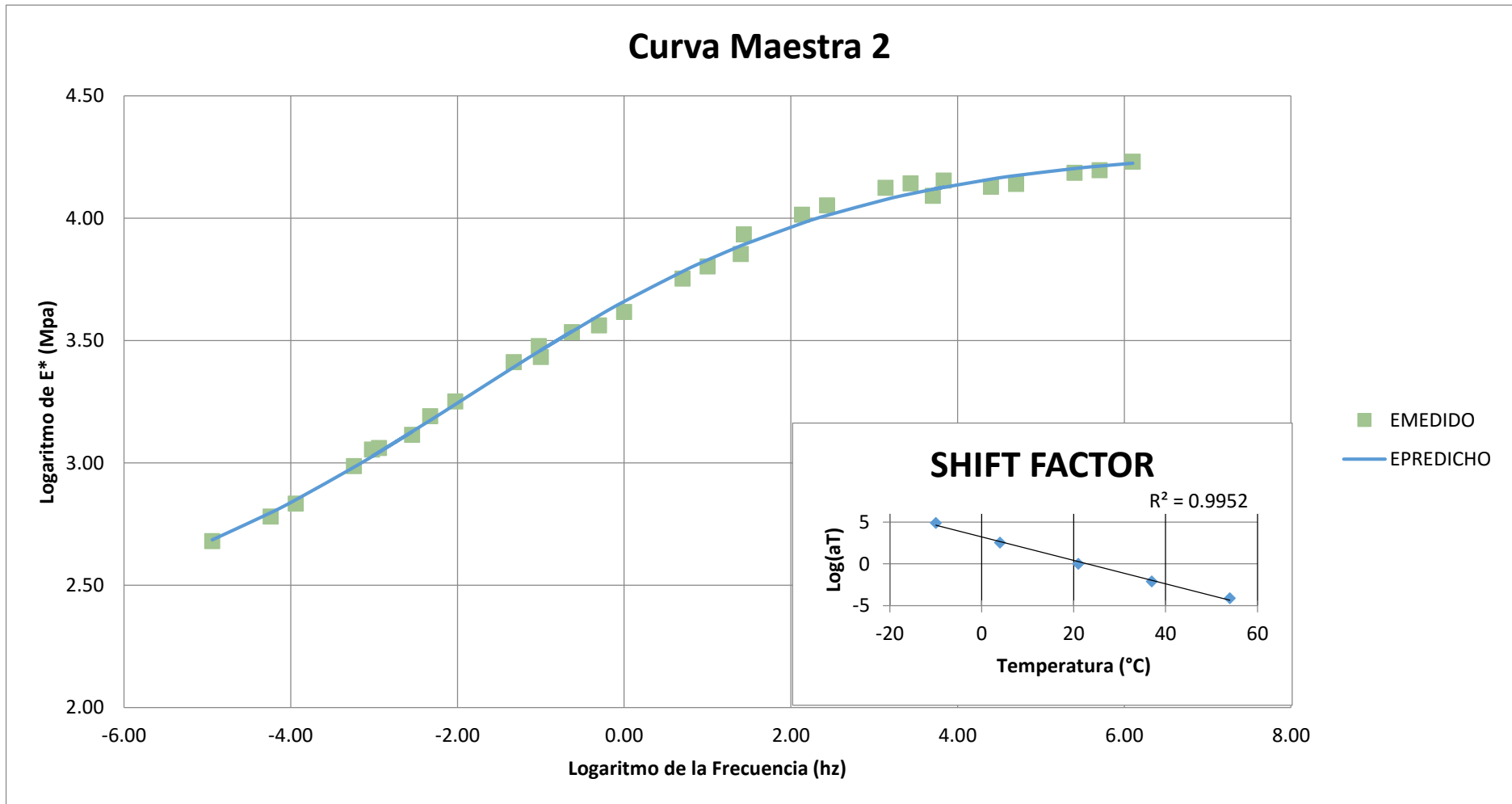


Figura. 3-19 Curva maestra muestra 2

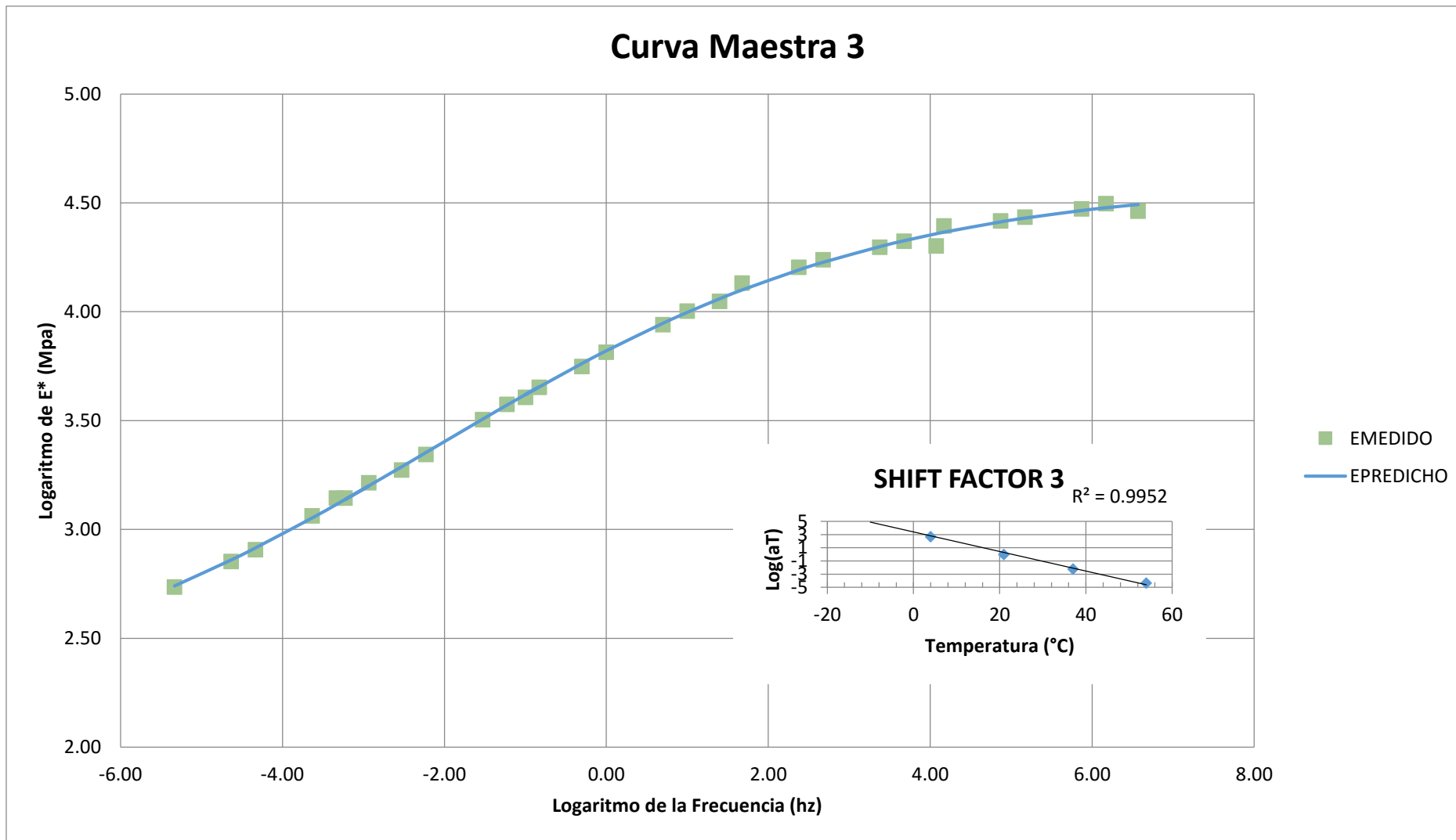


Figura. 3-20 Curva maestra muestra 3.

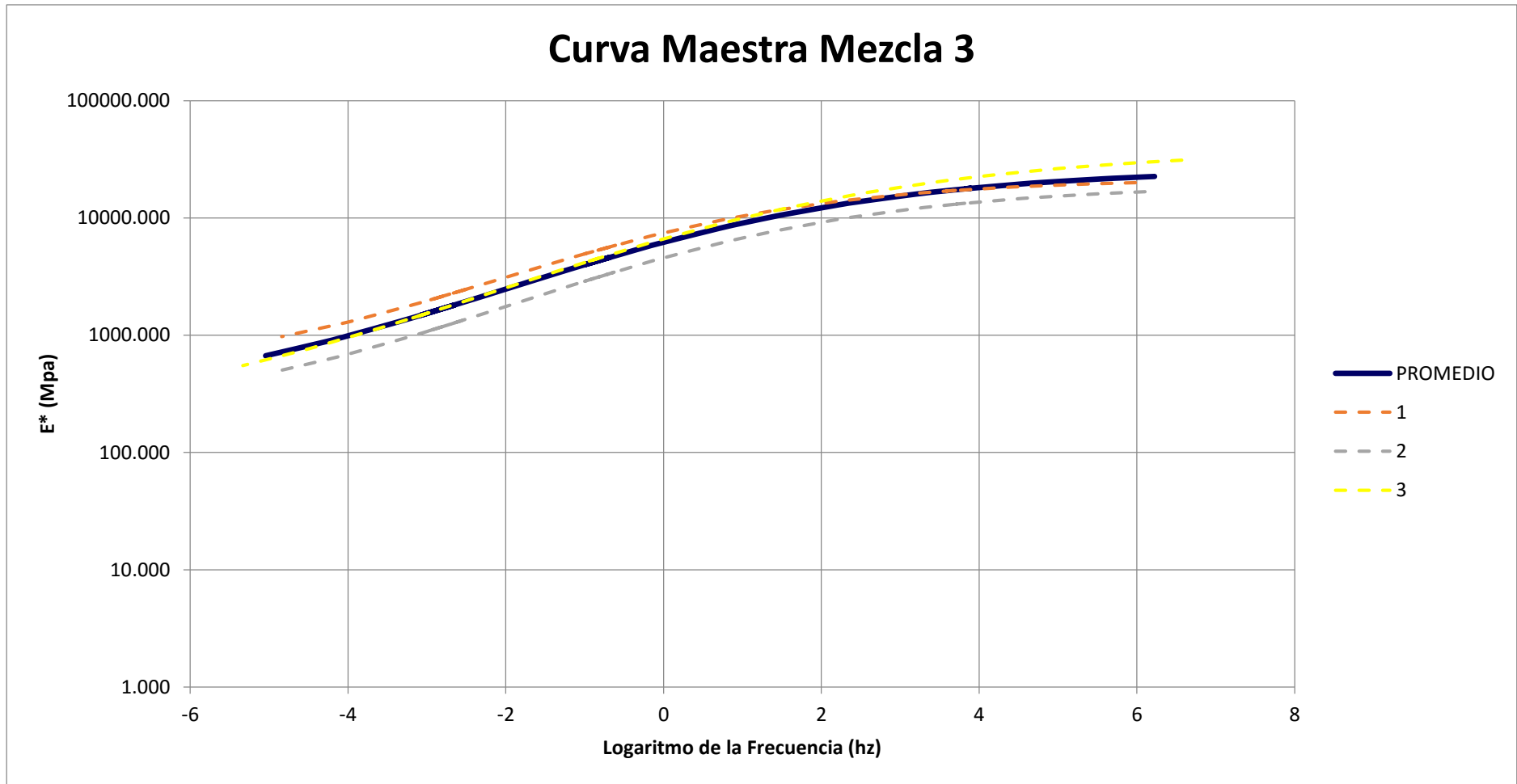


Figura. 3-21 Curva maestra mezcla 3.

Se puede observar que sin importar cuál sea la abscisa en la que se quiera dibujarla curva maestra, se le aplica un factor de forma para poder obtener una curva suavizada.

### 3.2.4. Análisis de las Curvas Maestras

*Tabla 3-15 Módulos dinámicos obtenidos con la hoja de cálculo.*

T (°C)	FREC. (hz)	Mezcla 1			Mezcla 2			Mezcla 3		
		Módulo Dinámico Predicho (E*)			Módulo Dinámico Predicho (E*)			Módulo Dinámico Predicho (E*)		
		M1	M2	M3	N1	N2	N3	1	2	3
-10	25	29984.72	27366.64	22952.74	11044.73	16008.54	20742.68	19964.05	16777.57	31051.98
	10	29026.59	25917.27	21798.84	10826.58	15429.56	19791.26	19635.21	16335.95	29997.49
	5	28221.39	24789.21	20874.56	10642.63	14948.7	19028.38	19347.96	15961.88	29132.17
	1	26070.53	22088.9	18576.86	10146.33	13687.44	17126.64	18532.81	14949.72	26896.33
	0.5	25020.97	20902.44	17533.07	9900.54	13083.28	16259.16	18109.83	14449.01	25837.94
	0.1	22309.41	18132.92	15029.47	9250.39	11553.54	14165.39	16939.07	13134.31	23178.29
4	25	22711.45	18418.9	16821.08	9435.52	12977.68	14812.16	17280.81	13395.26	22798.27
	10	21039.51	16852.1	15390.84	9031.99	12119.72	13599.2	16532.64	12577.01	21160.31
	5	19711.79	15682.94	14297.91	8702.29	11436.08	12674.43	15905	11917.7	19884.19
	1	16487.55	13059.46	11777.19	7859.22	9762.63	10545.69	14247.07	10278.65	16853.89
	0.5	15072.34	11983.39	10721.51	7465.76	9019.91	9654.56	13453.75	9540.58	15545.59
	0.1	11846.12	9648.97	8406.82	6497.14	7299.78	7696.91	11472.01	7808.33	12585.11
21	25	11525.89	9338.14	8932.79	6227.72	8121.56	7834.77	11544.53	7717.26	11459.36
	10	9810.85	8151.21	7691.9	5649.4	7149.98	6803.23	10365.46	6755.66	9931.13
	5	8595.95	7317.47	6816.99	5210.58	6435.65	6075.85	9468.24	6056.04	8847.97
	1	6118.63	5604.04	5026.32	4213.42	4892.77	4582.69	7444.87	4570.58	6615.17
	0.5	5216.54	4962.72	4365.07	3803.85	4294.09	4027.89	6629.38	4005.05	5784.49
	0.1	3513.81	3690.95	3084.87	2927.5	3089.08	2942.84	4939.62	2887.93	4164.35
37	25	4283.54	4237.54	3714.88	2995.97	3955.29	3603.22	5927.03	3448.49	4522.51
	10	3403.47	3568.18	3037.47	2548.09	3275.72	3008.93	4996.45	2852.48	3728.34
	5	2845.82	3122.03	2596.44	2240.33	2820.62	2617	4366.11	2461.04	3211.67
	1	1862.4	2267.64	1784.43	1633.37	1957.03	1880.15	3156.41	1735.42	2259.42
	0.5	1551.24	1969.6	1514.25	1417.64	1662.91	1628.72	2740.73	1493.16	1941.49
	0.1	1024.78	1413.84	1034.53	1013.64	1134.43	1170.18	1988.71	1062.74	1373.29
54	25	1339.06	1736.93	1226.29	1016.62	1460.05	1518.3	2533.51	1341.12	1584.43
	10	1058.9	1437.53	988.07	839.46	1174.07	1257.58	2110.57	1105.9	1304.4
	5	891.42	1245.29	840.95	727.34	996.48	1092.58	1846.08	960.24	1130.19
	1	612.43	893.46	585.35	526.88	687.79	796.27	1381.45	706.36	823.7
	0.5	527.56	775.7	504.24	461.53	590.34	698.91	1232.87	625.49	724.88
	0.1	385.59	562.59	363.93	346.14	423.38	525.19	974.82	484.9	550.98
<b>% Vacíos</b>		6.14	6.96	6.99	7.85	8.23	7.82	1.75	2.05	1.14
<b>% Asfalto</b>		6.77	6.87	6.99	4.97	4.93	4.74	8.07	8.25	7.76

Con los valores obtenidos en la hoja de cálculo, mostrados en la Tabla 3-15 Módulos dinámicos obtenidos con la hoja de cálculo., se puede corroborar que lo expuesto en el capítulo 2, sección 2.1 Caracterización de la mezcla, las probetas M3 para la mezcla 1, N1 para la mezcla 2 y 2 para la mezcla 3, tienen los valores más altos de porcentaje de vacíos, siendo estos: 6.99%, 8.23% y 2.05% respectivamente y el mayor valor de porcentaje de asfalto: 6.99%, 4.97% y 8.25%. Dando como resultado el menor módulo dinámico en cada una de estas probetas para su respectiva mezcla asfáltica.

En la tabla Tabla 3-16 están los valores de los módulos dinámicos promedio para las 3 mezclas, dando como resultado una similitud entre los valores obtenidos en la hoja de cálculo denominado módulo dinámico predicho y los valores que resultaron del ensayo realizado, al trabajar con un promedio de los valores en cada probeta se decimos que no existe ninguna relación entre las curvas maestras de las mezclas ensayadas, sin importar que fueron diseñadas como base y carpetas asfálticas en dos de nuestros casos, debido a que al poseer distintos materiales granulares y diferentes propiedades volumétricas las hace diferentes, como se mostró en esta disertación, en el promedio de los valores obtenidos se ve claramente que la diferencia entre los valores de una mezcla y otra se reducen, puesto a que la operación matemática que se realizó para sacar el promedio de los módulos, mientras que si se analiza los valores individuales la diferencia aumenta, confirmando que no existe ninguna relación o similitud entre las mezclas y que los valores de módulo dinámico y la curva maestra obtenida para cada mezcla son propios de cada una y depende específicamente de las propiedades de la misma.

Tabla 3-16 Módulos dinámicos promedio.

Mezcla 1		Mezcla 2		Mezcla 3	
Módulo Dinámico Ensayo	Módulo Dinámico Predicho (E*)	Módulo Dinámico Ensayo	Módulo Dinámico Predicho (E*)	Módulo Dinámico Ensayo	Módulo Dinámico Predicho (E*)
26002.83	26663.97	19450.95	18468.32	22960.03	22586.17
26272.40	25548.81	17107.15	17660.49	21999.17	21987.20
24731.63	24643.87	16578.20	17006.95	21271.10	21483.16
22163.50	22347.41	14872.35	15356.95	19372.27	20131.60
21224.03	21281.11	14386.25	14595.17	18713.93	19468.35
19597.53	18660.30	13378.60	12735.30	17488.00	17739.38
18284.27	19325.89	14335.10	13983.64	17583.57	17926.83
18206.23	17785.07	12856.10	12916.54	17271.27	16844.41
16804.83	16597.15	12119.10	12091.19	16544.70	15976.63
13977.37	13821.32	10110.60	10152.67	14458.43	13831.62
12678.83	12643.16	9471.75	9325.21	13485.70	12869.52
10284.50	10025.16	7916.70	7474.71	11574.00	10614.49
9614.73	9916.63	7775.20	8005.86	9925.27	10292.72
8356.63	8543.95	6759.45	6992.36	8835.03	9045.76
7328.37	7574.91	6105.65	6266.08	7941.27	8138.58
5292.83	5589.30	4472.15	4744.81	6053.87	6207.36
4593.53	4855.59	3940.65	4169.34	5357.57	5468.20
3308.30	3435.06	2912.10	3029.23	4041.70	3996.01
4341.37	4090.17	3935.25	3775.20	4469.00	4625.71
3647.10	3345.21	3411.75	3142.49	3832.50	3852.50
3054.93	2860.71	2888.55	2722.15	3315.27	3341.81
2011.07	1969.99	1938.95	1927.23	2307.60	2385.90
1687.37	1674.06	1667.20	1655.46	2002.97	2062.99
1176.40	1149.13	1199.95	1161.48	1483.73	1482.40
1394.13	1447.36	1430.45	1489.11	1867.73	1815.18
1174.03	1168.85	1250.05	1216.93	1618.17	1505.70
952.00	996.62	1023.20	1045.70	1369.00	1312.51
654.73	696.92	701.55	741.56	964.90	972.00
604.10	601.68	624.80	643.04	848.70	862.25
455.83	436.71	492.00	469.93	653.00	669.51

A continuación se muestra la Figura. 3-22 Curvas maestras de las tres mezclas. con ella se puede realizar una comparación entre las dos formas de representar las curvas maestras que se mencionan en este documento analizando diferentes aspectos que

puedan presentar las mismas en cuanto a los resultados de módulo obtenidos. Las mezclas utilizadas serán de forma diferente en campo es así que para las Mezclas 1 y 3 se usaron como Carpeta Asfáltica, y la Mezcla 2 como Base Asfáltica.

Para todos los ensayos realizados a lo largo de este trabajo se utilizaron como mínimo 3 especímenes para obtener un mayor número de datos y por ende mejores resultados que sean lo más aproximados a la realidad. Esto permite en caso de obtener variaciones considerables en los resultados eliminar los datos que contenga la mayor variación.

Solamente en un espécimen de una de las mezclas utilizadas para el estudio se mostraron datos con variaciones considerables, por esta razón se decidió eliminar la probeta N1 de la mezcla 2 producida por la planta asfáltica del DMQ, con esto se minimiza el error que se puede producir al calcular el módulo dinámico y se obtendrá una mejor curva promedio que será semejante a las curvas parciales con las cuales será obtenida.

Un parámetro fundamental con el cual se basó para la eliminación de esos datos, fue porque la probeta presentaba más porosidad que las otras muestras, produciendo así un problema al momento del ensayo en el que la muestra presentaba valores lejanos de módulo dinámico con respecto de las otras dos probetas. Esto fue reflejado en los LVDT's que no medían con precisión la deformación que se producía en la probeta, además de que la carga sinusoidal no se distribuía adecuadamente a lo largo de toda la muestra. Es así que al momento de aplicar la carga la medición de deformación de los LVDT's van a ser mayores que en la realidad, disminuyendo así el valor del módulo dinámico, dando un valor erróneo y alejado de la realidad.

## Curva Maestra de los Promedios Antes del Analisis

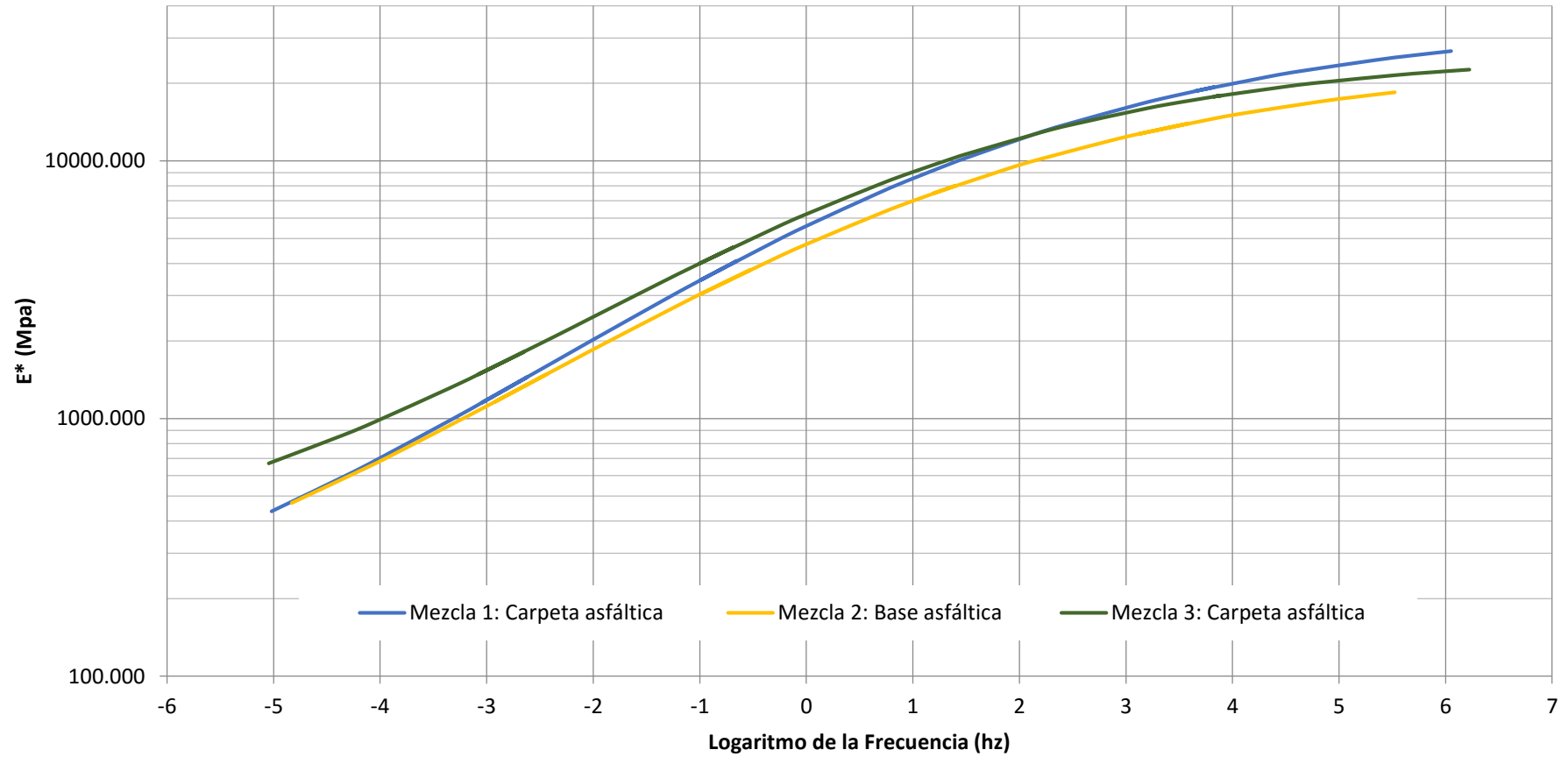
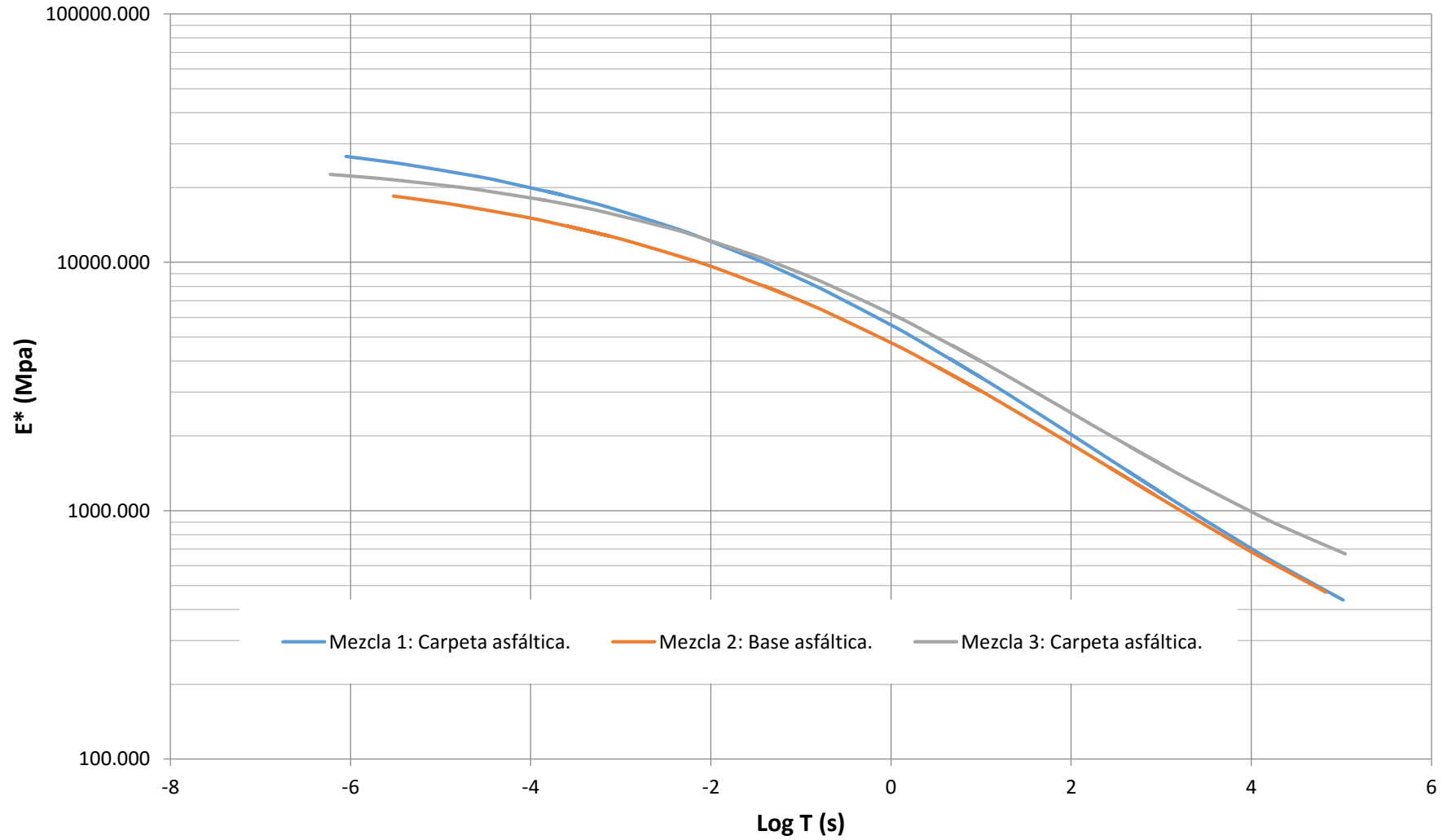
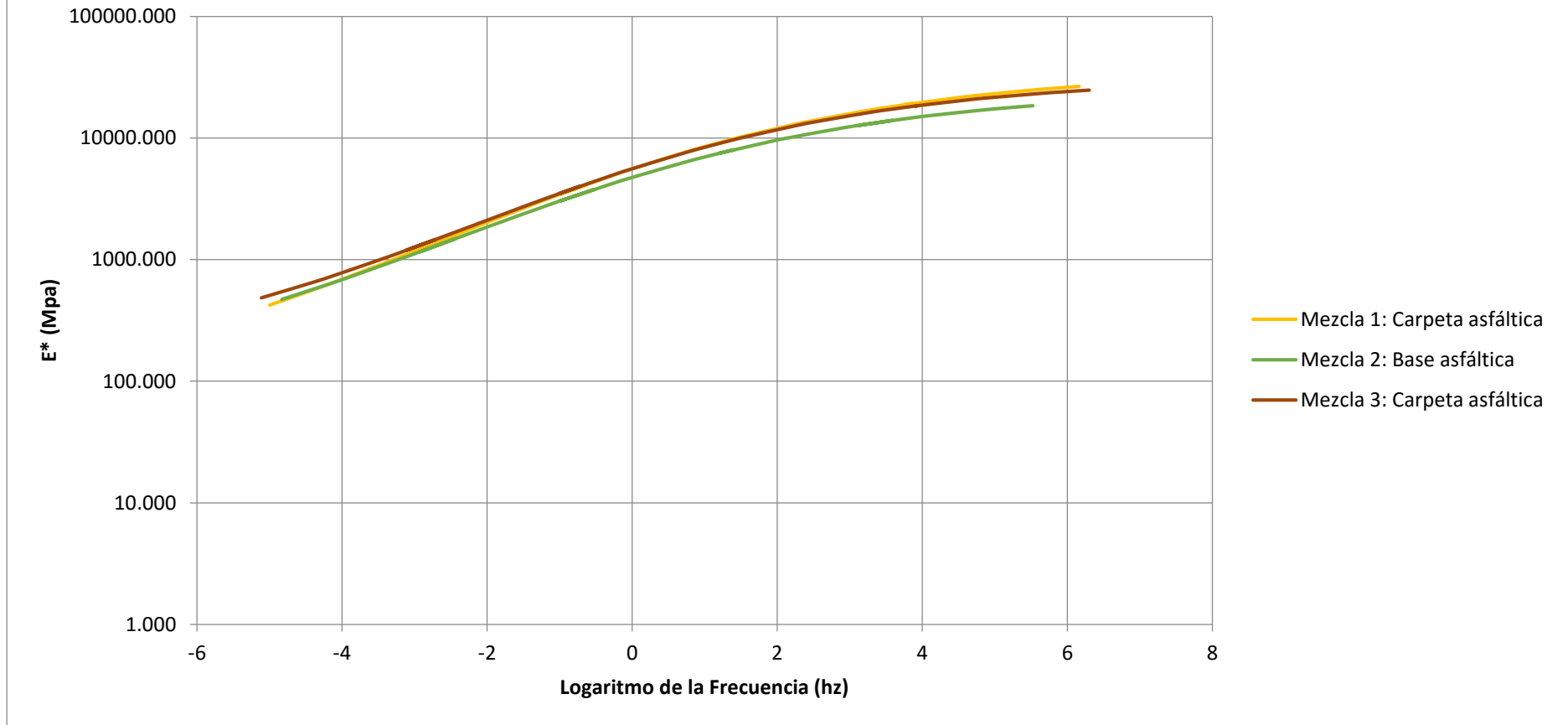


Figura. 3-22 Curvas maestras de las tres mezclas.

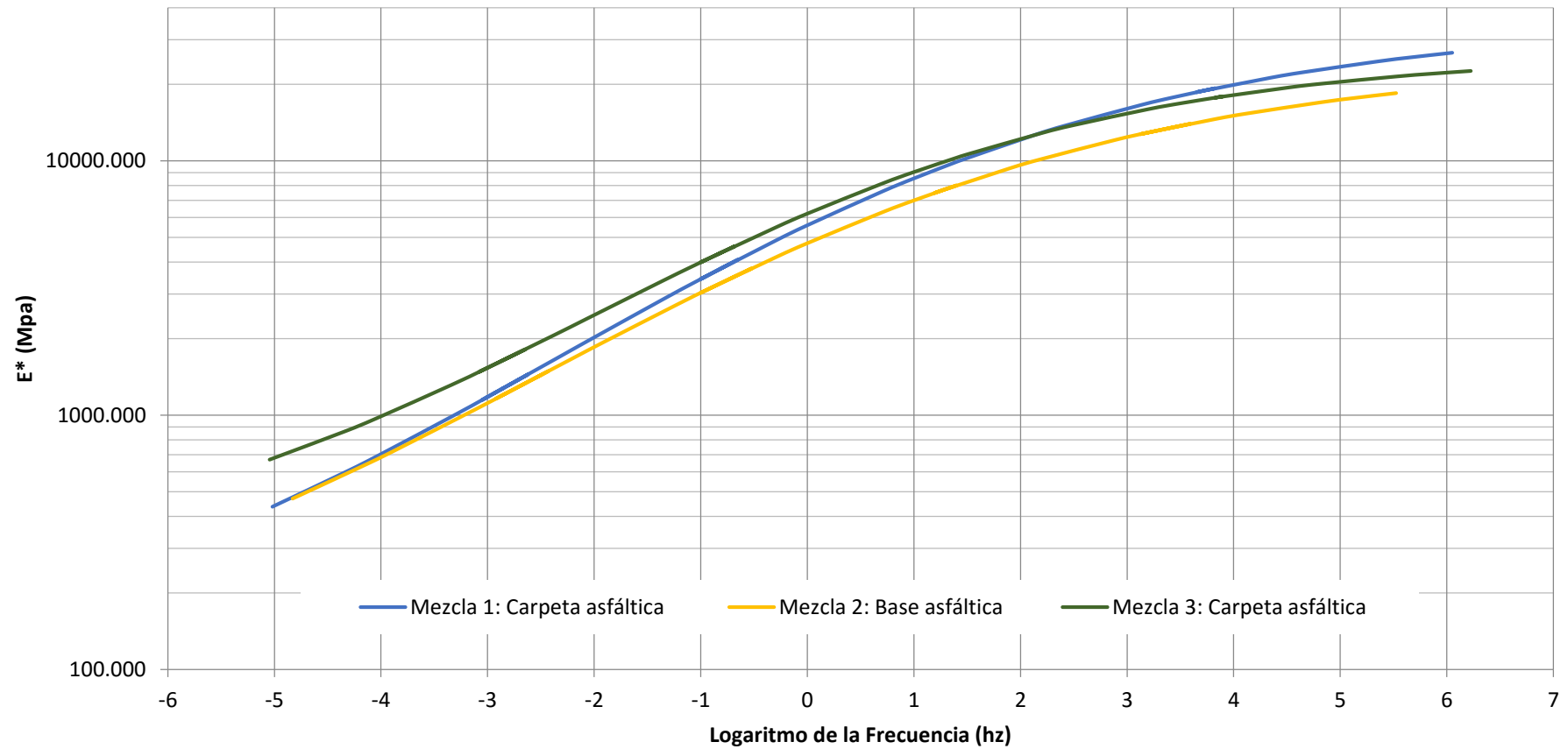
## Curva Maestra de los Promedios Antes del Analisis

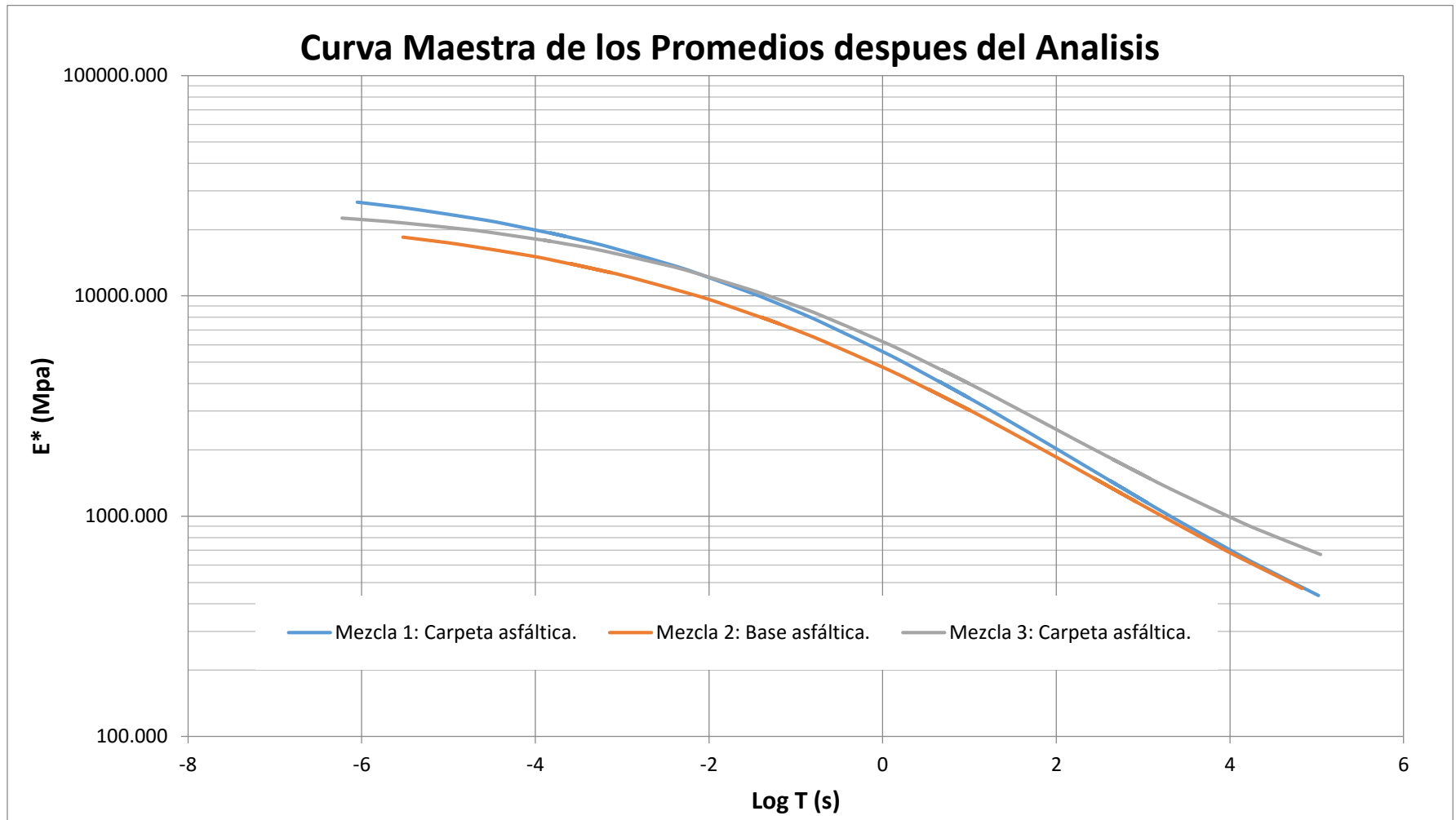


## Curva Maestra de los Promedios despues del Analisis



## Curva Maestra de los Promedios despues del Analisis





Como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en la cual se presentan las curvas maestras resultantes, se puede apreciar que las curvas no tienen ninguna relación puesto que el diseño de cada mezcla y las plantas en cuales fueron elaborados utilizan materiales granulares totalmente diferentes, por ende cada mezcla tendrán sus propias características y su propia curva que funcionara solo para esa mezcla. Es por ello que la caracterización de las mezclas es significativa porque nos brinda datos como las propiedades volumétricas con las que se puede ver desde un inicio lo diferente que son cada una de las mezclas.

Es interesante observar como en ciertas etapas de la curva maestra dos de las mezclas se comportan de manera muy similar sin importar el hecho de que hayan sido diseñadas como carpetas asfálticas con parámetros diferentes alcanzando valores mayores a 20.000,00 MPa en temperaturas bajas. Además en la gráfica se puede notar que los valores que pertenecen a la base asfáltica son menores a los de la carpeta, siendo un resultado lógico siendo la carpeta una material que estará expuesto a las condiciones del ambiente (temperatura y trafico) es la que debe tener el mejor desempeño a diferencia de la base.

En cuanto al análisis general de todas las mezclas se puede observar que en la *Figura respecto al tiempo de las mezclas.* y la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el comportamiento de las curvas depende de la temperatura y el tiempo de carga en el primer caso, observando que para altas temperaturas y altos tiempos de carga los valores de módulo dinámico son más bajos; para el segundo caso depende de la temperatura y la frecuencia de carga y como era de esperarse los valores de módulo dinámico son más bajos a altas temperaturas y bajas frecuencias de carga, esto se debe a la relación inversamente proporcional que existe entre el periodo de carga y la frecuencia. Además de que a temperaturas bajas las curvas se comportan de manera muy similar, alcanzando valores de módulo dinámico superiores a 10 000 Mpa. Se debe considerar que para el caso más desfavorable, es decir altas temperaturas y bajas frecuencias de carga, las curvas tienen valores de modulo bajos sin importar el uso que van a tener las mezclas por lo que en el caso carpetas asfálticas es recomendable analizar estos resultados ya que esta capa requiere de un mejor comportamiento, porque es la capa de la estructura del pavimento que va a estar en contacto directo con las cargas vehiculares y se encuentra expuesta a la intemperie, por lo que la variación de temperatura a lo largo del día tendrá mayor influencia en esta carpeta.

Según lo mencionado en el numeral 2.1.1 Gravedad Especifica Teórica Máxima Rice. En el cual para una mezcla asfáltica mientras mayor sea el porcentaje de vacíos menor valor del módulo dinámico se obtendrá y viceversa. Como se puede observar en las tablas de la sección 3.2.1 que los valores más altos de módulos corresponden a las muestras con menos porcentaje de vacíos como se muestra en la Tabla 3-10 Resumen de resultados de ensayos.

## 4. CAPITULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. Conclusiones

- Las curvas representadas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, son aquellas que servirán como guía para futuros diseñadores que deseen utilizar el método Mecanístico – Empírico M–EPDG propuesto AASHTO y utilizado por varios países del mundo a partir del año 2002. Es por ello que estas curvas deberán ser incorporadas al catálogo de curvas maestras para diferentes mezclas asfálticas que existe dentro de la región, cumpliendo así uno de los objetivos de esta disertación.
- En la actualidad varios son los métodos que se pueden utilizar para el cálculo del módulo dinámico, ya sean estos teóricos o prácticos, sin importar cuál de ellos se utilice debe existir una variación leve de los resultados. En este trabajo se utilizó métodos de ensayo en laboratorio ya que son considerados una excelente alternativa, puesto que los mismos simulan las condiciones propias del entorno a las que estará sometidas las mezclas asfálticas dando como resultado valores mucho más confiables.
- Como se puede observar en la disertación se realiza en primer lugar una caracterización de las mezclas asfálticas, con esto se obtiene los parámetros esenciales que fueron utilizados en el diseño de la misma. Con estos datos se puede realizar un control de las mezclas, ya que los mismos deben cumplir con las especificaciones impuestas por las normas ya sean estos factores de precisión en algunos casos y los rangos de variación permisibles que se encuentran en las Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes del Ministerio de Transporte y Obras Publicas del Ecuador.  

Si se realizara alguna comparación entre los datos de laboratorio y del diseño de la mezcla, en el caso que existieran variaciones estas podrían ser causadas principalmente por el efecto de segregación que puede sufrir la mezcla en su producción como en su transporte, por lo que es un problema que se debe tener en cuenta y debe ser controlado, para que no exista grandes variaciones en los resultados al momento de ser comparados.
- Al obtener el módulo dinámico de mezclas asfálticas en caliente, se puede realizar un mejor diseño de pavimento flexible, este valor es de gran utilidad

porque permite realizar no solo un análisis del comportamiento de la mezcla al estar sometida al efecto únicamente de cargas estáticas puntuales, sino que se trata de someter y analizar el material ante sollicitaciones dinámicas como lo es la carga sinusoidal, lo cual es un análisis que se asemeja a la realidad a la que está siendo sometida una estructura de pavimento flexible. Además de controlar las variables de mayor incidencia que pueden afectar al comportamiento de la mezcla asfáltica, siendo las mismas la temperatura ambiente y la frecuencia de carga que se le aplicará a la estructura.

- Como se puede observar en la tabulación de datos, los valores de módulo dinámico para mezclas asfálticas que van a ser utilizadas como carpeta asfáltica, los valores varían desde 17000MPa hasta 29000MPa, y para la mezcla asfáltica que será utilizada como base asfáltica los valores de módulo dinámico varían entre 18000Mpa y 20000Mpa. Comprobando que los valores para mezclas usadas como carpeta deben ser mayores, puesto a que estas estarán expuestas directamente a las condiciones propias del entorno como son cargas dinámicas y la temperatura.
- Es importante destacar que el módulo dinámico es el reflejo de un estudio más real en cuanto el efecto que sufre un pavimento bajo la aplicación de cargas dinámicas, donde todos los materiales utilizados en la mezcla: parte mineral y ligante asfálticos, son los encargados de resistir dichas cargas. Una de las propiedades principales que se obtiene en la combinación de estos materiales es el porcentaje de vacíos que tiene una relación inversamente proporcional con el módulo dinámico como se puede observar en las tablas del numeral 3.2.1, este análisis se realiza para cada uno de las muestras y se puede comparar solamente con muestras que tengan el mismo diseño. Por ejemplo, para la mezcla si se realiza la comparación entre sus tres muestras se puede observar que la probeta M1 tiene un porcentaje de vacíos del 6.14% y un valor de módulo dinámico de 28497.10Mpa a  $-10^{\circ}\text{C}$  con 25 Hz de frecuencia, mientras que la probeta M2 tiene un porcentaje de vacíos del 6.96% y un valor de módulo dinámico de 25513.50Mpa a  $-10^{\circ}\text{C}$  con 25 Hz de frecuencia, y para la probeta M3 el porcentaje de vacíos es de 6.99% con un valor de módulo dinámico de 24007.90Mpa a  $-10^{\circ}\text{C}$  con 25 Hz de frecuencia. Dando como resultado que a menor porcentaje de vacíos mayor es el módulo dinámico. Esto se cumple con todas y cada uno de las diferentes combinaciones de frecuencia y temperatura

realizadas en el ensayo del módulo dinámico para cada una de las mezclas asfálticas.

- Los resultados obtenidos en lo mencionado posteriormente, cumplen con la relación que existe entre el porcentaje de vacíos y porcentaje de asfalto versus el módulo dinámico, comprobando que a mayor porcentaje de vacíos y mayor porcentaje de asfalto menor será el valor del módulo dinámico y viceversa.
- Las curvas maestras serán propias de cada mezcla asfáltica sin importar que el uso que se le va a dar a la mezclas sea el mismo, cada mezclas tiene sus propias características, propios materiales y por lo cual sus propios valores de módulo dinámico.

#### **4.2. Recomendaciones**

- Se recomienda realizar el ensayo de módulo dinámico a diferentes tipos de mezclas que se estén produciendo dentro del Distrito Metropolitano de Quito, para seguir con la ampliación del catálogo de curvas maestras que servirá de guía para los diseñadores que deseen utilizar el método M – EPDG propuesto por la AASHTO.
- Se recomienda realizar el ensayo de módulo dinámico a un mayor número de especímenes para obtener un valor más acertado del mismo, ya que pueden existir problemas de homogeneidad en los mismos o problemas como los mencionados en la recomendación anterior, lo que genera datos erróneos de módulo dinámico pero al haber mayor cantidad de muestras estos pueden ser eliminados y aun así se seguirá teniendo los datos suficientes para la obtención de un valor más acertado de módulo dinámico.
- Se recomienda hacer todo el diseño de la mezcla en laboratorio, puesto que los diseños realizados en planta tienen un limitante, el cual pese a ser más real es elaborado de una forma menos controlado lo que genera variaciones en la caracterización de las mezclas si esta se diseñara en laboratorio.
- Un problema que se podría dar en el ensayo del módulo dinámico es aquel que se origina al momento de la extracción de los núcleos para el ensayo, ya que la obtención de los núcleos son a partir de una briqueta de diámetro mayor, para lo que se recomienda que entre las caras horizontales y verticales, de la probeta a ser ensayada, sean lo más perpendicular posible, tratando de esta forma que la

base a la que este anclada la briqueta sea lo más fija para evitar desviaciones al momento de obtenerlos núcleos.

- Se recomienda una vez terminado el ensayo del módulo dinámico dividir a la muestra en tres partes aproximadamente iguales para comprobar que el proceso de compactación dio como resultado una muestra homogénea a lo largo de toda su sección, de no ser así los valores obtenidos del módulo dinámico podrían ser erróneos, por lo que es recomendable eliminar las muestras que no presente esta característica.
- Al momento de colocar los LDVT en los núcleos que serán ensayados para la obtención del módulo dinámico la deformación inicial de los mismos se recomienda que estén dentro del 40% hasta el 60%, para que el software de la maquina universal permita realizar del ensayo.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

1. American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO] *Determining the Asphalt Binder Content of Hot Mix Asphalt (HMA) by the Ignition Method*, Estados Unidos de America: Autor.
2. American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO] (2001) *Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures*, Estados Unidos de America: Autor.
3. American Society for Testing Materials [ASTM] *Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixture*, Estados Unidos de America: Autor.
4. American Society for Testing Materials [ASTM] *Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*, Estados Unidos de America: Autor.
5. Chang, Carlos (2013) Aplicabilidad del método mecanístico-empírico de diseño de pavimentos AASHTO 2008 en Latinoamérica, *XVII CILA*. Guatemala.
6. Croney, Paul y Croney, David (1998) *Pavement Materials-Specification and Properties* en Design and Performance of Road Pavements (pp. 206-215) Estado Unidos de America: McGraw-Hill.
7. Higuera, Carlos; Naranjo, Gloria y Cetina, Jhon (2011) Determinación del módulo dinámico de una mezcla asfáltica por correlaciones, *Revista Facultad de Ingeniería UPTC*, 20, (41-54).
8. Instituto Nacional de Vías INVIAS (2010) *Gravedad específica y absorción de agregados gruesos INVE-223-07 Colombia: Autor.*
9. Instituto Nacional de Vías INVIAS (2010) *Modulo Dinámico de Mezclas Asfálticas. Colombia: Autor.*
10. Leiva, Fabricio (2006) *Estudio del módulo dinámico complejo de mezclas asfálticas desarrollo de curvas maestras Ira parte*. Universidad de Costa Rica Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales [LANAMME]. Costa Rica.
11. Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones (2002) *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes*, Ecuador: Autor.
12. Pellinen, Terhi., Witczak, Matthew., y Bonaquist, Ramon.(2003) Asphalt Mix Master Curve Construction Using Sigmoidal Fitting Function with Non-Linear

- Least Squares Optimization. *Recent Advances in Materials Characterization and Modeling of Pavement Systems*, (83-101), DOI: 10.1061/40709(257)6.
13. Sánchez, Fernando (2009) *Esfuerzos y deformaciones en pavimentos asfálticos*, 33. Recuperado de [http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina\\_via/modulos/MODULO%202.pdf](http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%202.pdf)
  14. Ulloa, Álvaro; Elizondo, Fabián y Badilla, Gustavo (2012) *Módulos de mezcla asfáltica*, Costa Rica.
  15. Yasir, A.; Muhammad, I; Sarfraz, A.; Shahab, K.; y Tariq, M. (2016) *Investigation of factors affecting dynamic modulus and phase angle of various asphalt concrete mixtures* en *Materials and Structures* (pp.857–868), DOI 10.1617/s11527-015-0544-3
  16. Yu, Jianhua (2012) *Modification of Dynamic Modulus Predictive Models for Asphalt Mixtures Containing Recycled Asphalt Shingles* (Disertacion de grado). Recuperada de Repositorio digital de Iowa State University (Num. 12540).

*Anexo 1 ASTM D2041/D2041M – 11 Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.*



# Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D2041/D2041M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

## 1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the theoretical maximum specific gravity and density of uncompacted bituminous paving mixtures at 25°C [77°F].

1.2 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. The values stated in each system may not be exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in non-conformance with the standard.

1.2.1 Residual pressure measurements are shown in both the SI unit of kPa and the commonly used non-standard equivalent unit of “mm of Hg”.

1.2.2 Measurements of volume and mass are only given in SI units because they are the only units typically used in practice when performing this test method.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

## 2. Referenced Documents

### 2.1 ASTM Standards:<sup>2</sup>

**C670** Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials

**D979** Practice for Sampling Bituminous Paving Mixtures

**D3666** Specification for Minimum Requirements for Agencies Testing and Inspecting Road and Paving Materials

**D4753** Guide for Evaluating, Selecting, and Specifying Balances and Standard Masses for Use in Soil, Rock, and Construction Materials Testing

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D04 on Road and Paving Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D04.21 on Specific Gravity and Density of Bituminous Mixtures.

Current edition approved Jan. 1, 2011. Published March 2011. Originally approved in 1964. Last previous edition approved in 2003 as D2041 – 03A. DOI: 10.1520/D2041\_D2041M-11.

<sup>2</sup> For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

**E1** Specification for ASTM Liquid-in-Glass Thermometers  
**E12** Terminology Relating to Density and Specific Gravity of Solids, Liquids, and Gases (Withdrawn 1996)<sup>3</sup>

## 3. Terminology

3.1 The terms “specific gravity” and “density” used in this test method are in accordance with Terminology E12.

### 3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *density, as determined by this test method*—the mass of a cubic meter of the material at 25°C [77°F] in SI units.

3.2.2 *residual pressure, as employed by this test method*—the pressure in a vacuum vessel when vacuum is applied.

3.2.3 *specific gravity, as determined by this test method*—the ratio of a given mass of material at 25°C [77°F] to the mass of an equal volume of water at the same temperature.

## 4. Summary of Test Method

4.1 A weighed sample of oven-dry paving mixture in the loose condition is placed in a tared vacuum vessel. Sufficient water at a temperature of 25°C [77°F] is added to completely submerge the sample. Vacuum is gradually applied to reduce the residual pressure in the vacuum vessel to 4 kPa [30 mm of Hg] or less and then held for 15 ± 2 min. At the end of the vacuum period, the vacuum is gradually released. The volume of the sample of paving mixture is obtained by immersing the vacuum container with the sample in a water bath and weighing or by filling the vacuum container level full of water and weighing in air. Both the temperature and mass are measured at this time. From these mass and volume measurements, the specific gravity or density at 25°C [77 °F] is calculated.

## 5. Significance and Use

5.1 The theoretical maximum specific gravities and densities of bituminous paving mixtures are fundamental properties whose values are influenced by the composition of the mixture in terms of types and amounts of aggregates and bituminous materials.

<sup>3</sup> The last approved version of this historical standard is referenced on www.astm.org.

5.1.1 Maximum specific gravity is used (*I*) in the calculation of air voids in the compacted bituminous paving mixture, (2) in calculating the amount of bitumen absorbed by the aggregate, and (3) to provide target values for the compaction of paving mixtures.

NOTE 1—The quality of the results produced by this standard are dependent on the competence of the personnel performing the procedure and the capability, calibration, and maintenance of the equipment used. Agencies that meet the criteria of Standard Practice D3666 are generally considered capable of competent and objective testing/sampling/inspection/etc. Users of this standard are cautioned that compliance with Practice D3666 alone does not completely assure reliable results. Reliable results depend on many factors; following the suggestions of Practice D3666 or some similar acceptable guideline provides a means of evaluating and controlling some of those factors

## 6. Apparatus

### 6.1 Containers:

6.1.1 *Vacuum Bowls*—Either a metal or plastic bowl with a diameter of approximately 180 to 260 mm [7 to 10 in.] and a bowl height of at least 160 mm [6 in.] shall be equipped with a transparent cover fitted with a rubber gasket and a connection for the vacuum line. Both the bowl and cover should be sufficiently stiff to withstand the applied vacuum pressure without visibly deforming. The hose connection shall be covered with a small piece of fine wire mesh to minimize the loss of any fine material.

NOTE 2—The transparent cover allows observation of the release of air bubbles.

6.1.2 *Vacuum Flask for Weighing in Air Only*, a thick-walled volumetric glass flask with a capacity of approximately 4000 mL, fitted with a rubber stopper with a connection for the vacuum line. The hose connection in the flask should be covered with a small piece of fine wire mesh to minimize the loss of any fine material

6.2 *Balance*, capable of being read to the nearest 0.1 g and conforming to the requirements of Specification D4753, Class GP2. If underwater measurements will be taken, then the balance shall be equipped with a suitable suspension apparatus and holder to permit weighing the sample while suspended from the center of the scale.

6.3 *Vacuum Pump or Water Aspirator*, capable of evacuating air from the vacuum container to a residual pressure of 4.0 kPa [30 mm of Hg] or less.

6.3.1 When a vacuum pump is used, a suitable trap shall be installed between the vacuum vessel and vacuum source to reduce the amount of water vapor entering the vacuum pump.

6.4 *Residual Pressure Manometer or Calibrated Absolute Pressure Gage*—This manometer or calibrated absolute pressure gage shall be used to confirm the specified pressure is applied to the container and shall be capable of measuring residual pressure to 4.0 kPa [30 mm of Hg] or less. It is to be connected at the end of the vacuum line using an appropriate tube and either a “T” connector on the top of the container or by using a separate opening (from the vacuum line) in the top of the container to attach the hose. To avoid damage, the manometer or gage itself is not to be situated on top of the vessel but adjacent to it.

NOTE 3—Residual pressure in the vacuum vessel in millimeters of mercury is the difference in the height of mercury.

6.5 *Manometer or Vacuum Gage*, suitable for measuring the vacuum being applied at the source of the vacuum. This device can be connected directly to the vacuum source or be in the vacuum line close to the source.

NOTE 4—The vacuum leg of a residual pressure manometer occasionally acquires one or more air bubbles that introduce error into the residual pressure reading. The additional vacuum gage or manometer provides a means to quickly detect differences between the two vacuum measurements.

6.6 *Thermometers*—Calibrated liquid-in-glass thermometers of suitable range with subdivisions and maximum scale error of 0.5°C [1°F], conforming to the requirements of Specification E1 or any other thermometric device of equal accuracy, precision, and sensitivity shall be used.

6.7 *Water Bath*, capable of maintaining, by any means, a constant temperature of 25 ± 1°C [77 ± 2°F]. The water bath must be suitable for immersion of the suspended container with its deaerated sample.

6.8 *Bleeder Valve*, attached to the vacuum line to facilitate both the adjustment of the vacuum being applied to the vacuum vessel and the slow release of vacuum pressure.

6.9 *Mechanical Agitation Device*, capable of applying a gentle but consistent agitation of the sample. This device shall be equipped with a means of firmly anchoring the container so that it does not move on the surface of the device.

NOTE 5—If stripping of asphalt is a problem, the device can be equipped with a speed control.

6.10 *Oven*, capable of maintaining a temperature of 110 ± 5°C [230 ± 10°F]. This oven is needed when samples other than laboratory prepared mixtures using oven-dry aggregate are tested.

## 7. Sampling

7.1 Obtain the sample in accordance with Practice D979.

7.2 The size of sample shall be as follows:

Nominal Maximum Aggregate Size, mm [in.]	Minimum Sample Size, g
37.5 [1 ½] or greater	5000
19 to 25 [¾ to 1]	2500
12.5 [½] or smaller	1500

7.3 Sample sizes greater than about two thirds of the volume of the container shall be tested in portions with none of the portions tested being less than 1250 g.

## 8. Calibration of Containers

8.1 *Bowls*—Calibrate the container by accurately determining the mass of the container immersed in water at 25 ± 1°C [77 ± 2°F]. Designate this mass as *B*.

8.1.1 If the bowl is used for weighing in air, place the volumetric lid on the bowl while under water. Remove the water-filled bowl with the lid in place and dry prior to determining the combined mass of the bowl, lid, and water. Repeat three times and average the results. Designate the average mass as *D*.

8.2 *Flasks*—Calibrate the volumetric flask by accurately determining the mass of the flask filled with water at a

temperature of  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  [ $77 \pm 2^\circ\text{F}$ ]. Designate this mass as *D*. Accurate filling of the flask shall be ensured by the use of a glass cover plate or similar smooth, flat transparent plate.

## 9. Procedure

9.1 If the paving mixture has been prepared in a laboratory using oven-dry aggregates, proceed to 9.2. Any other sample needs to be dried to a constant mass (mass repeats within 0.1 % for consecutive 15 min determinations) at a temperature of  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  [ $230 \pm 10^\circ\text{F}$ ].

9.2 Once the sample is dry and while it is still warm, separate the particles of the sample of paving mixture by hand, taking care to avoid fracturing the aggregate, so that the particles of the fine aggregate portion are not larger than about 6 mm [1/4 in.]. Cool the sample to room temperature. If separated particles adhere to each other once the sample has been cooled to room temperature, gently separate the particles of the fine aggregate portion so that they are not larger than about 6 mm [1/4 in.]. Place the sample directly into the tared bowl or volumetric flask. Do not use a container within a container. Weigh the container with the sample and designate the net mass (mass of sample only) as *A*.

9.3 Add sufficient water at a temperature of approximately  $25^\circ\text{C}$  [ $77^\circ\text{F}$ ] to cover the sample completely. Place the cover (bowls) or stopper (flask) on the container.

9.4 Place the container with the sample and water on a mechanical agitation device and anchor it to the surface of the device. Start the agitation and immediately begin to remove air trapped in the sample by gradually increasing the vacuum pressure until the residual pressure manometer reads  $3.7 \pm 0.3$  kPa [ $27.5 \pm 2.5$  mm of Hg]. The vacuum should be achieved within 2 min. Once the vacuum is achieved, continue the vacuum and agitation for  $15 \pm 2$  min.

9.5 Gradually release the vacuum pressure using the bleeder valve and proceed with one of the following determinations:

9.5.1 *Weighing in Water*—Suspend the bowl (without lid) and contents in water for  $10 \pm 1$  min, then determine the mass. Measure and record the temperature of the water in the bath. Designate the mass under water of the bowl and sample as *C*.

9.5.2 *Weighing in Air (Bowl)*—Slowly submerge the bowl and sample in the  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  [ $77 \pm 2^\circ\text{F}$ ] bath, where it shall remain for  $10 \pm 1$  min. The lid shall also be placed in the water bath at the same time. Slide the lid onto the bowl without removing from the water so as to avoid entrapping any air, then firmly press the lid down on the bowl. Remove the bowl with the lid in place from the water bath. Carefully dry the bowl and lid. Determine the mass of the bowl, sample, and lid. Measure and record the temperature of the water in the bowl. Repeat this procedure a second time by removing the lid and placing both the lid and the bowl back in the water. It is not necessary to wait the 10 minutes before taking the second reading. If the mass varies by more than 1.0 g, repeat the procedure until any two mass readings are within 1.0 g. Designate the average mass of these two readings as “E; the mass of the bowl, lid, water, and sample.”

9.5.3 *Weighing in Air (Flask)*—Slowly fill the flask with water taking care not to introduce air into the sample. Place the

flask in a water bath for  $10 \pm 1$  min to stabilize the temperature without submerging the top of the flask. Measure and record the temperature of the water in the flask. Remove the thermometer and completely fill the flask using a cover plate, taking care not to entrap air beneath the cover plate. The cover plate shall be the same one used during the calibration of the flask. Wipe any moisture from the exterior of the container and cover plate. Determine the mass of the flask, plate, and its contents completely filled with water. Designate this mass as *E*.

## 10. Calculation

10.1 Calculate the maximum specific gravity of the sample as follows:

10.1.1 *Bowls Used Under Water Determination:*

$$G_{mm} = \frac{A}{A - (C - B)} \quad (1)$$

where:

- $G_{mm}$  = maximum specific gravity of the mixture,
- $A$  = mass of dry sample in air, g,
- $B$  = mass of bowl under water, g, and
- $C$  = mass of bowl and sample under water, g.

10.1.2 *Bowl in Air Determination:*

$$G_{mm} = \frac{A}{A + D - E} \quad (2)$$

where:

- $G_{mm}$  = maximum specific gravity of the mixture,
- $A$  = mass of dry sample in air, g,
- $D$  = mass of lid and bowl with water at  $25^\circ\text{C}$  [ $77^\circ\text{F}$ ], g, and
- $E$  = mass of lid, bowl, sample, and water at  $25^\circ\text{C}$  [ $77^\circ\text{F}$ ], g.

10.1.3 *Flask Determination:*

$$G_{mm} = \frac{A}{A + D - E} \quad (3)$$

where:

- $G_{mm}$  = maximum specific gravity of the mixture,
- $A$  = mass of dry sample in air, g,
- $D$  = mass of cover plate and flask filled with water at  $25^\circ\text{C}$  [ $77^\circ\text{F}$ ], g, and
- $E$  = mass of flask, cover plate, sample, and water at  $25^\circ\text{C}$  [ $77^\circ\text{F}$ ], g.

10.2 If the sample was tested in several portions, report the weighted average maximum specific gravity for all portions tested.

## 11. Supplemental Procedure for Mixtures Containing Porous Aggregate

11.1 If the pores of the aggregates are not thoroughly sealed by the bituminous film, they may become saturated with water during the vacuum procedure. To determine if this has occurred, proceed as follows after completing the procedure in accordance with 9.5.1, 9.5.2, or 9.5.3.

11.1.1 Drain the water from the container. To prevent the loss of fine particles, decant the water through a  $75 \mu\text{m}$  [No. 200] sieve.

11.1.2 Break several of the large pieces of aggregate and examine the broken surfaces for wetness. If there is any doubt as to whether the mix has absorbed water, proceed with this procedure in order to determine if this correction is needed.

11.2 If aggregate has absorbed water, spread the sample on a flat tray with a nonabsorptive surface and place in front of a fan to remove surface moisture. Break agglomerations of mixture by hand. Stir the sample intermittently in such a way that the aggregate particles are rolled over rather than simply moved horizontally on the tray. This process takes about 2 h. Take care to prevent the loss of particles of mixture.

11.3 Weigh the tray and sample at 15-min intervals. When the loss in mass is less than 0.05 % for this interval, the sample may be considered to be surface dry.

11.4 Substitute the final surface dry mass for *A* and use this value in the denominator of equations shown in Section 10.

## 12. Report

12.1 Report the following information:

12.1.1 Maximum specific gravity,  $G_{mm}$ , to the third decimal place.

12.1.2 Type of mixture.

12.1.3 Size of sample.

12.1.4 Number of samples.

12.1.5 Type of container.

12.1.6 Type of procedure.

## 13. Precision

13.1 Criteria for judging the acceptability of specific gravity test results obtained by this test method are given as follows:

Test and Type Index	Standard Deviation, 1s	Acceptable Range of Two Test Results, d2s
Test results obtained without use of Section 11: <sup>A</sup>		
Single-operator precision	0.0080	0.023
Multilaboratory precision	0.0160	0.044
Test results obtained with use of Section 11 (for Bowl Method only): <sup>B</sup>		
Single-operator precision	0.0064	0.018
Multilaboratory precision	0.0193	0.055

—

<sup>A</sup> Basis of estimate: analysis of paired test results from 165 to 337 laboratories participating in the AASHTO Materials Reference Laboratory (AMRL) Proficiency Sample Program.

<sup>B</sup> Basis of estimate: 2 replicates, 7 materials, 20 laboratories.

13.2 The figures given in Column 2 are the standard deviations that have been found to be appropriate for the conditions of the test described in Column 1. The figures given in Column 3 are the limits that should not be exceeded by the difference between the results of two properly conducted tests.

13.3 The values in Column 3 are the acceptable range for two tests. When more than two results are being evaluated, the range given in Column 3 must be increased. Multiply the standard deviation(s) in Column 2 by the multiplier given in Table 1 of Practice C670 for the number of actual tests.

$$\text{Example for three tests: } 0.0160 \times 3.3 = 0.0528 \quad (4)$$

In this example, 0.0160 is the acceptable standard deviation given in the table in Section 13.1 for multilaboratory precision, and 3.3 is the multiplier for three test results provided in Table 1 of Practice C670. Additional guidance and background is given in Practice C670.

*ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

*This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the ASTM website (www.astm.org/COPYRIGHT/).*

*Anexo 2 AASHTO T 308: Determining the Asphalt Binder Content of Hot Mix Asphalt (HMA) by the Ignition Method.*

Standard Method of Test for

**Determining the Asphalt Binder  
Content of Hot Mix Asphalt (HMA)  
by the Ignition Method**

AASHTO Designation: T 308-08



**1. SCOPE**

- 1.1. This test method covers the determination of asphalt binder content of hot mix asphalt (HMA) by ignition at temperatures that reach the flashpoint of the binder in a furnace. The means of specimen heating may be the convection method or the direct infrared (IR) irradiation method. The aggregate remaining after burning can be used for sieve analysis using T 30.
- 1.2. The values stated in SI units are to be regarded as the standard.
- 1.3. *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety concerns associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to consult and establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

**2. REFERENCED DOCUMENTS**

- 2.1. *AASHTO Standards:*
- M 231, Weighing Devices Used in the Testing of Materials
  - R 47, Reducing Samples of Hot mix Asphalt to Testing Size
  - T 2, Sampling of Aggregates
  - T 30, Mechanical Analysis of Extracted Aggregate
  - T 40, Sampling Bituminous Materials
  - T 168, Sampling Bituminous Paving Mixtures
  - T 248, Reducing Samples of Aggregate to Testing Size
  - T 329, Moisture Content of Hot mix Asphalt (HMA) by Oven Method
- 2.2. *Other Document:*
- Manufacturer's Instruction Manual

**3. SUMMARY OF TEST METHOD**

- 3.1. The asphalt binder in the HMA is ignited using the furnace equipment applicable to the particular method. This procedure covers two methods. Method A requires an ignition furnace with an internal balance. Method B requires an ignition furnace with an external balance.
- 3.2. The asphalt binder content is calculated as the difference between the initial mass of the HMA and the mass of the residual aggregate, with adjustments for an asphalt binder correction factor and the moisture content. The asphalt binder content is expressed as a mass percent of the moisture-free

mixture. This method may be affected by the type of aggregate in the mixture. Accordingly, to optimize accuracy, correction factors for asphalt binder and aggregate will be established by testing a set of correction factor specimens for each type of HMA. Correction factors must be determined before any acceptance testing is performed.

#### 4. SIGNIFICANCE AND USE

- 4.1. This method can be used for quantitative determinations of asphalt binder content and gradation in HMA and pavement specimens for quality control, specification acceptance, and mixture evaluation studies. This method does not require the use of solvents. Aggregate obtained by this test method may be used for gradation analysis according to T 30.

#### 5. APPARATUS

- 5.1. *Ignition Furnace*—A forced-air ignition furnace that heats the specimens by either the convection or direct IR irradiation method. The convection-type furnace must be capable of maintaining the temperature at 578°C (1072°F). The furnace chamber dimensions shall be adequate to accommodate a specimen size of 3500 g. The furnace door shall be equipped so that the door cannot be opened during the ignition test. A method for reducing furnace emissions shall be provided. The furnace shall be vented into a hood or to the outside and, when set up properly, shall have no noticeable odors escaping into the laboratory. The furnace shall have a fan with the capability to pull air through the furnace to expedite the test and reduce the escape of smoke into the laboratory.
- 5.1.1. For Method A, the furnace shall also have an internal balance thermally isolated from the furnace chamber and accurate to 0.1 g. The balance shall be capable of weighing a 3500-g specimen in addition to the specimen baskets. A data collection system will be included so that the mass can be automatically determined and displayed during the test. The furnace shall have a built-in computer program to calculate the change in mass of the specimen baskets and provide for the input of a correction factor for aggregate loss. The furnace shall provide a printed ticket with the initial specimen mass, specimen mass loss, temperature compensation, correction factor, corrected asphalt binder content (percent), test time, and test temperature. The furnace shall provide an audible alarm and indicator light when the specimen mass loss does not exceed 0.01 percent of the total specimen mass for three consecutive minutes. The furnace shall also allow the operator to change the ending mass loss percentage to 0.02 percent.
- 5.2. *Specimen Basket Assembly*—consisting of specimen basket(s), catch pan, and an assembly guard to secure the specimen basket(s) to the catch pan.
- 5.2.1. *Specimen basket(s)*—of appropriate size that allows the specimens to be thinly spread and allows air to flow through and around the specimen particles. Sets with two or more baskets shall be nested. The specimen shall be completely enclosed with screen mesh, perforated stainless steel plate, or other suitable material.
- Note 1**—Screen mesh or other suitable material with maximum and minimum openings of 2.36 mm (No. 8) and 0.600 mm (No. 30), respectively, has been found to perform well.
- 5.2.2. *Catch Pan*—of sufficient size to hold the specimen basket(s) so that aggregate particles and melting asphalt binder falling through the screen are caught.
- 5.3. *Oven*—Capable of maintaining 110 ± 5°C (230 ± 9°F).
- 5.4. *Balance*—of sufficient capacity and conforming to the requirements of M231, Class G 2.

- 5.5. *Safety Equipment*—safety glasses or face shield, dust mask, high temperature gloves, long sleeve jacket, a heat-resistant surface capable of withstanding 650° C (1202° F) and a protective cage capable of surrounding the specimen baskets during the cooling period.
- 5.6. *Miscellaneous Equipment*—a pan larger than the specimen basket(s) for transferring the specimen after ignition, spatulas, bowls, and wire brushes.

## 6. SAMPLING

- 6.1. Obtain samples of freshly produced HMA in accordance with T 168.
- 6.2. The specimen shall be the end result of reducing a larger sample in accordance with R 47.
- 6.3. If the mixture is not sufficiently soft to separate with a spatula or trowel, place it in a large flat pan in an oven at  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  ( $230 \pm 9^\circ\text{F}$ ) until it is workable. Do not leave the specimen in the oven for an extended period of time. Excessive heating may cause detrimental effects such as asphalt drain-down or oxidation.
- 6.4. The size of the test specimen shall be governed by the nominal-maximum aggregate size of the HMA and shall conform to the mass requirement shown in Table 1. When the mass of the specimen exceeds the capacity of the equipment used, the specimen may be divided into suitable increments, tested, and the results appropriately combined for calculation of the asphalt binder content (using a weighted average). Specimen sizes shall not be more than 500 g greater than the minimum recommended specimen mass.

**Note 2**—Large specimens of fine mixes tend to result in incomplete ignition of asphalt binder.

**Table 1**—Mass Requirements

Nominal- Maximum Aggregate Size <sup>a</sup> , mm	Sieve Size	Min Mass of Specimen, g
4.75	No. 4	1200
9.5	$\frac{3}{8}$ in.	1200
12.5	$\frac{1}{2}$ in.	1500
19.0	$\frac{3}{4}$ in.	2000
25.0	1 in.	3000
37.5	$1\frac{1}{2}$ in.	4000

<sup>a</sup> Nominal-maximum aggregate size—one size larger than the first sieve to retain more than 10 percent.

## TEST METHOD A—INTERNAL BALANCE

### 7. TEST PROCEDURES

- 7.1. *Test Initiation:*
- 7.1.1. For the convection-type furnace, preheat the ignition furnace to 538°C (1000°F) or to the temperature determined by the correction factor process in the Annex. Manually record the furnace temperature (set point) prior to the initiation of the test if the furnace does not record automatically.

- 7.1.2. For the direct IR irradiation-type furnace, use the same burn profile as used during the correction factor determination.
- 7.2. Oven dry the HMA specimen to a constant mass at a temperature of  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  ( $230 \pm 9^\circ\text{F}$ ), or determine the moisture content of a companion specimen according to T 329.
- 7.3. Enter into the ignition furnace, or manually record, the asphalt binder correction factor for the specific mix to be tested, as determined in the Annex.
- 7.4. Determine and record the mass of the specimen basket assembly to the nearest 0.1 g.
- 7.5. Prepare the specimen as described in Section 6. Place the specimen basket(s) in the catch pan. Evenly distribute the specimen in the basket(s), taking care to keep the material away from the edges of the basket. Use a spatula or trowel to level the specimen.
- 7.6. Determine and record the total mass of the specimen and specimen basket assembly at room temperature to the nearest 0.1 g. Calculate and record the initial mass of the specimen  $M_i$  (total mass minus the mass of the specimen basket assembly).
- 7.7. Input the initial mass of the specimen,  $M_i$  in whole grams into the ignition furnace controller. Verify that the correct mass has been entered.
- 7.8. Open the chamber door, and place the specimen basket assembly in the furnace, carefully positioning the specimen basket assembly so it is not in contact with the furnace walls. Close the chamber door, and verify that the specimen mass (including the basket assembly) displayed on the furnace scale equals the total mass recorded in Section 7.6 within  $\pm 5$  g. Differences greater than 5 g or failure of the furnace scale to stabilize may indicate that the specimen basket assembly is contacting the furnace wall.
- Note 3**—Due to the extreme heat of the furnace, the operator should wear safety equipment—high temperature gloves, face shield, fire-retardant shop coat—when opening the door to load or unload the specimen.
- 7.9. Initiate the test by pressing the start/stop button. This operation will lock the specimen chamber and start the combustion blower.
- Note 4**—The furnace temperature will drop below the set point when the door is opened, but will recover with the door closed and when ignition occurs. Specimen ignition typically increases the temperature well above the set point, depending on the specimen size and asphalt binder content.
- 7.10. Allow the test to continue until the stable light and audible stable indicator indicate the test is complete (the change in mass does not exceed 0.01 percent for three consecutive minutes). Press the start/stop button. This operation will unlock the specimen chamber and cause the printer to print out the test results.
- Note 5**—An ending mass loss percentage of 0.02 may be substituted when aggregate exhibits an excessive amount of loss during ignition testing. The precision and bias statement was developed using 0.01 percent. Both precision and accuracy may be adversely affected by using 0.02 percent.
- 7.11. Open the chamber door; remove the specimen basket assembly, and place it on a cooling plate or block. Place the protective cage over the specimen basket assembly, and allow it to cool to room temperature (approximately 30 min).

7.12. Determine and record the total mass of the specimen and specimen basket assembly after ignition to the nearest 0.1 g. Calculate and record the final mass of the specimen,  $M_f$  (total mass minus the mass of the specimen basket assembly).

7.13. Use the corrected asphalt binder content (percent) from the printed ticket. If this value is not corrected, subtract the asphalt binder correction factor. If a moisture content has been determined per T 329, subtract the percent moisture from the asphalt binder content on the printed ticket, and report the resultant value as the corrected asphalt binder content ( $P_b$ ).

**Note 6**—Asphalt binder content can also be calculated using Equation 1 from Method B (Section 8.16).

## TEST METHOD B—EXTERNAL BALANCE

### 8. TEST PROCEDURES

8.1. Preheat the ignition furnace to 538°C (1000°F) or the temperature determined by the correction factor process in the Annex.

8.2. Oven dry the HMA specimen to a constant mass at a temperature of  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  ( $230 \pm 9^\circ\text{F}$ ), or determine the moisture content of a companion specimen according to T 329.

8.3. Record the asphalt binder correction factor for the specific mix to be tested, as determined by the correction factor process in the Annex.

8.4. Determine and record the mass of the specimen basket assembly to the nearest 0.1 g.

8.5. Prepare the specimen as described in Section 5. Place the specimen baskets in the catch pan. Evenly distribute the specimen in the basket(s), taking care to keep the material away from the edges of the basket. Use a spatula or trowel to level the specimen.

8.6. Determine and record the total mass of the specimen basket assembly at room temperature to the nearest 0.1 g. Calculate and record the initial mass of the specimen,  $M_i$  (total mass minus the mass of the specimen basket assembly).

8.7. Open the chamber door and place the specimen basket assembly in the furnace. Burn the HMA specimen in the furnace for at least 45 min.

**Note 7**—The appropriate time for the initial burn of an HMA specimen is dependent on the specimen size. For large specimens, the time could be significantly longer than 45 min. See the manufacturer's manual for guidelines.

8.8. Open the chamber door; remove the specimen and specimen basket assembly and place it on a cooling plate or block. Place the protective cage over the specimen basket assembly, and allow it to cool to room temperature (approximately 30 min).

8.9. Determine and record the total mass of the specimen and specimen basket assembly after cooling to the nearest 0.1 g.

8.10. Place the specimen and specimen basket assembly back into the furnace.

Burn the specimen for at least 15 min after the furnace reaches the set point temperature.

Open the chamber door, remove the specimen and specimen basket assembly, and place it on a cooling plate or block. Place the protective cage over the specimen basket assembly, and allow it to cool to approximately room temperature (approximately 30 min).

8.13. Weigh and record the total mass of the specimen and specimen basket assembly after cooling to the nearest 0.1 g.

8.14. Repeat Sections 8.10 through 8.13 until the change in measured mass of the specimen after ignition does not exceed 0.01 percent of the initial specimen mass,  $M_i$ .

**Note 8**—An ending mass loss percentage of 0.02 may be substituted when aggregate that exhibits an excessive amount of loss during ignition testing. The precision and bias statement was developed using 0.01 percent. Both precision and accuracy may be adversely affected by using 0.02 percent. After the time required to obtain the specified mass loss has been established for each mixture, repeated mass determinations may not be necessary.

8.15. Calculate and record the final mass of the specimen,  $M$  (total mass minus the mass of the specimen basket assembly).

8.16. Calculate the asphalt binder content of the specimen as follows:

$$P_b, \% = \left[ \frac{(M_i - M_f)}{M_i} \times 100 \right] - C_F - MC \quad (1)$$

where:

$P_b$  = the measured (corrected) asphalt binder content, percent;

$M_i$  = the total mass of the HMA specimen prior to ignition, g;

$M_f$  = the total mass of aggregate remaining after the ignition, g;

$C_F$  = the correction factor, percent by mass of HMA specimen; and

$MC$  = the moisture content of companion HMA specimen, percent, as determined by T 329. (If the specimen was oven-dried prior to initiating the procedure,  $MC = 0$ .)

---

## 9. GRADATION

9.1. Allow the contents of the specimen baskets to cool to room temperature prior to performing the gradation analysis. Empty the contents of the baskets into a flat pan, being careful to capture all material. Use a small wire sieve brush to ensure that any residual fines are removed from the baskets and catch pan.

9.2. Perform the gradation analysis according to T 30.

---

## 10. REPORT

10.1. *The report shall include the following:*

10.1.1. Test method (A or B),

10.1.2. Corrected asphalt binder content,

- 10.1.3. Correction factor,
- 10.1.4. Temperature compensation factor (if applicable),
- 10.1.5. Total percent loss,
- 10.1.6. Specimen mass,
- 10.1.7. Moisture content (if determined, per T 329), and
- 10.1.8. Test temperature.

**Note 9**—If Method A is performed, attach the original printed ticket to the report.

## 11. PRECISION AND BIAS

- 11.1. *Precision*—Precision was determined in an NCAT round-robin study for surface mixes using Method A. Precision has not yet been determined for Method B.

**Table 2**—Precision

Asphalt Binder Content	Standard Deviation, Percent	Acceptable Range of Two Test Results, Percent
Single-Operator Precision	0.04	0.11
Multilaboratory Precision	0.06	0.17

**Note 10**—The precision estimates are based on four aggregate types, four replicates, and 12 laboratories participating with no laboratory results deleted as outlying observations. All four aggregates were tested in surface mixes and had relatively low absorption values.

- 11.2. *Bias*—The bias for Methods A and B has not been determined.

## ANNEX

(Mandatory Information)

## CORRECTION FACTORS

### A1. ASPHALT BINDER AND AGGREGATE

- A1.1 Asphalt binder content results may be affected by the type of aggregate in the mixture and the ignition furnace. Therefore, asphalt binder and aggregate correction factors must be established by testing a set of correction specimens for each job mix formula (JMF) mix design. Correction factor(s) must be determined before any acceptance testing is completed and repeated each time a change in the mix ingredients or design occurs. Any changes greater than 5 percent in stockpiled aggregate proportions should require a new correction factor.

- A1.1.1 *Asphalt binder correction factor*—Certain aggregate types may result in unusually high correction factors (greater than 1.0 percent). Such mixes should be corrected and tested at a lower

temperature as described below. Each ignition furnace will have its own unique asphalt binder correction factor determined in the location where testing will be performed.

- A1.1.2 *Aggregate correction factor*—Due to potential aggregate breakdown during the ignition process, an aggregate correction factor will be determined for each ignition furnace in the location where testing will be performed when the following conditions occur: aggregates that have a proven history of excessive breakdown or aggregates from an unknown source.

---

A2. **CORRECTION FACTOR PROCEDURE**

- A2.1 Obtain samples of aggregate in accordance with T 2.
- A2.2 Obtain samples of asphalt binder in accordance with T 40.  
**Note A1**—Include other additives that may be required by the JMF.
- A2.3 Prepare an initial, or “butter mix” at the design asphalt binder content. Mix and discard the butter mix prior to preparing any of the correction specimens to ensure an accurate asphalt binder content.
- A2.4 Prepare two correction specimens at the JMF design asphalt binder content and gradation. Aggregate used for correction specimens shall be sampled from the material designated for use in production. An additional “blank” (aggregate only) specimen shall be batched at the JMF gradation. Determine an aggregate gradation in accordance with T 30 on the “blank” specimen.
- A2.5 Place the freshly mixed specimens directly into the specimen basket assembly. If specimens are allowed to cool prior to placement in the specimen basket assembly, the specimens must be dried to constant mass at a temperature of  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  ( $230 \pm 9^\circ\text{F}$ ). Do not preheat the specimen basket assembly.
- A2.6 Test the specimens in accordance with Method A or Method B of the procedure.
- A2.7 Once both of the correction specimens have been burned, determine the asphalt binder content for each specimen by calculation or from the printed oven tickets, if available.
- A2.8 If the difference between the asphalt binder contents of the two specimens exceeds 0.15 percent, repeat Section A2.3 through A2.7 with two more specimens and, from the four results, discard the high and low result. Determine the correction factor from the two original or remaining results, as appropriate. Calculate the difference between the actual and measured asphalt binder contents for each specimen. The asphalt binder correction factor,  $C_F$ , is the average of the differences expressed as a percentage by mass of the HMA.
- A2.8.1 If the asphalt binder correction factor exceeds 1.0 percent, the test temperature should be lowered to  $482 \pm 5^\circ\text{C}$  ( $900 \pm 8^\circ\text{F}$ ) for convection type furnace. If there is no improvement in the correction factor, it is permissible to use the higher temperature.  
**Note A2**—The temperature for determining the asphalt binder content of HMA specimens by this procedure shall be the same temperature determined for the correction specimens.
- A2.8.2 For the direct IR irradiation-type furnaces, the DEFAULT burn profile should be used for most materials. The operator may select burn-profile OPTION 1 or OPTION 2 to optimize the burn cycle. Option 1 is designed for aggregate that require a large aggregate correction factor (greater than 1 percent)—typically very soft aggregate (such as dolomite). Option 2 is designed for samples that may not burn completely using the DEFAULT burn profile. The burn profile for testing HMA samples shall be the same burn profile selected for correction samples.

- A2.9 Perform a gradation analysis on the residual aggregate in accordance with T 30, if required. The results will be utilized in developing an aggregate correction factor and should be calculated and reported to the nearest 0.1 percent.
- A2.9.1 From the gradation results, subtract the percent passing for each sieve for each specimen from the percent passing each sieve of the "blank" specimen gradation results from Section A2.4.
- A2.9.2 Determine the average difference for the two values. If the difference for any single sieve exceeds the allowable difference for that sieve as listed in Table A1, then aggregate gradation correction factors (equal to the resultant average differences) for all sieves shall be applied to all acceptance gradation test results determined by T 30, prior to final rounding and reporting. If the 0.075-mm (No. 200) sieve is the only sieve outside the limits in Table A1, apply the aggregate correction factor to only the 0.075-mm (No. 200) sieve.

**Table A1—Permitted Sieving Difference**

Sieve	Allowable Difference
Sizes larger than or equal to 2.36-mm (No. 8)	± 5.0 percent
Sizes larger than 0.075-mm (No. 200) and smaller than 2.36-mm (No. 8)	± 3.0 percent
Sizes 0.075-mm (No. 200) and smaller	± 0.5 percent

*Anexo 3 ASTM D2726/D2726M – 14: Standard Test Method For  
Bulk Specific Gravity and Density Of Non-Absorptive Compacted  
Bituminous Mixtures.*



# Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D2726/D2726M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

*This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.*

## 1. Scope\*

1.1 This test method covers the determination of bulk specific gravity and density of specimens of compacted bituminous mixtures.

1.2 This test method should not be used with samples that contain open or interconnecting voids or absorb more than 2 % of water by volume, or both, as determined in 11.3.

1.3 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. The values stated in each system may not be exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in non-conformance with the standard.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

## 2. Referenced Documents

### 2.1 ASTM Standards:<sup>2</sup>

- D979 Practice for Sampling Bituminous Paving Mixtures
- D1188 Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Coated Samples
- D3203 Test Method for Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Bituminous Paving Mixtures
- D3666 Specification for Minimum Requirements for Agencies Testing and Inspecting Road and Paving Materials
- D4753 Guide for Evaluating, Selecting, and Specifying Balances and Standard Masses for Use in Soil, Rock, and

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D04 on Road and Paving Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D04.21 on Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures.

Current edition approved Aug. 1, 2014. Published August 2014. Originally approved in 1968. Last previous edition approved in 2013 as D2726/D2726M – 13. DOI: 10.1520/D2726\_D2726M-14.

<sup>2</sup> For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

## Construction Materials Testing

- D5361 Practice for Sampling Compacted Bituminous Mixtures for Laboratory Testing
- D6752 Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Automatic Vacuum Sealing Method
- D7227 Practice for Rapid Drying of Compacted Asphalt Specimens Using Vacuum Drying Apparatus
- E1 Specification for ASTM Liquid-in-Glass Thermometers
- E77 Test Method for Inspection and Verification of Thermometers
- E563 Practice for Preparation and Use of an Ice-Point Bath as a Reference Temperature
- E644 Test Methods for Testing Industrial Resistance Thermometers
- E1137 Specification for Industrial Platinum Resistance Thermometers
- E2251 Specification for Liquid-in-Glass ASTM Thermometers with Low-Hazard Precision Liquids

## 3. Terminology

### 3.1 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.1.1 *bulk density*—as determined by this test method, the mass of a metre cubed (or foot cubed) of the material at 25°C [77°F].

3.1.2 *bulk specific gravity*—as determined by this test method, the ratio of the mass of a given volume of material at 25°C [77°F] to the mass of an equal volume of water at the same temperature.

## 4. Summary of Test Method

4.1 The specimen is immersed in a water bath at 25°C [77°F]. The mass under water is recorded, and the specimen is taken out of the water, blotted quickly with a damp cloth towel, and weighed in air. The difference between the two masses is used to measure the mass of an equal volume of water at 25°C [77°F].

4.2 This test method provides guidance for determination of the oven dry or thoroughly dry mass of the specimen. The bulk specific gravity is calculated from these masses. Then the

\*A Summary of Changes section appears at the end of this standard

density is obtained by multiplying the specific gravity of the specimen by the density of the water.

## 5. Significance and Use

5.1 The results obtained from this test method can be used to determine the unit weight of compacted dense bituminous mixtures and in conjunction with Test Method **D3203**, to obtain percent air voids. These values in turn may be used in determining the relative degree of compaction.

5.2 Since specific gravity has no units, it must be converted to density in order to do calculations that require units. This conversion is made by multiplying the specific gravity at a given temperature by the density of water at the same temperature.

NOTE 1—The personnel and equipment used in performing this test can be evaluated in accordance with Practice **D3666**.

## 6. Apparatus

6.1 *Balance*, with ample capacity, and with sufficient sensitivity to enable bulk specific gravities of the specimens to be calculated to at least four significant figures, that is, to at least three decimal places. It shall be equipped with a suitable apparatus to permit weighing the specimen while suspended in water. To avoid erroneous readings by undue displacement of water, use wire or fish line of the smallest practical size to suspend the specimen and holder. Do not use chains, strings, or sash cords. The balance shall conform to Guide **D4753** as a Class GP2 balance.

NOTE 2—Since there are no more significant figures in the quotient (bulk specific gravity) than appear in either the dividend (the mass of the specimen in air) or in the divisor (the mass of the volume of water equal to the volume of the specimen, obtained from the difference in weight of the saturated surface-dry specimen in air and in water), this means that the balance must have a sensitivity capable of providing both mass values to at least four figures. For example, a sensitivity of 0.1 g [0.0002 lb] would provide four significant figures for mass in the range from 100.1 to 999.9 g [0.221 to 2.204 lb].

6.2 *Water Bath*, capable of maintaining a temperature of  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  [ $77 \pm 1.8^\circ\text{F}$ ] for immersing the specimen in water while suspended, equipped with an overflow outlet for maintaining a constant water level. The use of an overflow outlet is mandatory.

NOTE 3—The water bath does not need to be a sophisticated device. Any method that maintains  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  [ $77 \pm 1.8^\circ\text{F}$ ] can be used including tempering, aquarium heaters, stirrers, or other devices.

6.3 *Drying Oven*, capable of maintaining a temperature of  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  [ $230 \pm 9^\circ\text{F}$ ].

6.4 *Thermometer*—The thermometer shall be one of the following:

6.4.1 A liquid-in-glass partial immersion thermometer of suitable range with subdivisions and maximum scale error of  $0.5^\circ\text{C}$  [ $1.0^\circ\text{F}$ ] which conforms to the requirements of Specification **E1**. Calibrate the thermometer in accordance with one of the methods in Test Method **E77** or verify its original calibration at the ice point (**Note 4** and **Note 5**).

NOTE 4—Practice **E563** provides instructions on the preparation and use of an ice-point bath as a reference temperature.

NOTE 5—If the thermometer does not read  $0.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$  [ $32.0 \pm 1.0^\circ\text{F}$ ]

at the ice point then the thermometer should be recalibrated.

6.4.2 A liquid-in-glass partial immersion thermometer of suitable range with subdivisions and maximum scale error of  $0.5^\circ\text{C}$  [ $1.0^\circ\text{F}$ ] which conforms to the requirements of Specification **E2251**. Calibrate the thermometer in accordance with one of the methods in Test Method **E77** or verify its original calibration at the ice point (**Note 4** and **Note 5**).

6.4.3 A platinum resistance thermometer (PRT) with a probe which conforms to the requirements of Specification **E1137**. The PRT shall have a 3- or 4-wire connection configuration and the overall sheath length shall be at least 50 mm (2 in.) greater than the immersion depth. Calibrate the PRT system (probe and readout) in accordance with Test Methods **E644** or verify its original calibration at the ice point (**Note 4** and **Note 5**). Corrections shall be applied to ensure accurate measurements within  $0.5^\circ\text{C}$  [ $1.0^\circ\text{F}$ ].

6.4.4 A metal-sheathed thermistor with a sensor substantially-similar in construction to the PRT probe described in **6.4.3**. Calibrate the thermistor system (sensor and readout) in accordance with Test Methods **E644** or verify its original calibration at the ice point (**Note 4** and **Note 5**). Corrections shall be applied to ensure accurate measurements within  $0.5^\circ\text{C}$  [ $1.0^\circ\text{F}$ ].

## 7. Standardization

7.1 *Balance*, Standardize at least once each 12 months

7.2 *Temperature measuring devices*, standardize at least once every 12 months.

7.3 *Drying Oven*, standardize thermometric devices at least once every 12 months.

NOTE 6—The terms of standardization, verification, calibration, check, are defined in **D3666** Section 3.

## 8. Sampling

8.1 Specimens may be either laboratory-molded bituminous mixtures or from bituminous pavements.

8.2 Obtain field samples in accordance with Practice **D979**.

8.3 Pavement specimens shall be taken from pavements with a core drill, diamond or a carborundum saw, or by other suitable means, in accordance with Practice **D5361**.

## 9. Test Specimens

9.1 *Size of Specimens*—It is recommended (1) that the diameter of cylindrically molded or cored specimens, or the length of the sides of sawed specimens, be at least equal to four times the maximum size of the aggregate; and (2) that the thickness of specimens be at least one and one half times the maximum size of the aggregate.

9.2 Care shall be taken to avoid distortion, bending, or cracking of specimens during and after removal from pavements or mold. Specimens shall be stored in a safe, cool place.

9.3 Specimens shall be free of foreign materials such as seal coat, tack coat, foundation material, soil, paper, or foil. When any of these materials are visually evident, they shall be removed by sawing. Wire brushing to remove paper, soil, and foil is acceptable if all traces of the materials are eliminated.

9.4 If desired, specimens may be separated from other pavement layers by sawing or other satisfactory means.

## 10. Procedure

10.1 *For Cores and for Other Specimens that May Contain Moisture or Solvent*—Only specimens that are known to be thoroughly dry (that is, laboratory-prepared dried specimens), are to be tested in accordance with 10.2. All others are assumed to contain moisture or solvent and are to be tested in accordance with 10.1. The sequence of testing for 10.1 is: in water, saturated-surface dry, dry.

10.1.1 *Mass of Specimen in Water*—Completely submerge the specimen in the water bath at  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  [ $77 \pm 1.8^\circ\text{F}$ ] for 3 to 5 min then determine the mass by weighing in water. Designate this mass as *C*. If the temperature of the specimen differs from the temperature of the water bath by more than  $2^\circ\text{C}$  [ $3.6^\circ\text{F}$ ], the specimen shall be immersed in the water bath for 10 to 15 min, instead of 3 to 5 min.

10.1.2 *Mass of Saturated Surface-Dry Specimen in Air*—Surface dry the specimen by blotting quickly with a damp cloth towel and then determine the mass by weighing in air. Designate this mass as *B*.

10.1.3 After determining the mass in water and in a saturated-surface dry condition, thoroughly dry the specimen to a constant mass at  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  [ $230 \pm 9^\circ\text{F}$ ]. Allow the specimen to cool and weigh in air. Designate this mass as *A*. Other methods may be used to dry the specimen as long as a constant mass is achieved (mass repeats within 0.1 %).

NOTE 7—Drying the specimen at the required temperature of  $110^\circ\text{C}$  [ $230^\circ\text{F}$ ] will change the characteristics and shape of the specimen. This will make the specimen unsuitable for further testing. Drying the specimen at a reduced temperature such as  $52^\circ\text{C}$  [ $125^\circ\text{F}$ ], in order to keep it intact, will not meet the requirements of this test method.

10.1.3.1 Practice D7227, microwave drying or other approved methods may be used to dry the specimen if the specimen is not over-heated and documentation exists showing that the results are equivalent to oven drying. The interval of time between readings to determine constant mass must be sufficient to ensure that all moisture and solvent has been removed. This interval is dependent on the size of the specimen and can be determined by experimentation and confirmed with the oven-dried comparisons. Documentation must exist to validate the intervals.

10.2 *For Laboratory-Prepared Thoroughly Dry Specimens:*

10.2.1 *Mass of Dry Specimen in Air*—Determine the mass by weighing the specimen after it has been standing in air at room temperature for at least 1 h. Designate this mass as *A*.

10.2.2 *Mass of Specimen in Water*—Use the same procedure as described in 10.1.1.

10.2.3 *Mass of Saturated Surface-Dry Specimen in Air*—Surface dry the specimen by blotting quickly with a damp cloth towel and then determine the mass by weighing in air. Designate this mass as *B*.

## 11. Calculation

11.1 Calculate the bulk specific gravity of the specimen as follows:

$$\text{Bulk sp gr} = A/(B - C) \quad (1)$$

where:

- A* = mass of the dry specimen in air, g [lb];  
*(B – C)* = mass of the volume of water for the volume of the specimen at  $25^\circ\text{C}$  [ $77^\circ\text{F}$ ];  
*B* = mass of the saturated surface-dry specimen in air, g [lb]; and  
*C* = mass of the specimen in water, g [lb].

11.2 Calculate the density of the specimen as follows:

$$\text{Density} = \text{Bulk sp gr} \times 997.0 \text{ ( or } 62.24 \text{)} \quad (2)$$

where:

$$997.0 \text{ (} 0.997 \text{ g/cm}^3 \text{)} = \text{density of water in kg/m}^3 \text{ at } 25^\circ\text{C} \text{ [} 77^\circ\text{F} \text{]}$$

11.3 Calculate the percent water absorbed by the specimen (on volume basis) as follows:

$$\text{Percent water absorbed by volume} = \frac{B - A}{B - C} \times 100 \quad (3)$$

11.4 If the percent water absorbed by the specimen in 11.3 exceeds 2 %, use Test Method D1188 or Test Method D6752.

11.5 This test method has been written expressing density in kilograms per cubic metre. Conversion to express the density in pounds per cubic foot is acceptable.

## 12. Report

12.1 Report the following:

12.1.1 Bulk specific gravity of the mixture to the third decimal place as: bulk specific gravity at  $25^\circ\text{C}$  [ $77^\circ\text{F}$ ],

12.1.2 Density of the mixture with four significant figures in  $\text{kg/m}^3$  or  $\text{lb/ft}^3$  as: density at  $25^\circ\text{C}$  [ $77^\circ\text{F}$ ],

12.1.3 Type of mixture,

12.1.4 Size of sample, and

12.1.5 Water absorption, %.

## 13. Precision and Bias

13.1 *Precision:*

13.1.1 *Single Operator Precision*—The single operator standard deviations (1s limits) for specimens prepared in accordance with 10.2, for mixtures containing aggregate with absorption of less than 1.5 %, are shown in Table 1. The results of two properly conducted tests on the same material, by the same operator, using the same equipment, should be considered suspect if they differ by more than the d2s single operator limits shown in Table 1.

**TABLE 1 Precision Estimates<sup>A</sup>**

	1s limit	d2s limit
Single Operator Precision:		
12.5-mm nominal max agg.	0.008	0.023
19.0-mm nominal max agg.	0.013	0.037
Multilaboratory Precision:		
12.5-mm nominal max agg.	0.015	0.042
19.0-mm nominal max agg.	0.015	0.042

<sup>A</sup>Based on an interlaboratory study conducted under NCHRP Project 9-26 involving 150-mm diameter specimens with 4.5 % air voids, 26 laboratories, two materials (a 12.5-mm mixture and a 19.0-mm mixture), and three replicates.

The precision statement in 13.1 was derived from data resulting from laboratories that compacted samples sent out by the AMRL.

13.1.2 *Multilaboratory Precision*—The multilaboratory standard deviations (1s limits) for specimens prepared in accordance with 10.2, for mixtures containing aggregate with absorption of less than 1.5 %, are shown in Table 1. The results of two properly conducted tests on the same material, by different operators, using different equipment, should be considered suspect if they differ by more than 2s multilaboratory limits shown in Table 1.

13.2 *Bias*—No information can be presented on the bias of the procedure because no material having an accepted reference value is available.

#### 14. Keywords

14.1 air voids; compaction; density; specific gravity; unit weight

### SUMMARY OF CHANGES

Committee D04 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue (D2726/D2726M – 13) that may impact the use of this standard. (Approved Aug. 1, 2014.)

(1) Revised 6.4.

Committee D04 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue (D2726 – 11) that may impact the use of this standard. (Approved July 1, 2013.)

(1) Changed from single to dual units standard.

*ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

*This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, Tel: (978) 646-2600; http://www.copyright.com/*

*Anexo 4 AASHTO TP 62-03, Determining Dynamic Modulos of  
Hot Mix Asphalt (HMA).*

---

Standard Method of Test for

# Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures

---

**AASHTO Designation: TP 62-03**



**American Association of State Highway and Transportation Officials  
444 North Capitol Street N.W., Suite 249  
Washington, D.C. 20001**

---

## Standard Method of Test for

# Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures

AASHTO Designation: TP 62-03



---

## 1. SCOPE

- 1.1. This test method covers procedures for preparing and testing asphalt concrete mixtures to determine the dynamic modulus and phase angle over a range of temperatures and loading frequencies.
- 1.2. This standard is applicable to laboratory prepared specimens of mixtures with nominal maximum size aggregate less than or equal to 37.5 mm (1.48 in.).
- 1.3. *This standard may involve hazardous material, operations, and equipment. This standard does not purport to address all safety problems associated with its use. It is the responsibility of the user of this procedure to establish appropriate safety and health practices and to determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

---

## 2. REFERENCED DOCUMENTS

2.1. *AASHTO Standards:*

- R 30, Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA)
- T 67, Standard Practices for Force Verification of Testing Machines
- T 166, Bulk Specific Gravity of Compacted Asphalt Mixtures
- T 209, Maximum Specific Gravity of Bituminous Paving Mixtures
- T 269, Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Bituminous Paving Mixtures
- TP 2Sc, [Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Asphalt Mixtures Using Automatic Vacuum Sealing Method](#)
- T 312, Method for Preparing and Determining the Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor

---

## 3. DEFINITIONS

- 3.1. [dynamic modulus \( \$E^\*\$ \)](#)—the normal value of the complex modulus calculated by dividing the maximum (peak-to-peak) stress by the recoverable (peak-to-peak) axial strain for a material subjected to a sinusoidal loading.

3.2. *complex modulus* ( $E^*$ )—a complex number that defines the relationship between stress and strain for a linear viscoelastic material.

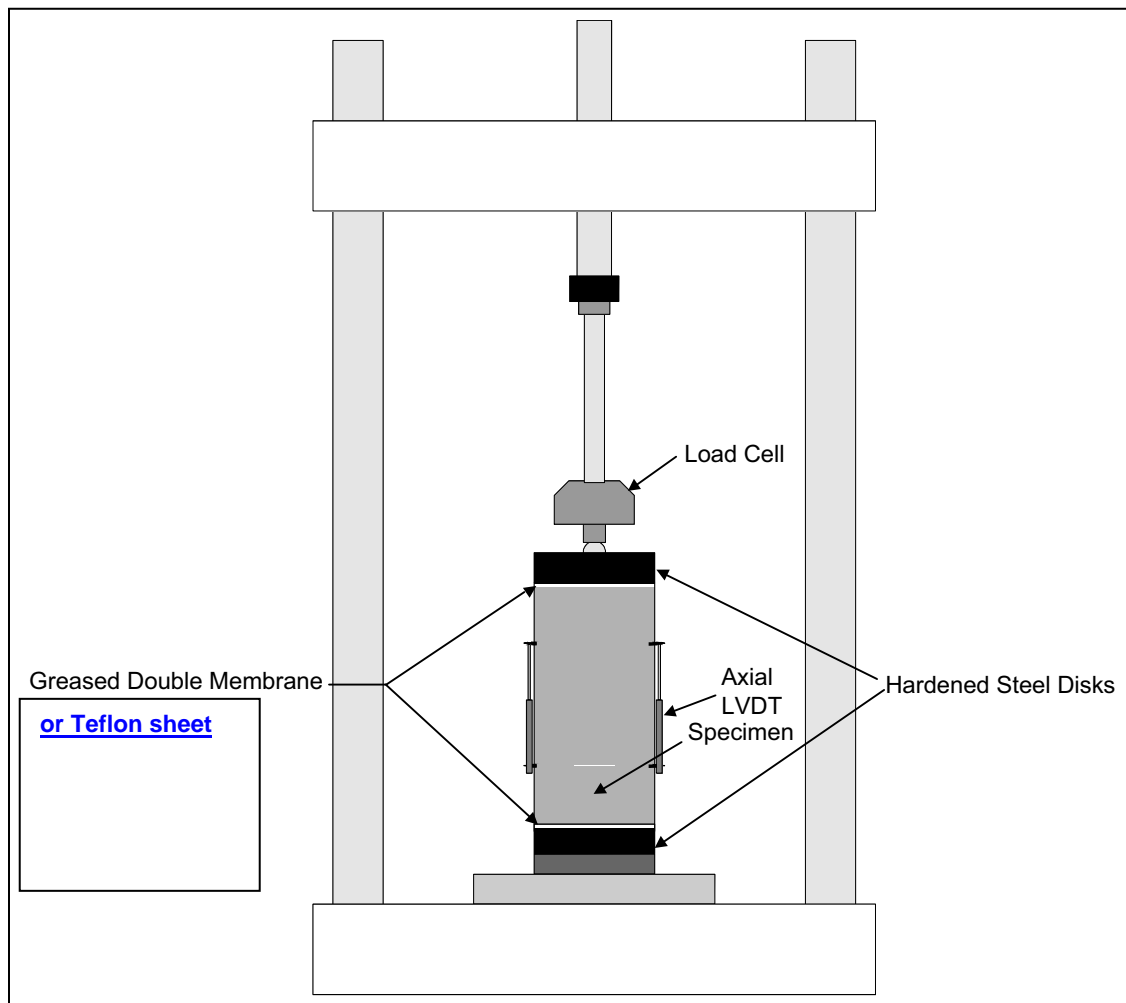
3.3. *phase angle* ( $\phi$ )— the angle in degrees between a sinusoidal applied peak stress to the resulting peak strain in a controlled-stress test.

---

#### 4. SUMMARY OF METHOD

4.1. A sinusoidal (haversine) axial compressive stress is applied to a specimen of asphalt concrete at a given temperature and loading frequency. The applied stress and the resulting recoverable axial strain response of the specimen is measured and used to calculate the dynamic modulus and phase angle.

4.2. Figure 1 presents one schematic of the dynamic modulus test.



**Figure 1**— General Schematic of Dynamic Modulus Test

5.

## USE

- 5.1. Dynamic modulus values measured over a range of temperatures and frequencies of loading can be shifted into a master curve for characterizing asphalt concrete for pavement thickness design and performance analysis.
- 5.2. The values of dynamic modulus and phase angle can also be used as performance criteria for asphalt concrete mixture design.

---

## 6. APPARATUS

- 6.1. *Dynamic Modulus Test System*—A dynamic modulus test system consisting of a testing machine, environmental chamber, and measuring system.
- 6.2. *Testing Machine*—A servo-hydraulic testing machine capable of producing a controlled haversine compressive loading. The testing machine should have a capability of applying load over a range of frequencies from 0.1 to 25 Hz and stress level up to 2800 kPa (400 psi). For sinusoidal loads, the standard error of the applied load shall be less than 5%. The standard error of the applied load is a measure of the difference between the measured load data, and the best fit sinusoid. The standard error of the load is defined in Equation 1.

$$se(P) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n - 4}} \left( \frac{100\%}{\hat{x}_o} \right) \quad (1)$$

Where:

- $se(P)$  = Standard error of the applied load
- $x_i$  = Measured load at point  $i$
- $\hat{x}_i$  = Predicted load at point  $i$  from the best fit sinusoid
- $\hat{x}_o$  = Amplitude of the best fit sinusoid
- $n$  = Total number of data points collected during test.

1. *Environmental Chamber*—A chamber for controlling the test specimen at the desired temperature. The environmental chamber shall be capable of controlling the temperature of the specimen over a temperature range from  $-10$  to  $60^\circ\text{C}$  ( $14$  to  $140^\circ\text{F}$ ) to an accuracy of  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  ( $1^\circ\text{F}$ ). The chamber shall be large enough to accommodate the test specimen and a dummy specimen with thermocouple mounted at the center for temperature verification.
- 6.2.1. *Measurement System*—The system shall be fully computer-controlled, capable of measuring and recording the time history of the applied load and the axial deformations. The system shall be capable of measuring the period of the applied sinusoidal load and

resulting deformations with a resolution of 0.5 percent. The accuracy and resolution of measurements are summarized in Table 1.

**Table 1—Accuracy and Resolution of Measurement System**

Measurement	Range	Accuracy	Resolution
Load	0.12 to 25 kN	Error ≤ 1.0 percent	≤ 0.0012 kN
Deformation	≥ 1 mm	Error ≤ 0.0025 mm	≤ 0.0002 mm
Inherent Phase Lag Between Load and Deformation	Not specified	≤ 1 degree	Not specified

6.2.1.1. *Load*—The load shall be measured with an electronic load cell in contact with one of the specimen caps. The load cell shall be calibrated in accordance with AASHTO T 67. The load measuring system shall have a minimum range of 0 to 25 kN (0 – 5600 lb) with a resolution of 1.2 N (0.24 lb).

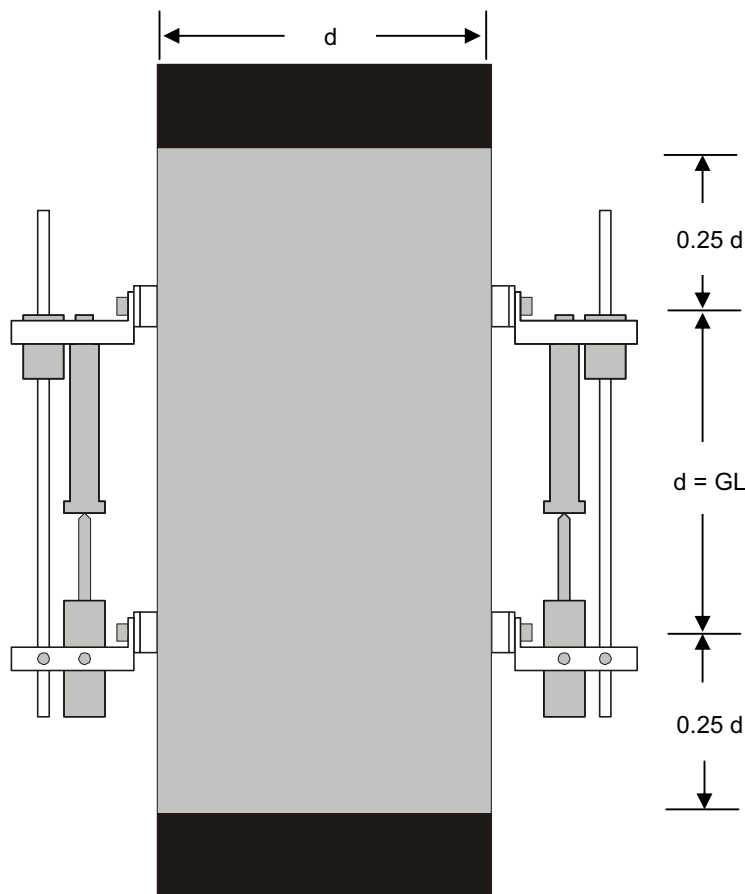
6.2.1.2. *Axial Deformations*—Axial deformations shall be measured with linear variable differential transformers (LVDT) mounted between gauge points glued to the specimen, for example as shown in Figure 2.

The deformations shall be measured at two locations 180° apart, three locations 120° apart, or four locations 90° apart. The measurement setup that calls for four locations set at 90° apart has an advantage over the other two options in that, in case one LVDT does not function properly, that LVDT and the LVDT on the opposite side can be dropped, and the remaining two LVDTs can be used to determine the average deformation.

The LVDTs shall have a range of ± 0.5 mm (0.02 in.). The deformation measuring system shall have auto zero and selectable ranges as defined in Table 2.

**Table 2—Deformation Measuring System Requirements**

Range, mm (in)	Resolution, mm (in)
±0.5 (0.01969)	0.0100 (0.00039)
±0.25 (0.00984)	0.0050 (0.00020)
±0.125 (0.00492)	0.0025 (0.00010)
±0.0625 (0.00246)	0.0010 (0.00004)



**Figure 2**—General Schematic of Gauge Points (Not to Scale)

6.2.2. *Loading Platens*—[Loading platens sized  \$104.5 \pm 0.5\$  mm](#) are required above and below the specimen to transfer the load from the testing machine to the specimen. Generally, these platens should be made of hardened or plated steel, or anodized high strength aluminum. Softer materials will require more frequent replacement. Materials that have linear elastic modulus properties and hardness properties lower than that of 6061-T6 aluminum shall not be used.

6.2.3. *End Treatment*—Friction reducing end treatments shall be placed between the specimen ends and the loading platens. The end treatments shall consist of two [Teflon sheets or two](#) 0.5 mm (0.02 in.) thick latex membranes separated with silicone grease.

6.3. *Superpave Gyratory Compactor*—A gyratory compactor and associated equipment for preparing laboratory specimens in accordance with AASHTO T 312. The compactor shall be capable of compacting 170 mm (6.7 in.) high specimen.

6.4. *Saw*—A machine for sawing test specimens ends to the appropriate length is required. The saw shall have a diamond

cutting edge and shall be capable of cutting specimens to the prescribed dimensions without excessive heating or shock.

**Note 1**—A diamond masonry saw greatly facilitates the preparation of test specimens with smooth, parallel ends. Both single or double-bladed diamond saws should have feed mechanisms and speed controls of sufficient precision to ensure compliance with paragraphs 9.5 and 9.6 of this method. Adequate blade stiffness is also important to control flexing of the blade during thin cuts.

- 6.5. *Core Drill*—A coring machine with cooling system and a diamond bit for cutting nominal 101.6 mm (4.00 in.) diameter test specimens.

**Note 2**—A coring machine with adjustable vertical feed and rotational speed is recommended. The variable feeds and speeds may be controlled by various methods. A vertical feed rate of approximately 0.05 mm/rev (0.002 in/rev) and a rotational speed of approximately 450 RPM has been found to be satisfactory for several Superpave mixtures. Use of a standard electric core drill with a holder for the specimen is also acceptable.

---

## 7. HAZARDS

- 7.1. Observe standard laboratory safety precautions when preparing and testing HMA specimens.

---

## 8. TESTING EQUIPMENT CALIBRATION

- 8.1. The signal conditioning and data acquisition device of the testing system shall be checked to ensure that there is no excess phase shift between load and displacement channels.
- 8.2. The testing system shall be calibrated prior to initial use and at least once a year thereafter or per manufacturer requirements or per every 200 tests.
- 8.3. Verify the capability of the environmental chamber to maintain the required temperature within the accuracy specified.
- 8.4. Verify the calibration of all measurement components (such as load cell and specimen deformation measurement device) of the testing system.
- 8.5. If any of the verifications yield data that does not comply with the accuracy specified, correct the problem prior to proceeding with testing.

---

## 9. TEST SPECIMENS

- 9.1. *Size*—Dynamic modulus testing shall be performed on test specimens cored from 150 mm (4 in) gyratory compacted mixtures. The average diameter of the test specimens shall be between 100 and 104 mm (3.9 and 4.1 in.) with a standard deviation of 1.0 mm (0.04 in.). The average height of the test

specimen shall be between 147.5 and 152.5 mm (5.8 and 6.0 in.).

- 9.2. *Aging*—Laboratory prepared mixtures shall be temperature-conditioned in accordance with the 4-hours short-term oven conditioning procedure in AASHTO R30. Field mixtures need not be aged prior to testing.
- 9.3. *Gyratory Specimens*—Prepare 170 mm (6.7 in.) high specimens to the required air void content in accordance with AASHTO T 312.

**Note 3**—Testing should be performed on test specimens (101.6 mm (4.0 in.) diameter) meeting specific air void tolerances. The gyratory specimen (152.4 mm (6.0 in.) diameter) air void content required to obtain a specified test specimen air void content must be determined by trial and error, achieved by using less or more mixture and compacted to the same height in the gyratory compactor. Generally, the test specimen air void content is 1.5 to 2.5 percent lower than the air void content of the gyratory specimen when the test specimen is removed from the middle as specified in this test method.

- 9.4. *Coring*—Core the nominal 101.6 mm (4.0 in.) diameter test specimens from the center of the gyratory specimens. Both the core drill and the gyratory specimen should be adequately supported to ensure that the resulting test specimen is cylindrical with sides that are smooth, parallel, and free from steps, ridges, and grooves.
- 9.5. *Diameter*—Measure the diameter of the test specimen at the mid height and third points along axes that are 90 degrees apart. Record each of the six measurements to the nearest 1 mm (0.04 in.). Calculate the average and the standard deviation of the six measurements. If the standard deviation is greater than 2.5 mm (0.1 in.) discard the specimen. For acceptable specimens, the average diameter, reported to the nearest 1 mm (0.04 in.), shall be used in all material property calculations.
- 9.6. *End Preparation*—The ends of all test specimens shall be smooth and perpendicular to the axis of the specimen. Prepare the ends of the specimen by sawing with a single or double bladed saw. The prepared specimen ends shall meet the tolerances described below. Reject test specimens not meeting these tolerances.

9.6.1. The specimen ends shall have a cut surface waviness height within a tolerance of  $\pm 0.05$  mm (0.002 in.) across any diameter. This requirement shall be checked in a minimum of three positions at approximately 120° intervals using a straight edge and feeler gauges approximately 8.1 to 12.5 mm (0.32 to 0.49 in.) wide or an optical comparator.

9.6.2. The specimen end shall not depart from perpendicular to the axis of the specimen by more than 1 degree, equivalent to 2.7 mm in 152.4 mm. This requirement shall be checked on each specimen using a machinists square and feeler gauges.

- 9.7. *Air Void Content*—Determine the air void content of the final test specimen in accordance with AASHTO T 269. Reject specimens with air voids that differ by more than 0.5 percent from the target air voids.

**Note 4**—Considerable time can be saved if the cored test specimens were treated as wet, and the weights in water and saturated surface dry were measured immediately or within a short time period after coring. The test specimens can then be left to dry overnight, the dry weight can be measured the next day, and then they can be immediately prepared for testing.

- 9.8. *Replicates*—The number of test specimens required depends on the number of axial strain measurements made per specimen and the desired accuracy of the average dynamic modulus. Minimum of three replicate specimens should be tested to obtain a desired accuracy limit (e.g., less than  $\pm 15$  percent of the true dynamic modulus).

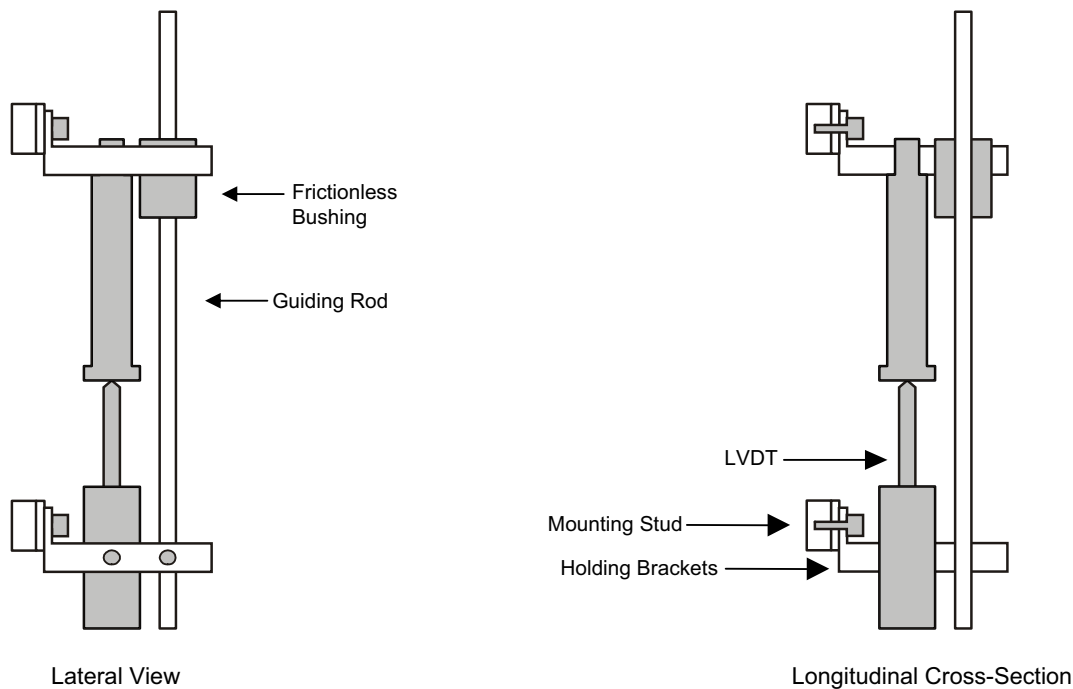
- 9.9. *Sample Storage*—If test specimens will not be tested within two days, wrap specimens in polyethylene and store in an environmentally protected storage area at temperatures between 5 and 15°C (40 and 60°F). Specimens shall not be stacked during storage.

**Note 5**—To eliminate effects of aging on test results, it is recommended that specimens be stored no more than two weeks prior to testing.

---

## 10. TEST SPECIMEN INSTRUMENTATION

- 10.1. Attach mounting studs for the axial LVDTs to the sides of the specimen with epoxy cement. Figure 3 shows details of the mounting studs and LVDT mounting hardware.



**Figure 3**—Mounting Hardware Details

**Note 6**—Quick setting epoxy such as Duro Master Mend Extra Strength Quick Set QM-50 has been found satisfactory for attaching studs.

- 10.2. The gauge length for measuring axial deformations shall be  $101.6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  ( $4.00 \text{ in} \pm 0.04 \text{ in.}$ ). Suitable alignment and spacing fixture shall be used to facilitate mounting of the axial deformation measuring hardware. The gauge length is measured between the stud centers.

## 11. PROCEDURE

- 11.1. The test series for the development of master curves for use in pavement response and performance analysis shall be conducted at  $-10, 4, 21, 37, \text{ and } 54^\circ\text{C}$  ( $14, 40, 70, 100, \text{ and } 130^\circ\text{F}$ ) and at loading frequencies of 0.1, 0.5, 1.0, 5, 10, and 25 Hz at each temperature. Each test specimen, individually instrumented with LVDT brackets, should be tested for each of the 30 combinations of temperature and frequency of loading starting with the lowest temperature and proceeding to the highest. Testing at a given temperature should begin with the highest frequency of loading and proceed to the lowest.
- 11.2. Place the test specimen in the environmental chamber and allow it to equilibrate to the specified testing temperature  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  ( $\pm 1^\circ\text{F}$ ). A monitoring specimen with a thermocouple mounted at the center shall be used to determine when the

specimen reaches the specified test temperature. Example minimum recommended equilibrium temperature times are provided as a guideline. Note that these guidelines/equilibrium times are recommended when testing 2 to 4 replicates at a time.

**Table 3— Recommended Equilibrium Times**

Specimen Temperature, °C (°F)	Time from Room Temperature, Hrs 25°C (77°F)	Time from Previous Test Temperature, Hrs
-10 (14)	Overnight	Overnight
4 (40)	Overnight	4 hours or overnight
21 (70)	1	3
38 (100)	2	2
54 (130)	3	1

- 11.3. Place one of the friction reducing end treatments on top of the hardened steel disk at the bottom of the loading frame. Place the specimen on top of the lower end treatment, and mount the axial LVDTs to the hardware previously attached to the specimen. Adjust the LVDT to near the end of its linear range to allow the full range to be available for the accumulation of compressive permanent deformation.
- 11.4. Place the upper friction reducing end treatment and hardened steel disk on top of the specimen. Center the specimen with the hydraulic load actuator visually in order to avoid eccentric loading.
- 11.5. Apply a contact load ( $P_{min}$ ) equal to 5 percent of the dynamic load that will be applied to the specimen. It is acceptable to increase the applied contact stress to 20 kPa to improve machine control effectiveness by applying a load that will maintain positive contact with the specimen but will not damage the specimen.
- 11.6. Adjust and balance the electronic measuring system as necessary.
- 11.7. Apply sinusoidal (haversine) loading ( $P_{dynamic}$ ) to the specimen in a cyclic manner. The dynamic load should be adjusted to obtain axial strains between 50 and 150 microstrain.

**Note 7**—The dynamic load depends upon the specimen stiffness and generally ranges between 15 and 2800 kPa (2 and 400 psi). Higher load is needed at colder temperatures. Table 4 presents typical dynamic stress levels based on temperature.

**Table 4—Typical Dynamic Stress Levels**

Temperature, °C (°F)	Range, kPa	Range, psi
-10 (14)	1400–2800	200–400
4 (40)	700–1400	100–200
21 (70)	350–700	50–100
37 (100)	140–250	20–50

- 11.8. Test the specimens from lowest to highest temperature; that is from  $-10^{\circ}\text{C}$  ( $14^{\circ}\text{F}$ ) to  $54.4^{\circ}\text{C}$  ( $130^{\circ}\text{F}$ ). At each temperature apply the loading from highest to lowest frequency; that is from 25 Hz to 0.1 Hz. At the beginning of testing, precondition the specimen with 200 cycles at 25 Hz at stress level corresponding to Table 4. Then load the specimen as specified in Table 5. A typical rest period between each frequency run is two minutes. This rest period shall not exceed 30 minutes for any two-frequency runs.

**Table 5**—Number of Cycles for the Test Sequence

Frequency (Hz)	Number of Cycles
25	200
10	200
5	100
1	20
0.5	15
0.1	15

- 11.9. The specimen shall be discarded at the end of any testing series at each temperature period, if the cumulative unrecovered permanent strain was found to be greater than 1500 micro units of strain, reduce the maximum loading stress level to half. Keep the test data up to this last resting period, discard the specimen, and use a new specimen for the rest of testing periods under reduced load conditions.

---

## 12. CALCULATIONS

- 12.1 This section presents a standard procedure for calculating both the dynamic modulus,  $|E^*(\omega)|$ , and the phase angle  $\theta(\omega)$ , using data from a specific loading frequency,  $\omega$ . It also defines four measures of data quality, that should be used with the limits in Section 13 to evaluate the reliability of test data.
- 12.2 The general approach used here involves the least squares fit of a sinusoid, as described by Chapra and Canale in *Numerical Methods for Engineers* (McGraw-Hill, 1985, pp. 404-407). Regression is used because it is easy for most engineers and technicians in the paving industry to understand and apply effectively. This approach is easily performed on a spreadsheet.
- 12.3 The data produced from each dynamic modulus test at frequency  $\omega_0$  are stored in the form of several arrays, one for time  $[t_i]$ , one for stress  $[\sigma_i]$ , and one for each of the  $j = 1, 2, 3, \dots, m$  strain transducers used  $[\varepsilon_j]$ . The number of  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  points in each array will be equal, and will depend upon the number of data points collected per loading cycle and on the total number of cycles for which data has been collected. It is recommended that 50 points per cycle and 5 cycles be used for a total of 250 data points.
- 12.4 *Analyze Stress Data.* The first step in the analysis is to analyze the data in the stress array. The data analysis is performed on centered stress data which is computed from the raw stress data by subtracting the average stress.

12.4.1 Determine the average stress as:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n} \quad (1)$$

Where:

$\bar{\sigma}$  = Average stress

$\sigma_i$  = Raw stress point  $i$  in the data array

$n$  = Number of points in the data array

12.4.2 Then compute the centered stresses by subtracting the average stress from each of the stress measurements:

$$\sigma'_i = \sigma_i - \bar{\sigma} \quad (2)$$

Where:

$\sigma'_i$  = Centered stress at point  $i$  in the data array

$\sigma_i$  = Raw stress point  $i$  in the data array

$\bar{\sigma}$  = Average stress

12.4.3 From the centered stress data compute three stress coefficients: offset, in-phase magnitude, and out-of-phase magnitude.

$$A_{\sigma 0} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma'_i}{n} \quad (3)$$

$$A_{\sigma 1} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \sigma'_i \cos(\omega_0 t_i) \quad (4)$$

$$B_{\sigma 1} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \sigma'_i \sin(\omega_0 t_i) \quad (5)$$

Where:

$A_{\sigma 0}$  = Stress offset coefficient, kPa (psi)

$A_{\sigma 1}$  = Stress in-phase magnitude coefficient, kPa (psi)

$B_{\sigma 1}$  = Stress out-of-phase magnitude coefficient, kPa (psi)

$\sigma'_i$  = Centered stress at point  $i$  in the data array

$\omega_0$  = Frequency of applied stress, rad/sec

$t_i$  = Time at point  $i$  in the data array, sec

12.4.4 From the stress coefficients compute the stress magnitude and the stress phase angle.

$$|\sigma^*| = \sqrt{A_{\sigma 1}^2 + B_{\sigma 1}^2} \quad (6)$$

$$\theta_{\sigma} = \arctan\left(-\frac{B_{\sigma 1}}{A_{\sigma 1}}\right) \quad (7)$$

Where:

$|\sigma^*|$  = Stress magnitude, kPa (psi)

$\theta_{\sigma}$  = Stress phase angle, degrees

$A_{\sigma 1}$  = Stress in-phase magnitude coefficient, kPa (psi)

$B_{\sigma 1}$  = Stress out-of-phase magnitude coefficient, kPa (psi)

12.4.5 Compute an array of predicted centered stresses and the standard error of the applied stress.

$$\hat{\sigma}_i' = A_{\sigma_0} + A_{\sigma_1} \cos(\omega_0 t) + B_{\sigma_1} \sin(\omega_0 t) \quad (8)$$

$$se(\sigma) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{\sigma}_i' - \sigma_i')^2}{n-4}} \left( \frac{100\%}{|\sigma^*|} \right) \quad (9)$$

Where:

$\hat{\sigma}_i'$  = Predicted centered stress at point  $i$ , kPa (psi)

$se(\sigma)$  = Standard error for the applied stress, %

$A_{\sigma_0}$  = Stress offset coefficient, kPa (psi)

$A_{\sigma_1}$  = Stress in-phase magnitude coefficient, kPa (psi)

$B_{\sigma_1}$  = Stress out-of-phase magnitude coefficient, kPa (psi)

$\sigma_i'$  = Centered stress at point  $i$  in the data array

$\omega_0$  = Frequency of applied stress, rad/sec

$t_i$  = Time at point  $i$  in the data array, sec

$|\sigma^*|$  = Stress magnitude, kPa (psi)

$n$  = number of points in data array

12.5 *Analyze Strain Data.* The second step in the analysis is to perform a similar analysis on the data from each of the strain transducers. However, in this case the data are corrected for drift caused by permanent deformation during the test, and centered data based on the average strain for the transducer.

12.5.1 To estimate the drift in the strain data, search each strain transducer array and determine local maximum and minimum values and the time when they occur for each loading cycle. Then determine the slope of the local maximum and minimum values with respect to time using linear regression. The average of these two slopes is the rate of drift  $D_j$  for strain transducer  $j$ .

12.5.2 Determine the average strain for each strain transducer as:

$$\bar{\varepsilon}_j = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_{ji}}{n} \quad (10)$$

Where:

$\bar{\varepsilon}_j$  = Average strain for transducer  $j$

$\varepsilon_{ji}$  = Raw strain for transducer  $j$  at point  $i$  in data array

$n$  = Number of points in the data array

12.5.3 The strain data for each transducer are then corrected and centered by subtracting from the measured strains the rate of drift times the loading time and also subtracting the average strain for that transducer:

$$\varepsilon_{ji}' = \varepsilon_{ji} - D_j t_i - \bar{\varepsilon}_j \quad (11)$$

Where:

$\varepsilon_{ji}'$  = Corrected and centered strain for transducer  $j$  at point  $i$  in data array

$\varepsilon_{ji}$  = Raw strain for transducer  $j$  at point  $i$  in data array

$t_i$  = Time for point  $i$  in data array

$\bar{\varepsilon}_j$  = Average strain for transducer  $j$   
 $D_j$  = Rate of Drift for transducer  $j$

- 12.5.4 From the corrected and centered strain data for each strain transducer compute three strain coefficients: offset, in-phase magnitude, and out-of-phase magnitude.

$$A_{ej0} = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_{ji}'}{n} \quad (12)$$

$$A_{ej1} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ji}' \cos(\omega_0 t_i) \quad (13)$$

$$B_{ej1} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ji}' \sin(\omega_0 t_i) \quad (14)$$

Where:

$A_{ej0}$  = Offset coefficient for strain transducer  $j$   
 $A_{ej1}$  = In-phase magnitude coefficient for strain transducer  $j$   
 $B_{ej1}$  = Out-of-phase magnitude coefficient for strain transducer  $j$   
 $\varepsilon_{ji}'$  = Corrected and centered strain for transducer  $j$  at point  $i$  in data array  
 $t_i$  = Time for point  $i$  in data array, sec  
 $\omega_0$  = Frequency of applied stress, rad/sec

- 12.5.5 From the strain coefficients compute the strain magnitude and the strain phase angle for each transducer.

$$|\varepsilon_j^*| = \sqrt{A_{ej1}^2 + B_{ej1}^2} \quad (15)$$

$$\theta_{ej} = \arctan\left(-\frac{B_{ej1}}{A_{ej1}}\right) \quad (16)$$

Where:

$|\varepsilon_j^*|$  = Strain magnitude for strain transducer  $j$   
 $\theta_{ej}$  = Phase angle for strain transducer  $j$ , degrees  
 $A_{ej1}$  = In-phase magnitude coefficient for strain transducer  $j$   
 $B_{ej1}$  = Out-of-phase magnitude coefficient for strain transducer  $j$

- 12.5.6 For each strain transducer, compute an array of predicted corrected and centered strains and the standard error of the strain data.

$$\hat{\varepsilon}_{ji}' = A_{ej0} + A_{ej1} \cos(\omega_0 t) + B_{ej1} \sin(\omega_0 t) \quad (17)$$

$$se(\varepsilon_j) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{\varepsilon}_{ji}' - \varepsilon_{ji}')^2}{n-4}} \left( \frac{100\%}{|\varepsilon_j^*|} \right) \quad (18)$$

Where:

$\hat{\varepsilon}_{ji}'$  = Predicted corrected and centered strain for strain transducer  $j$  at point  $i$

$se(\epsilon_j)$  = Standard error for strain transducer  $j$  response, %  
 $A_{\epsilon j 0}$  = Offset coefficient for strain transducer  $j$   
 $A_{\epsilon j 1}$  = In-phase magnitude coefficient for strain transducer  $j$   
 $B_{\epsilon j 1}$  = Out-of-phase magnitude coefficient for strain transducer  $j$   
 $\epsilon_{ji}'$  = Corrected and centered strain for transducer  $j$  at point  $i$  in data array  
 $t_i$  = Time for point  $i$  in data array, sec  
 $\omega_o$  = Frequency of applied stress, rad/sec  
 $|\epsilon_j^*|$  = Strain magnitude for strain transducer  $j$   
 $n$  = number of points in data array

12.5.7 Then, the average phase angle, strain magnitude, and standard error are calculated for all  $m$  strain transducers, along with two uniformity coefficients representing the variation among the strain transducers:

$$\overline{\theta}_{\epsilon} = \frac{\sum_{j=1}^m \theta_{\epsilon j}}{m} \quad (19)$$

$$\overline{|\epsilon^*|} = \frac{\sum_{j=1}^m |\epsilon_j^*|}{m} \quad (20)$$

$$se(\epsilon) = \frac{\sum_{j=1}^m se(\epsilon_j)}{m} \quad (21)$$

$$U_{\epsilon} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (|\epsilon_j^*| - \overline{|\epsilon^*|})^2}{m-1}} \left( \frac{100\%}{\overline{|\epsilon^*|}} \right) \quad (22)$$

$$U_{\theta} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (\theta_{\epsilon j} - \overline{\theta}_{\epsilon})^2}{m-1}} \quad (23)$$

Where:

$\overline{\theta}_{\epsilon}$  = Average phase angle for all strain transducers, degrees

$\overline{|\epsilon^*|}$  = Average strain magnitude

$se(\epsilon)$  = Average standard error for all strain transducers, %

$U_{\epsilon}$  = Uniformity coefficient for strain transducers, %

$U_{\theta}$  = Uniformity coefficient for phase, degrees

$m$  = number of strain transducers

12.6 *Compute Phase Angle and Dynamic Modulus.* The final step in the data analysis is to calculate the overall phase angle  $\theta(\omega)$ , in degrees, and the complex modulus  $|E^*(\omega)|$ , kPa (psi), at the selected frequency  $\omega$ :

$$\theta(\omega) = \overline{\theta}_{\epsilon} - \theta_{\sigma} \quad (24)$$

$$|E^*(\omega)| = \frac{|\sigma^*|}{|\varepsilon^*|} \quad (25)$$

Where:

$\theta(\omega)$  = Phase angle between applied stress and strain for frequency  $\omega$ , degrees

$|E^*(\omega)|$  = Dynamic modulus for frequency  $\omega$ , kPa (psi)

$\bar{\theta}_\varepsilon$  = Average phase angle for all strain transducers, degrees

$\theta_\sigma$  = Stress phase angle, degrees

$|\sigma^*|$  = Stress magnitude, kPa (psi)

$|\varepsilon^*|$  = Average strain magnitude

---

### 13. DATA QUALITY

**13.1** In addition to the dynamic modulus and phase angle, a product of the data analysis described in Section 12 is four data quality indicators: standard error of the applied stress, average standard error for the strain measurements, uniformity coefficient for the strain measurements, and uniformity coefficient for the phase angle measurements.

**13.2** These data quality indicators can be used to assess the reliability of the data. Table 6 presents recommended limits for the data quality indicators.

**Table 6. Recommended Limits for Data Quality Indicators.**

Indicator	Symbol	Equation	Limit
Standard error of the applied stress	$se(\sigma)$	9	$\leq 10 \%$
Average standard error of the measured strains	$se(\varepsilon)$	21	$\leq 10 \%$
Uniformity coefficient for the strain measurements	$U_\varepsilon$	22	$\leq 20 \%$
Uniformity coefficient for the phase angle measurements	$U_\theta$	23	$\leq 3$ degrees

**Note 8** - Recommended limits based on research completed in NCHRP Project 9-29. May be revised in the future.

---

### 14. REPORT

14.1 Report the following for each specimen at each combination of temperature and frequency tested:

14.1.1 Test temperature

14.1.2 Test frequency

14.1.3 Dynamic modulus (From Equation 25)

14.1.4 Average phase angle between applied stress and measured strain (From Equation 24)

- 14.1.5 Average strain magnitude (From Equation 20)
- 14.1.6 Stress magnitude (From Equation 6)
- 14.1.7 Standard error of the applied stress (From Equation 9)
- 14.1.8 Average standard error of the measured strains (From Equation 21)
- 14.1.9 Uniformity coefficient for the strain measurements (From Equation 22)
- 14.1.10 Uniformity coefficient for the phase angle measurements (From Equation 23)

## **APPENDIX A TEST SPECIMEN UNIFORMITY (NON-MANDATORY INFORMATION)**

### **A1. PURPOSE**

A1.1 This Appendix presents a procedure for assessing the uniformity of the air void content in test specimens produced for dynamic modulus testing.

A1.2 The approach tests the significance of the difference in mean bulk specific gravity between the top and bottom third of the specimen relative the middle third.

A1.3 The procedure can be used to determine the height for preparing gyratory specimens with a specific compactor to minimize within sample variations in air voids.

### **A2. SUMMARY**

A2.1 Three test specimens are prepared as described in Section 9 from gyratory specimens produced with the same mixture mass and compacted to the same height.

A2.2 The test specimens are cut into three slices of equal thickness and the bulk specific gravity of each slice is determined.

A2.3 A statistical hypothesis test is conducted to determine the significance of differences in the mean bulk specific gravity of the top and bottom slices relative to the middle.

### **A3. PROCEDURE**

A3.1 Prepare three test specimens following Section 9 to a target air void content of 5.5 percent. All three specimens shall have air void contents with the range of 5.0 to 6.0 percent.

A3.2 Label the top, middle, and bottom third of each specimen, then saw the specimens at the third points.

A3.3 Determine the bulk specific gravity of each of the nine test section slices in accordance with AASHTO T 166 for dense- and gap-graded mixtures or AASHTO T 269 for open-graded mixtures.

A3.4 Assemble a summary table of the bulk specific gravity data where each column contains data for a specific slice, and each row contains the data from a specific core.

A3.5 For each column, compute the mean and variance of the bulk specific gravity measurements using Equations A1 and A2.

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^3 y_i}{3} \quad (\text{A1})$$

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^3 (y_i - \bar{y})^2}{2} \quad (\text{A2})$$

where:

$\bar{y}$  = slice mean

$s^2$  = slice variance

$y_i$  = measured values

A3.6 Statistical Comparison of Means- Compare the mean bulk specific gravity of the top and bottom slices to the middle slice using the hypothesis tests described below. In the descriptions below, subscripts “t”, “m”, and “b” refer to the top, middle, and bottom slices, respectively.

A3.6.1 Check the top relative to the middle.

Null Hypothesis:

Mean bulk specific gravity of the top slice equals the mean bulk specific gravity of the middle slice,  $\mu_t^2 = \mu_m^2$

Alternative Hypothesis:

Mean bulk specific gravity of the top slice is not equal the mean bulk specific gravity of the middle slice,

$\mu_t^2 \neq \mu_m^2$

Test Statistic:

$$t = \frac{(\bar{y}_t - \bar{y}_m)}{0.8165(s)} \quad (\text{A3})$$

where:

$$s = \sqrt{\frac{s_t^2 + s_m^2}{2}} \quad (\text{A4})$$

$\bar{y}_t$  = computed mean for the top slices

$\bar{y}_m$  = computed mean for the middle slices

$s_t^2$  = computed variance for the top slices

$s_m^2$  = computed variance for the middle slices

Region of Rejection:

For the sample sizes specified, the absolute value of the test statistic must be less than 2.78 to conclude that bulk specific gravity of the top and middle slices are equal.

A3.6.2 Check the bottom relative to the middle.

Null Hypothesis:

Mean bulk specific gravity of the bottom slice equals the mean bulk specific gravity of the middle slice,

$$\mu_b^2 = \mu_m^2$$

Alternative Hypothesis:

Mean bulk specific gravity of the bottom slice is not equal the mean bulk specific gravity of the middle slice,

$$\mu_b^2 \neq \mu_m^2$$

Test Statistic:

$$t = \frac{(\bar{y}_b - \bar{y}_m)}{0.8165(s)} \quad (A5)$$

where:

$$s = \sqrt{\frac{s_b^2 + s_m^2}{2}} \quad (A6)$$

$\bar{y}_b$  = computed mean for the bottom slices

$\bar{y}_m$  = computed mean for the middle slices

$s_b^2$  = computed variance for the bottom slices

$s_m^2$  = computed variance for the middle slices

Region of Rejection:

For the sample sizes specified, the absolute value of the test statistic must be less than 2.78 to conclude that bulk specific gravity of the bottom and middle slices are equal.

#### A4. ANALYSIS

A4.1 Significant differences in the bulk specific gravity of the top and bottom slices relative to the middle indicate a systematic variation in density within the specimen.

A4.2 Specimens with differences for the top and/or bottom slices relative to the middle slices on the order of 0.025 have performed satisfactorily in the dynamic modulus tests.

A4.3 Changing the height of the gyratory specimen can improve the uniformity of the density in the test specimen.



*Anexo 5 Programa para el cálculo del módulo dinámico*

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	TEMPERATURA (C)	FRECUENCIA (hz)	MODULO DINAMICO (Mpa)	Log(f)	Log [a(T)]	Log (f)/red	Log E* medido	Log E* predicho	Errores Cuadrados	E* predicho	f(red)	T(s)	logT
2	-10	25	28497.10	1.3979	4.76961473	6.16755	4.4548	4.4768	0.000485772	29980.640	1470803.78	6.799E-07	-6.16755474
3		10	29946.50	1.0000		5.76961	4.4763	4.4627	0.00018513	29022.835	588321.513	1.6998E-06	-5.76961473
4		5	27941.50	0.6990		5.46858	4.4462	4.4505	1.8275E-05	28217.897	294160.756	3.3995E-06	-5.46858473
5		1	24847.30	0.0000		4.76961	4.3953	4.4161	0.000433607	26067.683	58832.1513	1.6998E-05	-4.76961473
6		0.5	23275.80	-0.3010		4.46858	4.3669	4.3983	0.000983142	25018.410	29416.0756	3.3995E-05	-4.46858473
7		0.1	21263.20	-1.0000		3.76961	4.3276	4.3485	0.000433602	22307.542	5883.21513	0.00016998	-3.76961473
8	4	25	22033.40	1.3979	2.4697054	3.86765	4.3431	4.3562	0.000172328	22709.569	7373.02	0.00013563	-3.86764541
9		10	24164.90	1.0000		3.46971	4.3832	4.3230	0.003621649	21038.020	2949.208	0.00033907	-3.4697054
10		5	21945.20	0.6990		3.16868	4.3413	4.2947	0.002175296	19710.583	1474.604	0.00067815	-3.16867541
11		1	18340.90	0.0000		2.46971	4.2634	4.2171	0.002141907	16486.934	294.9208	0.00339074	-2.4697054
12		0.5	16298.70	-0.3010		2.16868	4.2122	4.1782	0.001154896	15071.941	147.4604	0.00678148	-2.16867541
13	0.1	12970.20	-1.0000	1.46971	4.1129	4.0736	0.001550073	11846.109	29.49208	0.03390741	-1.4697054		
14	21	25	10261.50	1.3979	0	1.39794	4.0112	4.0617	0.00254701	11526.004	25	0.04	-1.39794001
15		10	9064.80	1.0000		1	3.9574	3.9917	0.001180551	9811.093	10	0.1	-1
16		5	7761.00	0.6990		0.69897	3.8899	3.9343	0.00197059	8596.249	5	0.2	-0.69897
17		1	5546.90	0.0000		0	3.7441	3.7867	0.001817127	6118.967	1	1	0
18		0.5	4732.30	-0.3010		-0.301	3.6751	3.7174	0.001792437	5216.863	0.5	2	0.30103
19	0.1	3332.20	-1.0000	-1	3.5227	3.5458	0.000532638	3514.067	0.1	10	1		
20	37	25	4678.40	1.3979	-2.0543366	-0.6564	3.6701	3.6318	0.00146382	4283.881	0.22059896	4.53311304	0.65639655
21		10	3709.50	1.0000		-1.0543	3.5693	3.5320	0.001395537	3403.757	0.08823958	11.3327826	1.05433656
22		5	3029.50	0.6990		-1.3554	3.4814	3.4542	0.000735856	2846.062	0.04411979	22.6655652	1.35536655
23		1	1953.50	0.0000		-2.0543	3.2908	3.2701	0.000428633	1862.559	0.00882396	113.327826	2.05433656
24		0.5	1594.30	-0.3010		-2.3554	3.2026	3.1907	0.000140553	1551.367	0.00441198	226.655652	2.35536655
25	0.1	1060.90	-1.0000	-3.0543	3.0257	3.0107	0.000225422	1024.850	0.0008824	1133.27826	3.05433656		
26	54	25	1306.40	1.3979	-3.9977662	-2.5998	3.1161	3.1268	0.000115796	1339.174	0.00251289	397.947914	2.59982623
27		10	1057.50	1.0000		-2.9978	3.0243	3.0249	3.6786E-07	1058.978	0.00100516	994.869785	2.99776624
28		5	845.30	0.6990		-3.2988	2.9270	2.9501	0.000533569	891.477	0.00050258	1989.73957	3.29879624
29		1	573.70	0.0000		-3.9978	2.7587	2.7871	0.000805981	612.456	0.00010052	9948.69785	3.99776624
30		0.5	564.90	-0.3010		-4.2988	2.7520	2.7223	0.000881028	527.581	5.0258E-05	19897.3957	4.29879624
31	0.1	379.00	-1.0000	-4.9978	2.5786	2.5861	5.61855E-05	385.598	1.0052E-05	99486.9785	4.99776624		
32						Sumatoria de los errores cuadrados		0.029978776					

Parámetros de Solver

Establecer objetivo:

Para:  Máx  Mín  Valor de:

Cambiando las celdas de variables:

Sujeto a las restricciones:

\$F\$2:\$F\$31 >= -8  
 \$F\$2:\$F\$31 <= 8  
 \$O\$3 <= 125.158  
 \$O\$3 >= 33  
 \$O\$4 <= 9999.919  
 \$O\$4 >= 268

Convertir variables sin restricciones en no negativas

Método de resolución:

Método de resolución

Seleccione el motor GRG Nonlinear para problemas de Solver no lineales suavizados. Seleccione el motor LP Simplex para problemas de Solver lineales, y seleccione el motor Evolutionary para problemas de Solver no suavizados.

C1	36.464	Rangos de	-8
C2	268.000	log(f)red	8
Tr	21		
Diámetro (mm)	100.6	Log [a(T)]	I
		4.76961473	-10
$\sigma$	2.039	2.4697054	4
$\beta$	-0.819	0	21
$\alpha$	2.518	-2.0543366	37
$\gamma$	0.420	-3.9977662	54

*Anexo 6 Resultado de los ensayos de caracterización de la  
mezcla 1*

## ÁREA DE PAVIMENTOS INFORME DE ENSAYO

### DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE LIGANTE ASFÁLTICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE POR EL MÉTODO DE IGNICIÓN

NORMA: AASHTO T308-08		ORDEN:		HOJA	1 de 3
CLIENTE:				SOLICITA:	
PROYECTO:				FISCALIZA:	
UBICACIÓN:	Av. Simón Bolívar			CONSTRUYE:	
PROVINCIA:	Pichincha	CANTÓN:	Quito	EMISIÓN:	
ID MUESTRA					
MEZCLA:				FECHA ELAB	22/9/2015
ORIGEN MUESTRA:					
MÉTODO:		MUESTREO :		POR:	
CONDICIÓN MUESTRA:					
RECEPCIÓN:		POR:		ENSAYO:	
MÉTODO DE ENSAYO:	A	TIPO DE HORNO:		IRRADIACIÓN IR	
¿SE DETERMINÓ CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA?		NO	MASA CTE.	SI	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	Si fue determinado por AASHTO T 329				
¿SE DETERMINÓ CORRECCIÓN DE LIGANTE ASFÁLTICO?		NO	C <sub>F</sub>		
<b>Mb</b>	3388.95	Masa del conjunto bandeja (balanza externa) [g]			
<b>Mti</b>	4460.06	Masa total inicial (balanza externa) [g]			
<b>Mi</b>	1071.11	Masa de muestra inicial (Mti-Mb) [g]			
<b>Mth</b>	4462.6	Masa total (balanza horno) [g] (Aplica en Método A)			
<b>ΔM</b>	2.54	Comprobar si esta dentro de ± 5 g (Aplica en Método A)			
<b>Mtf</b>	4385.47	Masa total final (balanza externa) [g]			
<b>Mf</b>	996.52	Masa de muestra inicial (Mtf-Mb) [g]			
<b>Pb</b>	6.87	Porcentaje de pérdida (valor del ticket) [%] (Aplica en Método A)			
<b>¿CORRECCIÓN INCLUIDA EN EL TICKET?</b>		NO	(Aplica en Método A)		
<b>Pb c</b>		Contenido de ligante corregido [%]			
<b>T</b>		Temperatura de ensayo [°C]			
<b>COMENTARIOS SOBRE EL ENSAYO:</b>					
Se trabaja con material disgregado a partir de mezcla asfáltica compactada					

## ÁREA DE PAVIMENTOS

NORMA: AASHTO T308-08		ORDEN:		HOJA	2 de 3
CLIENTE:				SOLICITA:	
PROYECTO:				FISCALIZA:	
UBICACIÓN:	Av. Simón Bolívar			CONSTRUYE:	
PROVINCIA:	Pichincha	CANTÓN:	Quito	EMISIÓN:	
ID MUESTRA:					
MEZCLA:				FECHA ELABORACIÓN:	22/9/2015
ORIGEN MUESTRA:					
MÉTODO:		MUESTREO:		POR:	
CONDICIÓN MUESTRA:					
RECEPCIÓN:		POR:		ENSAYO:	
MÉTODO DE ENSAYO:	A	TIPO DE HORNO:		IRRADIACIÓN IR	
¿SE DETERMINÓ CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA?		NO	MASA CTE.	SI	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	Si fue determinado por AASHTO T 329				
¿SE DETERMINÓ CORRECCIÓN DE LIGANTE ASFÁLTICO?		NO	Cf		
<b>Mb</b>	3380.27	Masa del conjunto bandeja (balanza externa) [g]			
<b>Mti</b>	4549.72	Masa total inicial (balanza externa) [g]			
<b>Mi</b>	1169.45	Masa de muestra inicial (Mti-Mb) [g]			
<b>Mth</b>	4552	Masa total (balanza horno) [g] (Aplica en Método A)			
<b>ΔM</b>	2.28	Comprobar si esta dentro de ± 5 g (Aplica en Método A)			
<b>Mtf</b>	4469.07	Masa total final (balanza externa) [g]			
<b>Mf</b>	1088.8	Masa de muestra final (Mtf-Mb) [g]			
<b>Pb</b>	6.99	Porcentaje de pérdida (valor del ticket) [%] (Aplica en Método A)			
¿CORRECCIÓN INCLUIDA EN EL TICKET?		NO	(Aplica en Método A)		
<b>Pb c</b>		Contenido de ligante corregido [%]			
<b>T</b>		Temperatura de ensayo [°C]			
<b>COMENTARIOS SOBRE EL ENSAYO:</b>					
Se trabaja con material disgregado a partir de mezcla asfáltica compactada					

## ÁREA DE PAVIMENTOS

NORMA: AASHTO T308-08		ORDEN:		HOJA	3 de 3
CLIENTE:				SOLICITA:	
PROYECTO:				FISCALIZA:	
UBICACIÓN:	Av. Simón Bolívar			CONSTRUYE:	
PROVINCIA:	Pichincha	CANTÓN:	Quito	EMISIÓN:	
ID MUESTRA:					
MEZCLA:				FECHA ELABORACIÓN:	22/9/2015
ORIGEN MUESTRA:					
MÉTODO:		MUESTREO:		POR:	
CONDICIÓN MUESTRA:					
RECEPCIÓN:		POR:		ENSAYO:	
MÉTODO DE ENSAYO:	A	TIPO DE HORNO:		IRRADIACIÓN IR	
¿SE DETERMINÓ CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA?		NO	MASA CTE.	SI	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	Si fue determinado por AASHTO T 329				
¿SE DETERMINÓ CORRECCIÓN DE LIGANTE ASFÁLTICO?		NO	Cf		
<b>Mb</b>	3390.99	<i>Masa del conjunto bandeja (balanza externa) [g]</i>			
<b>Mti</b>	4536.23	<i>Masa total inicial (balanza externa) [g]</i>			
<b>Mi</b>	1145.24	<i>Masa de muestra inicial (Mti-Mb) [g]</i>			
<b>Mth</b>	4538.2	<i>Masa total (balanza horno) [g] (Aplica en Método A)</i>			
<b>ΔM</b>	1.97	<i>Comprobar si esta dentro de ± 5 g (Aplica en Método A)</i>			
<b>Mtf</b>	4459.6	<i>Masa total final (balanza externa) [g]</i>			
<b>Mf</b>	1068.61	<i>Masa de muestra inicial (Mtf-Mb) [g]</i>			
<b>Pb</b>	6.77	<i>Porcentaje de pérdida (valor del ticket) [%] (Aplica en Método A)</i>			
¿CORRECCIÓN INCLUIDA EN EL TICKET?		NO	(Aplica en Método A)		
<b>Pb c</b>		Contenido de ligante corregido [%]			
<b>T</b>		Temperatura de ensayo [°C]			
<b>COMENTARIOS SOBRE EL ENSAYO:</b>					
Se trabaja con material disgregado a partir de mezcla asfáltica compactada					





**ÁREA DE PAVIMENTOS**  
**GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD**  
**DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE**

<b>NORMA:</b> AASHTO T 209-08		<b>ORDEN:</b>		<b>HOJA:</b>	1 de 3
<b>CLIENTE:</b>		<b>SOLICITA:</b>			
<b>PROYECTO:</b>		<b>FISCALIZA:</b>			
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. Simon Bolivar		<b>CONSTRUYE:</b>		
<b>PROVINCIA:</b>	Pichincha	<b>CANTÓN:</b>	Quito	<b>EMISIÓN:</b>	
<b>ID MUESTRA:</b>					
<b>MEZCLA:</b>		<b>FECHA ELAB:</b>	21-Sept-15		
<b>ORIGEN MUESTRA:</b>					
<b>MÉTODO:</b>	N/D	<b>MUESTREO:</b>	N/D	<b>POR:</b>	
<b>CONDICIÓN MUESTRA:</b>	Muestreo realizado en la Planta				
<b>RECEPCIÓN:</b>		<b>POR:</b>		<b>ENSAYO:</b>	
<b>TIPO DE CONTENEDOR:</b>	METÁLICO		<b>PROCEDIMIENTO:</b>	DETERMINACIÓN DE MASA EN AIRE	
	M	1	Número de muestra		
	TM	3	Número total de muestras		
	A	2,215.50	Masa de la Muestra [g]		
	D	7,411.40	Masa del contenedor lleno de agua a 25 ± 0.5 °C [g]		
	E	8,653.60	Masa del contenedor lleno con la muestra y agua a 25 ± 0.5 °C [g]		
	PS	No	Se utilizó el procedimiento suplementario para determinar A?		
<b>PROCEDIMIENTO SUPLEMENTARIO (Si Aplica)</b>					
	B	-	Masa de la bandeja [g]		
	MI	-	Masa inicial del conjunto abndaja y muestra húmeda [g]		
	CICLO	Masa [g]	Δ [%]		
	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
	7				
	8				
	A'		Masa inicial del conjunto abndaja y muestra húmeda [g]		
	Gmm	2.276	Gravedad Especifica Máxima Teorica		
<b>COMENTARIOS SOBRE EL ENSAYO</b>					

**ÁREA DE PAVIMENTOS**  
**GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD**  
**DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE**

<b>NORMA:</b> AASHTO T 209-08		<b>ORDEN:</b>		<b>HOJA:</b>	2 de 3
<b>CLIENTE:</b>				<b>SOLICITA:</b>	
<b>PROYECTO:</b>				<b>FISCALIZA:</b>	
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. Simon Bolivar			<b>CONSTRUYE:</b>	
<b>PROVINCIA:</b>	Pichincha	<b>CANTÓN:</b>	Quito	<b>EMISIÓN:</b>	
<b>ID MUESTRA:</b>					
<b>MEZCLA:</b>				<b>FECHA ELAB:</b>	21-Sept-15
<b>ORIGEN MUESTRA:</b>					
<b>MÉTODO:</b>	N/D	<b>MUESTREO:</b>	N/D	<b>POR:</b>	
<b>CONDICIÓN MUESTRA:</b>	Muestreo realizado en la Planta				
<b>RECEPCIÓN:</b>		<b>POR:</b>		<b>ENSAYO:</b>	
<b>TIPO DE CONTENEDOR:</b>	METÁLICO		<b>PROCEDIMIENTO:</b>	DETERMINACIÓN DE MASA EN AIRE	
	M	2	Número de muestra		
	TM	3	Número total de muestras		
	A	2,223.40	Masa de la Muestra [g]		
	D	7,411.40	Masa del contenedor lleno de agua a 25 ± 0.5 °C [g]		
	E	8,666.50	Masa del contenedor lleno con la muestra y agua a 25 ± 0.5 °C [g]		
	PS	No	Se utilizó el procedimiento suplementario para determinar A?		
<b>PROCEDIMIENTO SUPLEMENTARIO (Si Aplica)</b>					
	B	-	Masa de la bandeja [g]		
	MI	-	Masa inicial del conjunto abndejaja y muestra húmeda [g]		
	CICLO	Masa [g]	Δ [%]		
	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
	7				
	8				
	A'		Masa inicial del conjunto abndejaja y muestra húmeda [g]		
	Gmm	2.296	Gravedad Especifica Máxima Teorica		
<b>COMENTARIOS SOBRE EL ENSAYO</b>					

## ÁREA DE PAVIMENTOS

### GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

NORMA: AASHTO T 209-08		ORDEN:	HOJA:	3 de 3
CLIENTE:			SOLICITA:	
PROYECTO:			FISCALIZA:	
UBICACIÓN:	Av. Simon Bolivar		CONSTRUYE:	
PROVINCIA:	Pichincha	CANTÓN:	Quito	EMISIÓN:
ID MUESTRA:				
MEZCLA:			FECHA ELAB:	21-Sept-15
ORIGEN MUESTRA:				
MÉTODO:	N/D	MUESTREO:	N/D	POR:
CONDICIÓN MUESTRA:	Muestreo realizado en la Planta			
RECEPCIÓN:		POR:		ENSAYO:
TIPO DE CONTENEDOR:	METÁLICO	PROCEDIMIENTO:	DETERMINACIÓN DE MASA EN AIRE	
M	3	Número de muestra		
TM	3	Número total de muestras		
A	2,244.20	Masa de la Muestra [g]		
D	7,411.40	Masa del contenedor lleno de agua a 25 ± 0.5 °C [g]		
E	8,676.30	Masa del contenedor lleno con la muestra y agua a 25 ± 0.5 °C [g]		
PS	No	Se utilizó el procedimiento suplementario para determinar A?		
<b>PROCEDIMIENTO SUPLEMENTARIO (Si Aplica)</b>				
B	-	Masa de la bandeja [g]		
MI	-	Masa inicial del conjunto abndeya y muestra húmeda [g]		
CICLO	Masa [g]	Δ [%]		
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
A'		Masa inicial del conjunto abndeya y muestra húmeda [g]		
Gmm	2.292	Gravedad Especifica Máxima Teorica		
COMENTARIOS SOBRE EL ENSAYO				

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

Obra		SOLICITADO POR			
Localizacion	Sector Túnel de Guayasamín	ENSAYADO POR			
Muestra No	3	CALCULADO POR			
Profundidad		APROBADO POR			
Descripcion		FECHA			
NORMA	AASHTO T 27 - 06				
<b>GRANULOMETRIA DE AGREGADOS</b>					
MALLA No.	ABERTUR A (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL (gr)	MASA RETENIDA ACUMULADA (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
Serie Gruesa					
3"	76.2				
2 1/2"	64				
2"	50.8				
1 1/2"	38.1				
1"	25.4				
3/4"	19	87.70	87.70	8.33	91.67
1/2"	12.7	208.91	296.61	28.17	71.83
3/8"	9.51	89.67	386.28	36.68	63.32
Nº4	4.76	177.62	563.90	53.55	46.45
Nº8	2.362	121.02	684.92	65.04	34.96
Nº16	1.19	101.57	786.49	74.69	25.31
Nº30	0.595	83.09	869.58	82.58	17.42
Nº50	0.297	64.32	933.9	88.69	11.31
Nº100	0.149	48.26	982.16	93.27	6.73
Nº200	0.074	30.56	1012.72	96.17	3.83
Masa Total		<b>1012.72</b>			
			Peso Inicial Seco		<b>1053.00</b>

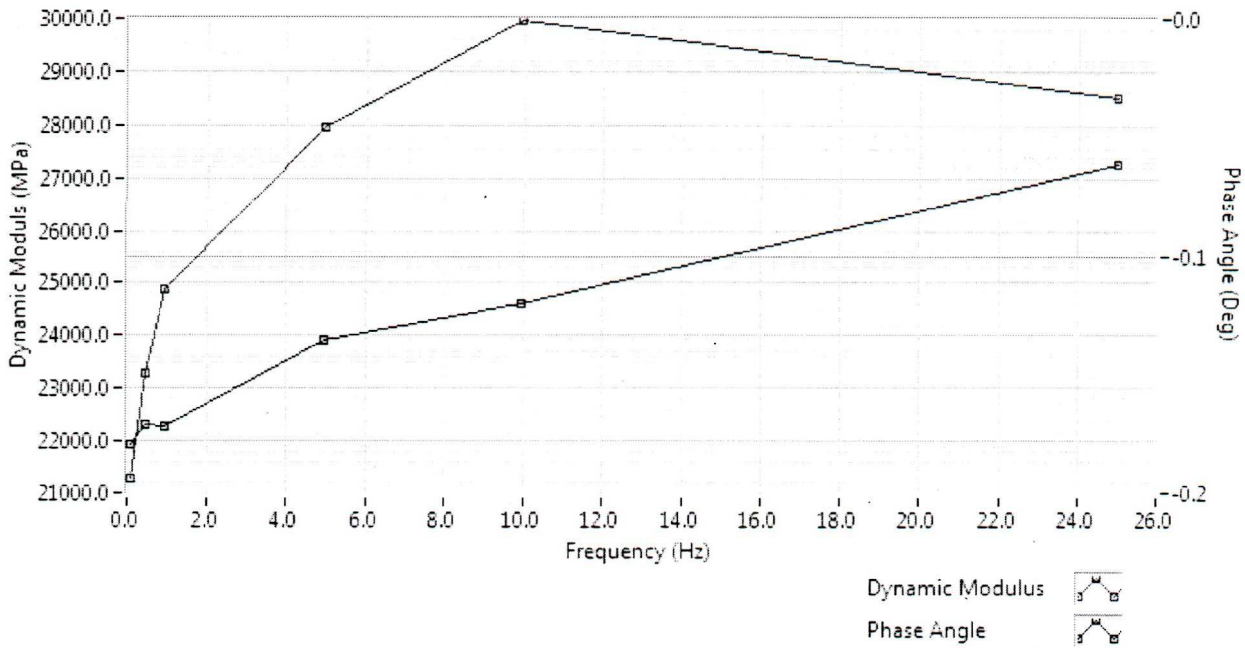
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test mié, 27 de ene de 2016 @ 9:01  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_M1  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test temperature (DegC)	-10.0
Air void content (%)	0
Diameter (mm)	100.6

Height (mm)	141.2
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	28497.1	29946.5	27941.5	24847.3	23275.8	21263.2
Phase angle (Deg) [24]	-0.061138	-0.120470	-0.135875	-0.171720	-0.171321	-0.179505
Strain magnitude [20]	30.694357	19.472265	22.865530	21.946821	23.159857	20.566370
Stress magnitude (kPa) [06]	874.700006	583.126224	638.896784	545.320238	539.065348	437.307032
Average strain error [21]	0.071487	0.088154	0.071872	0.076619	0.079345	0.082094
Uniformity coefficient for strain [22]	0.046599	0.016847	0.022430	0.006367	0.004251	0.067756
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.323595	0.011629	0.008039	0.007033	0.010028	0.004386

Data File TEJ\_M1\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

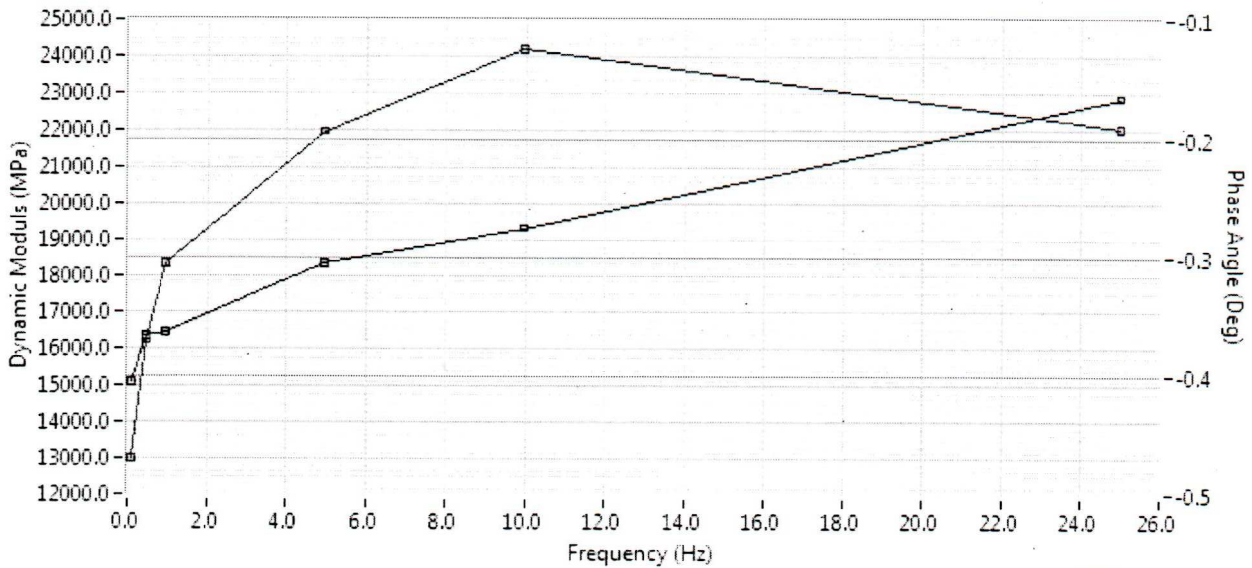
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**



Date of Test   
 Report Number   
 Operator   
 Specimen ID   
 Client Name

Lab Address

Test temperature (DegC)	4.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.6

Height (mm)	141.2
Target strain (ustrain)	100



Dynamic Modulus   
 Phase Angle 

**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	22033.4	24164.9	21945.2	18340.9	16238.7	12970.2
Phase angle (Deg) [24]	-0.166213	-0.275542	-0.305018	-0.364389	-0.366785	-0.405871
Strain magnitude [20]	39.444478	23.898370	28.147369	28.158550	30.098411	29.193784
Stress magnitude (kPa) [06]	869.094363	577.501799	617.700531	516.453577	488.758666	378.648782
Average strain error [21]	0.058882	0.091045	0.079377	0.086176	0.095697	0.107685
Uniformity coefficient for strain [22]	0.058758	0.171925	0.139790	0.147816	0.127006	0.149767
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.701923	0.305377	0.187084	0.166813	0.165322	0.178777

Data File

**Notes** Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:  
 Poisson's Ratio:  
 Description of asphaltic material:  
 How it was mixed:  
 How it was compacted:  
 How bulk density was determined:  
 How the specimen was stored:

Signed

Date

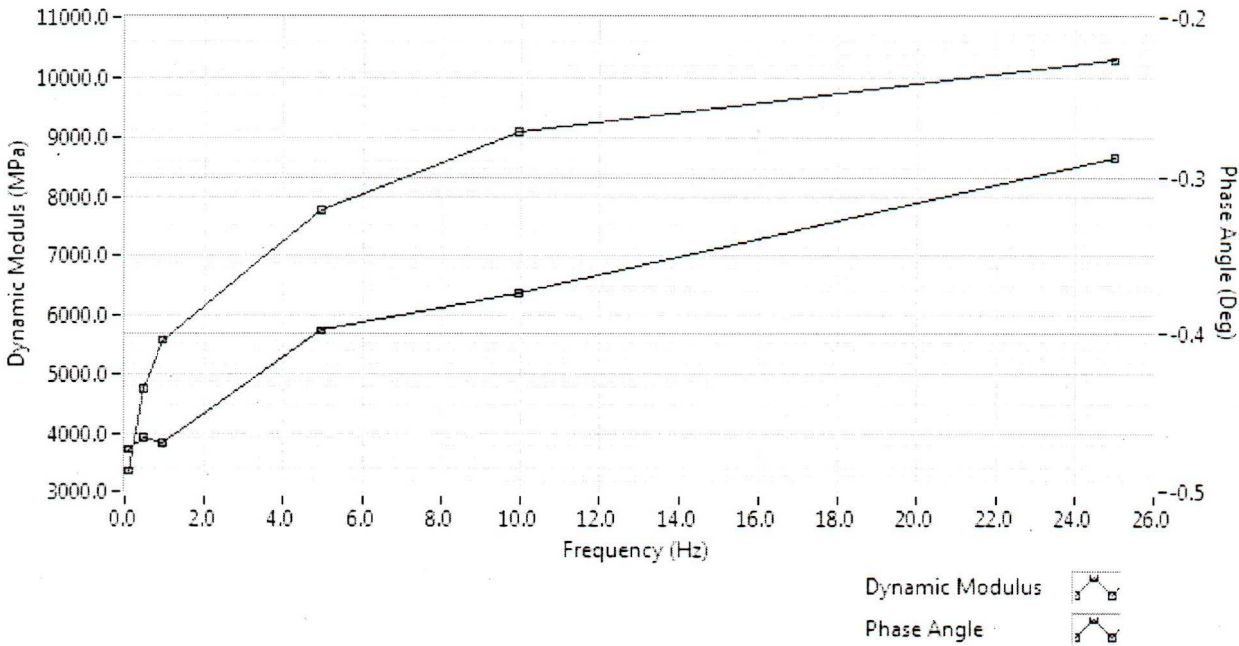
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 7:54  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose \_\_\_\_\_  
 Specimen ID TEJ\_M1.2 \_\_\_\_\_  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test temperature (DegC)	21.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.6

Height (mm)	141.2
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	10261.5	9064.8	7761.0	5546.9	4732.3	3332.2
Phase angle (Deg) [24]	-0.287999	-0.374595	-0.398428	-0.469291	-0.466202	-0.473744
Strain magnitude [20]	47.477646	37.624684	41.387154	42.909792	44.586373	44.471887
Stress magnitude (kPa) [06]	487.190434	341.060869	321.205484	238.017860	210.997026	148.190916
Average strain error [21]	0.068786	0.087392	0.079373	0.112959	0.117092	0.119984
Uniformity coefficient for strain [22]	0.060787	0.124522	0.108802	0.143831	0.176798	0.251663
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.440554	0.312598	0.172768	0.150982	0.139620	0.122600

Data File TEJ\_M1.2\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

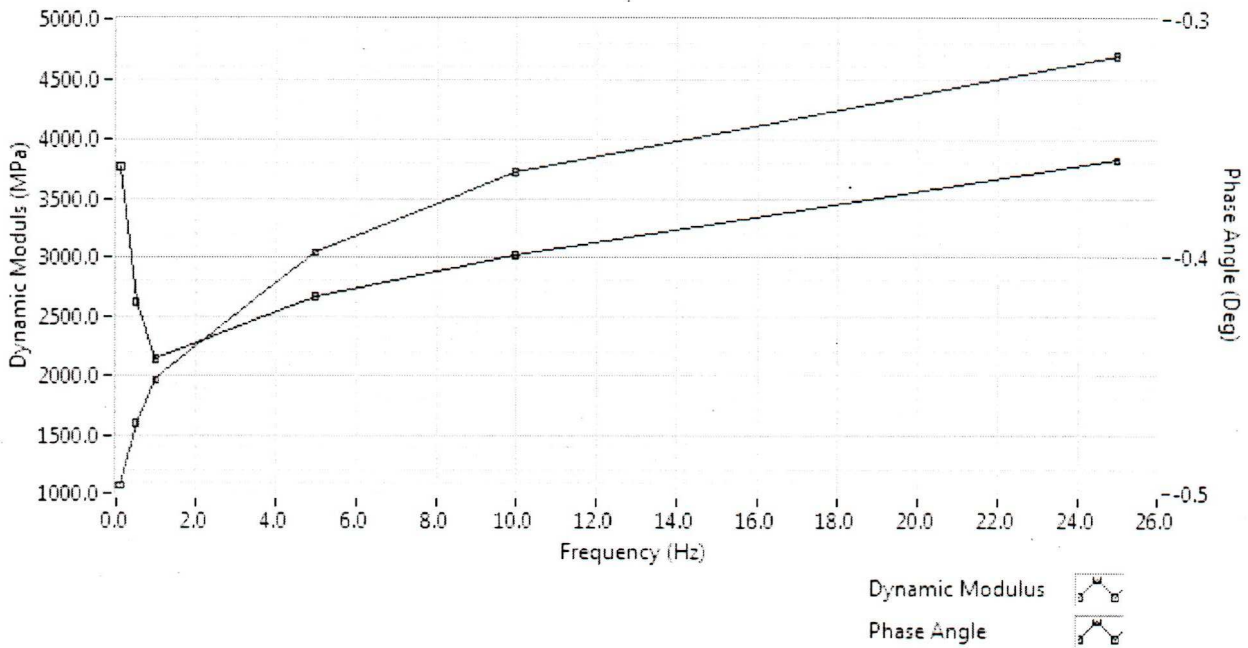
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 11:39  
 Report Number  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_M1.3  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test temperature (DegC)	37.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.6

Height (mm)	141.2
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	4678.4	3709.5	3029.5	1953.5	1594.3	1060.9
Phase angle (Deg) [24]	-0.359311	-0.399408	-0.417526	-0.443349	-0.419653	-0.362055
Strain magnitude [20]	49.601255	43.849790	47.818781	48.870317	49.545515	49.206532
Stress magnitude (kPa) [06]	232.054126	162.662545	144.868773	95.468755	78.992713	52.204680
Average strain error [21]	0.081131	0.067271	0.061645	0.064102	0.062288	0.073836
Uniformity coefficient for strain [22]	0.036190	0.008259	0.010198	0.061242	0.086545	0.121424
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.222391	0.071743	0.035800	0.015481	0.000692	0.005145

Data File TEJ\_M1.2\_2.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed

Date

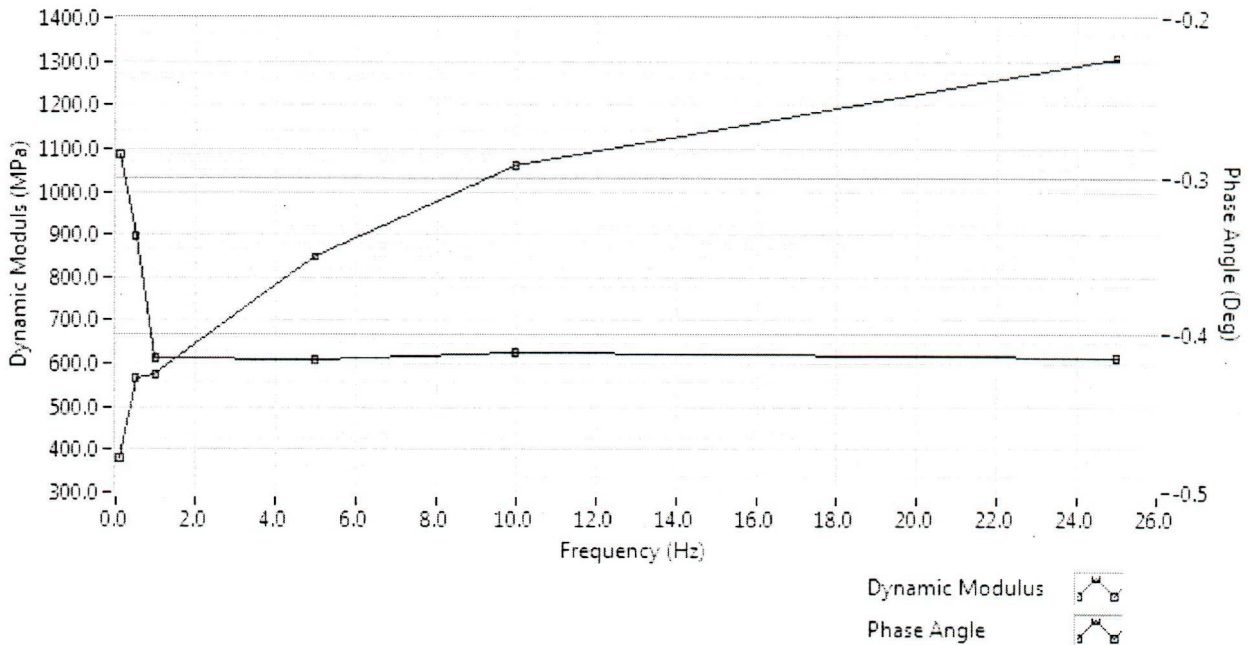
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 15:40  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_M1.4  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	54.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.6

Height (mm)	141.2
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	1306.4	1057.5	845.3	573.7	564.9	379.0
Phase angle (Deg) [24]	-0.415415	-0.412159	-0.416060	-0.415392	-0.338054	-0.286118
Strain magnitude [20]	53.611837	51.992796	53.160662	50.477290	133.495188	94.375347
Stress magnitude (kPa) [06]	70.038277	54.984770	44.936510	28.959266	75.405700	35.772442
Average strain error [21]	0.057308	0.057438	0.058397	0.063470	0.103299	0.083348
Uniformity coefficient for strain [22]	0.213750	0.262495	0.244197	0.304967	0.129348	0.215361
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.061950	0.360691	0.113050	0.110065	0.040254	0.049089

Data File TEJ\_M1.4\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

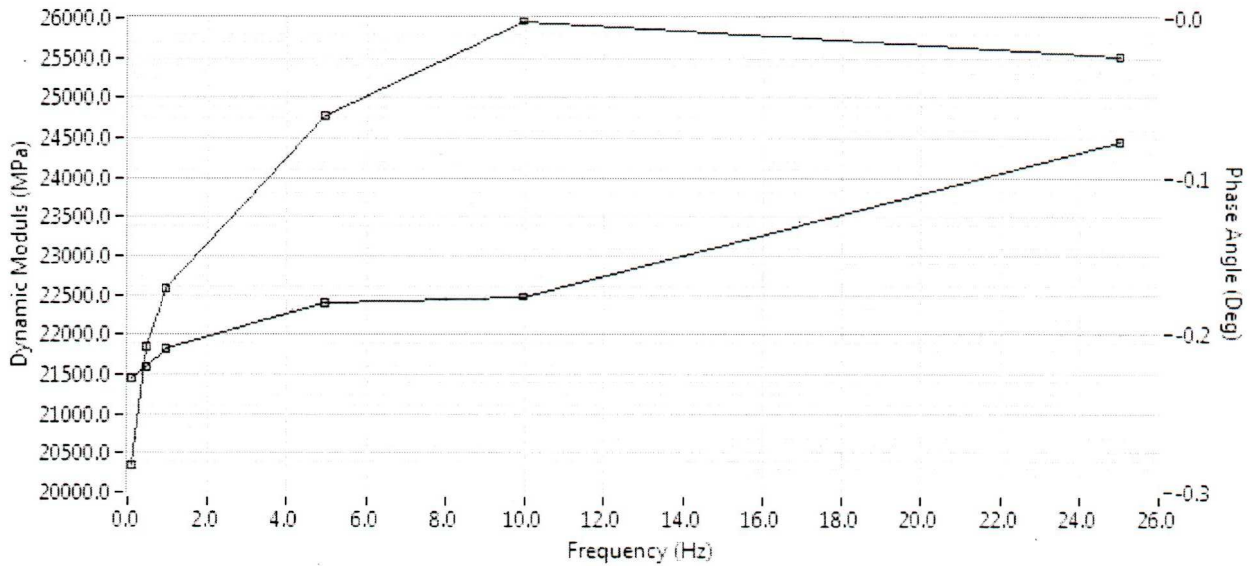
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test jue, 28 de ene de 2016 @ 7:15  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_M2  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	-10.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	101.1

Height (mm)	144.4
Target strain (ustrain)	100



Dynamic Modulus

Phase Angle

**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	25503.5	25951.3	24761.0	22565.5	21836.5	20330.0
Phase angle (Deg) [24]	-0.078068	-0.176777	-0.180353	-0.209224	-0.220790	-0.228321
Strain magnitude [20]	33.739491	22.415942	25.096883	23.850681	23.918435	21.444898
Stress magnitude (kPa) [06]	860.474615	581.723485	621.423999	538.203373	522.294672	435.974307
Average strain error [21]	0.060802	0.072477	0.064661	0.062921	0.067573	0.073294
Uniformity coefficient for strain [22]	0.060766	0.052093	0.019168	0.026661	0.046870	0.101390
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.736281	0.206312	0.111709	0.101869	0.107320	0.123654

Data File TEJ\_M2\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

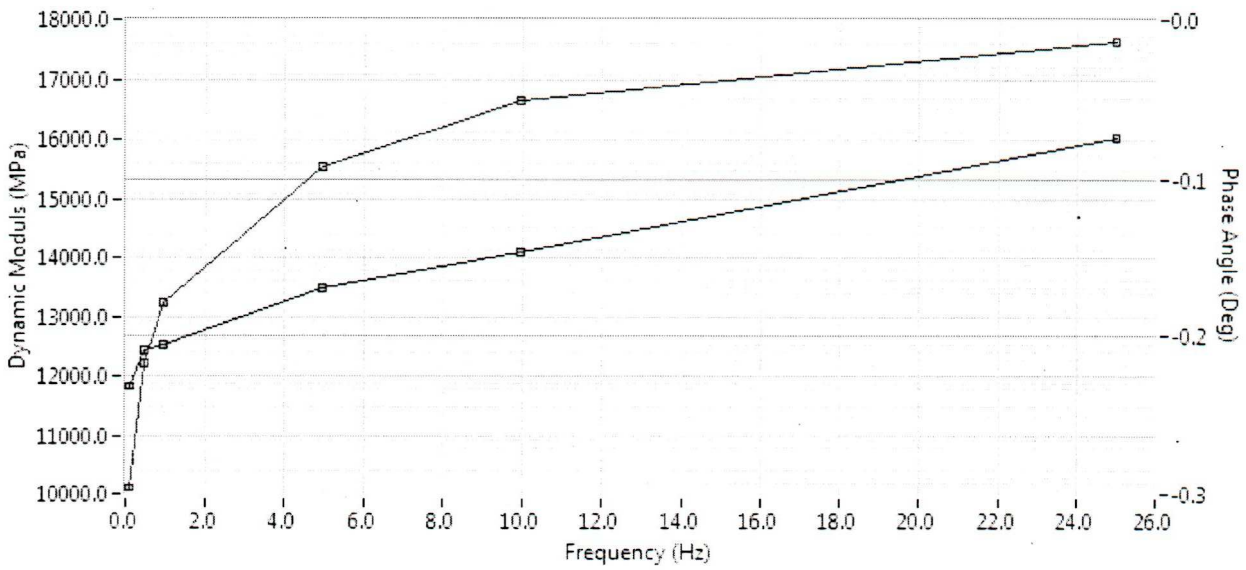
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test jue, 28 de ene de 2016 @ 14:02  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_M2.1  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	4.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	101.1

Height (mm)	144.4
Target strain (ustrain)	100



Dynamic Modulus

Phase Angle

**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	17622.5	16635.8	15515.9	13210.9	12185.6	10090.3
Phase angle (Deg) [24]	-0.074929	-0.147014	-0.170060	-0.206475	-0.209881	-0.232077
Strain magnitude [20]	44.805813	29.148825	31.808975	31.704347	32.532559	31.099832
Stress magnitude (kPa) [06]	789.590466	484.912671	493.543487	418.844275	396.427267	313.807560
Average strain error [21]	0.043389	0.056544	0.041134	0.048772	0.048299	0.065789
Uniformity coefficient for strain [22]	0.020650	0.018879	0.013794	0.014841	0.021999	0.053362
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.195643	0.029838	0.012329	0.004692	0.010688	0.007222

Data File TEJ\_M2.1\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

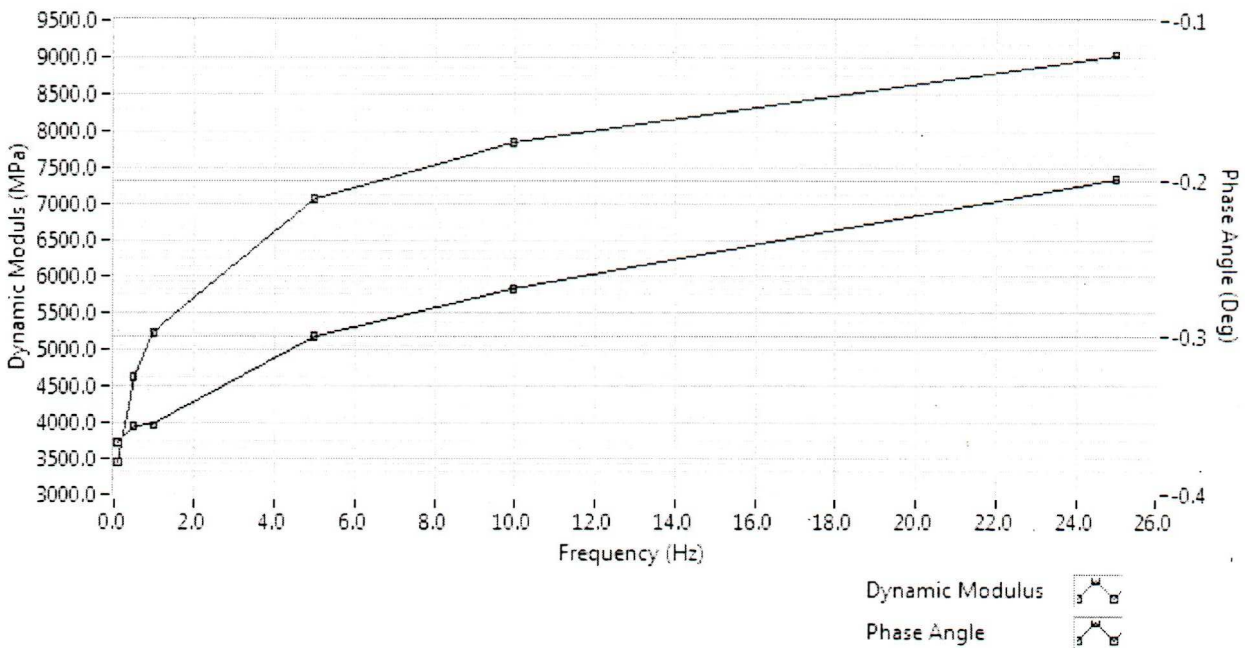
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test: vie, 29 de ene de 2016 @ 8:17  
 Report Number: \_\_\_\_\_  
 Operator: Jose  
 Specimen ID: TEJ\_M2.2  
 Client Name: \_\_\_\_\_

Lab Address: Quito  
 Ecuador

Test temperature (DegC)	21.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	101.1

Height (mm)	144.4
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	9022.0	7842.7	7069.9	5216.7	4611.3	3443.5
Phase angle (Deg) [24]	-0.199831	-0.270689	-0.300043	-0.356240	-0.356775	-0.366981
Strain magnitude [20]	46.481929	37.650187	40.127119	41.877469	42.623846	42.192840
Stress magnitude (kPa) [06]	419.360901	295.280056	283.693604	218.461597	196.551165	145.289914
Average strain error [21]	0.035474	0.045812	0.045066	0.080502	0.088679	0.104717
Uniformity coefficient for strain [22]	0.036137	0.006870	0.007662	0.027044	0.039705	0.056739
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.095999	0.017507	0.012213	0.015231	0.008902	0.011170

Data File: TEJ\_M2.2\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed

Date

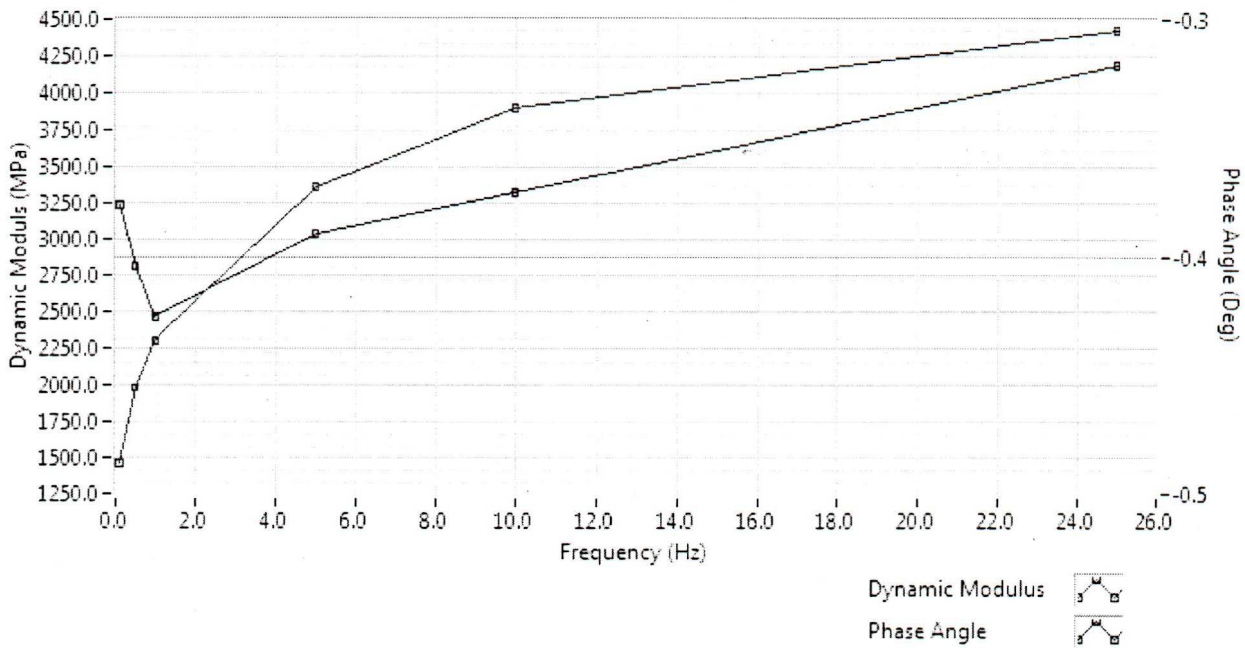
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 12:02  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_M2.3  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	37.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	101.1

Height (mm)	144.4
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	4419.3	3890.1	3358.5	2294.2	1974.6	1456.2
Phase angle (Deg) [24]	-0.319563	-0.372909	-0.390262	-0.425611	-0.404514	-0.378314
Strain magnitude [20]	47.974407	41.447195	46.058562	47.204058	47.984417	46.457213
Stress magnitude (kPa) [06]	212.015177	161.235131	154.689642	108.293693	94.748196	67.651801
Average strain error [21]	0.040379	0.054881	0.060538	0.086194	0.087397	0.107409
Uniformity coefficient for strain [22]	0.005313	0.007290	0.002357	0.015382	0.006890	0.006209
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.037790	0.074798	0.041728	0.026851	0.020452	0.032950

Data File TEJ\_M2.3\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

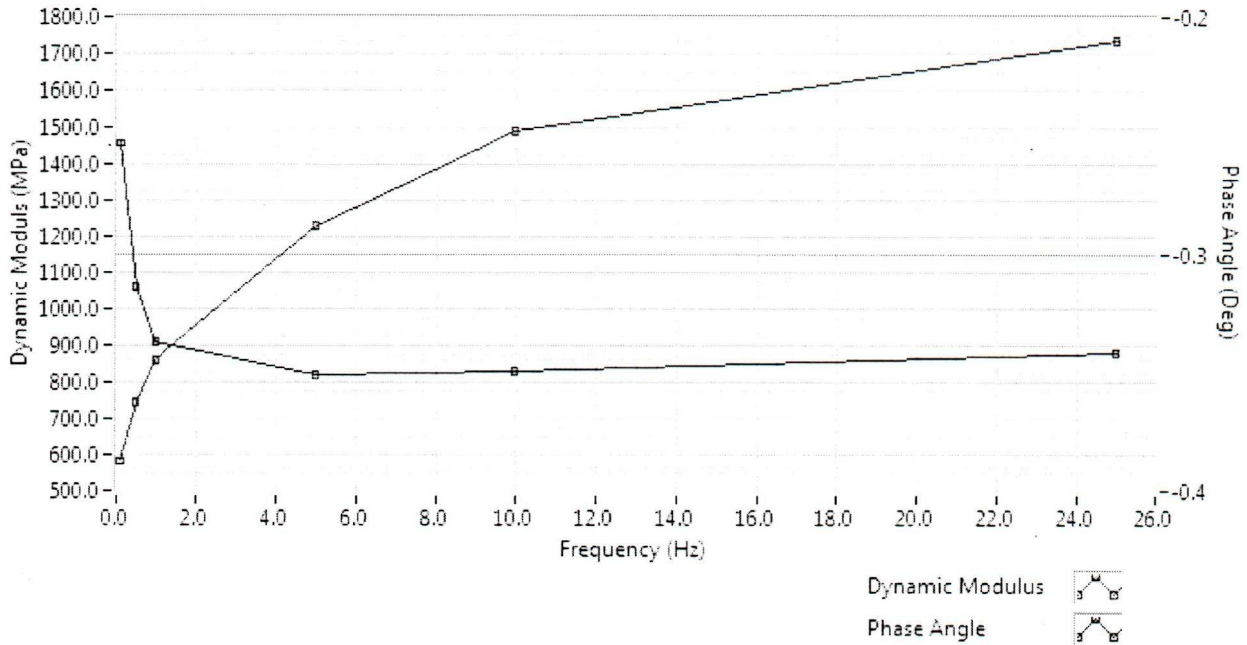
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 16:01  
 Report Number  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_M2.4  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test temperature (DegC)	54.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	101.1

Height (mm)	144.4
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	1734.2	1486.1	1226.2	858.3	742.8	579.6
Phase angle (Deg) [24]	-0.341978	-0.349445	-0.351354	-0.337549	-0.314425	-0.253108
Strain magnitude [20]	52.239410	52.509617	52.565171	49.811063	50.777118	50.217695
Stress magnitude (kPa) [06]	90.595956	78.036654	64.455387	42.754846	37.717795	29.105011
Average strain error [21]	0.039600	0.049506	0.061749	0.067612	0.063879	0.061993
Uniformity coefficient for strain [22]	0.101751	0.064475	0.054023	0.015256	0.023248	0.023985
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.041248	0.055175	0.026225	0.018153	0.019787	0.010779

Data File TEJ\_M2.4\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed

Date

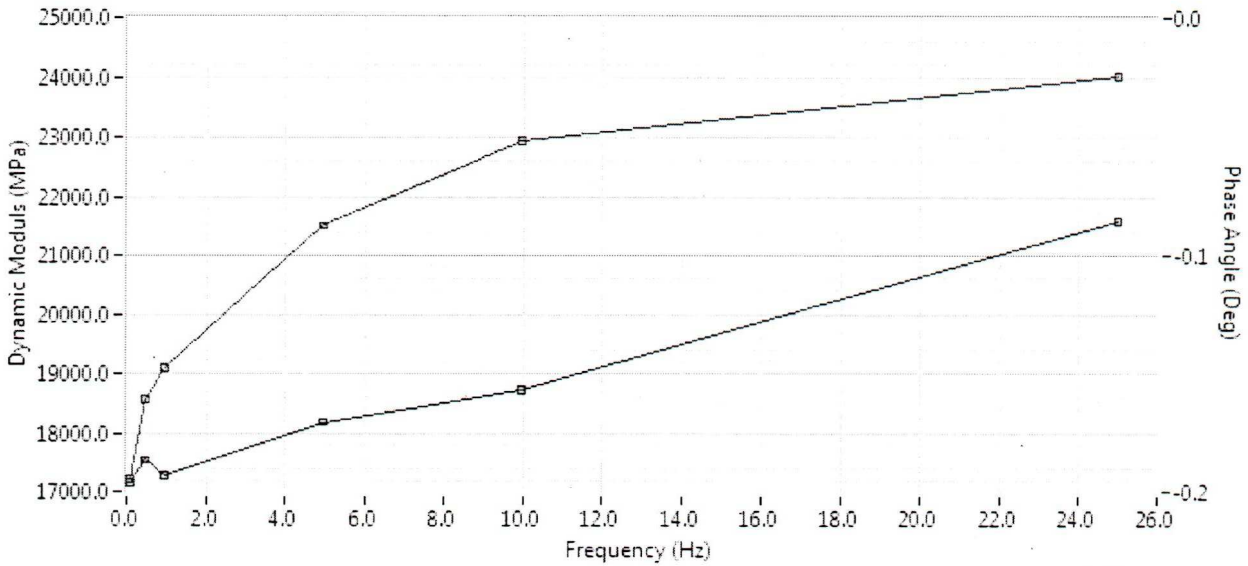
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test jue, 28 de ene de 2016 @ 7:45  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_M3  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	-10.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	101.1

Height (mm)	142.6
Target strain (ustrain)	100



Dynamic Modulus

Phase Angle

**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	24007.9	22919.4	21492.4	19077.7	18559.8	17199.4
Phase angle (Deg) [24]	-0.086190	-0.157202	-0.170884	-0.193447	-0.187002	-0.196451
Strain magnitude [20]	35.561307	23.036174	26.396387	25.539151	26.078759	22.958054
Stress magnitude (kPa) [06]	853.752761	527.974931	567.321783	487.227260	484.016802	394.864454
Average strain error [21]	0.054258	0.064200	0.051958	0.052774	0.056826	0.072730
Uniformity coefficient for strain [22]	0.058333	0.032830	0.046617	0.065150	0.097414	0.118786
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.575617	0.130775	0.070298	0.051647	0.057166	0.054320

Data File TEJ\_M3\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

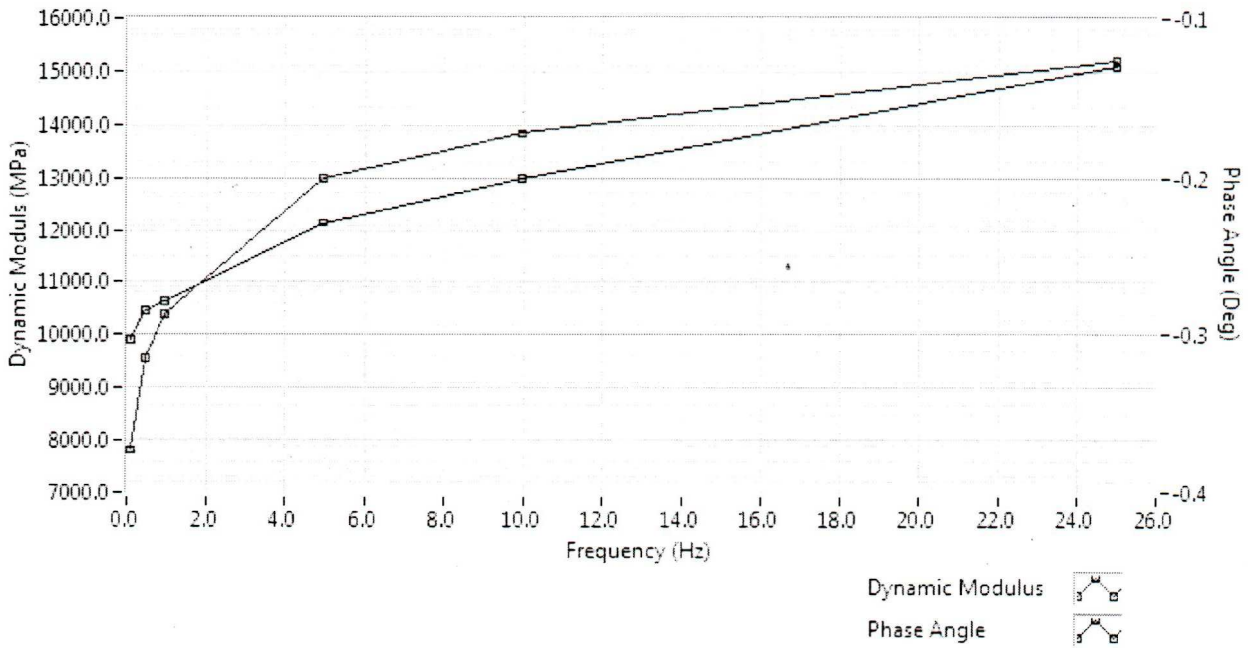
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test jue, 28 de ene de 2016 @ 15:48  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_M3.1  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	4.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	101.1

Height (mm)	142.6
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	15196.9	13818.0	12953.4	10380.3	9552.2	7793.0
Phase angle (Deg) [24]	-0.131132	-0.200678	-0.229403	-0.279250	-0.285363	-0.304073
Strain magnitude [20]	44.726131	30.267103	32.603988	33.416568	34.416876	32.906221
Stress magnitude (kPa) [06]	679.698064	418.231624	422.333117	346.874020	328.757348	256.437058
Average strain error [21]	0.039666	0.046914	0.049528	0.062072	0.077449	0.094544
Uniformity coefficient for strain [22]	0.065985	0.103402	0.107758	0.140004	0.160057	0.208865
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.057643	0.022670	0.018324	0.017396	0.016550	0.010319

Data File TEJ\_M3.1\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

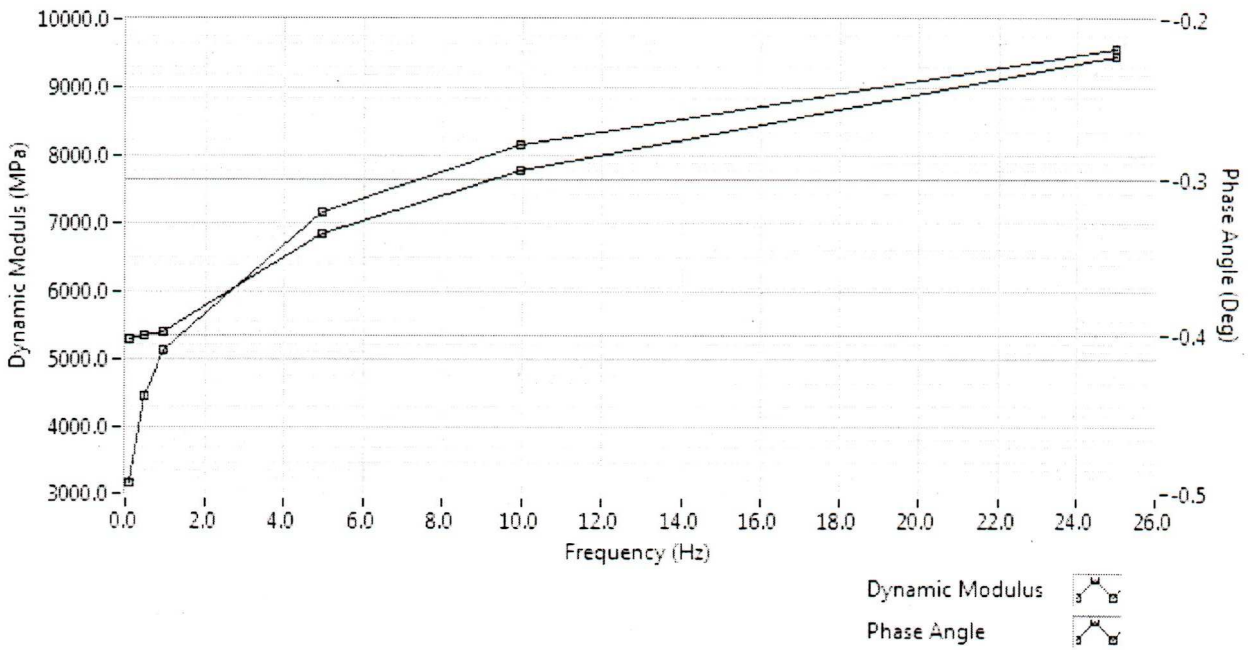
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 8:37  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_M3.2  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test temperature (DegC)	21.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	101.1

Height (mm)	142.6
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	9560.7	8162.4	7154.2	5114.9	4437.0	3149.2
Phase angle (Deg) [24]	-0.223453	-0.295759	-0.335667	-0.398231	-0.399811	-0.402753
Strain magnitude [20]	47.371770	37.976727	41.173058	42.476423	44.211813	43.619217
Stress magnitude (kPa) [06]	452.906459	309.980185	294.559752	217.261402	196.166101	137.366922
Average strain error [21]	0.035716	0.046428	0.051134	0.088297	0.106411	0.109267
Uniformity coefficient for strain [22]	0.135186	0.175811	0.178129	0.204913	0.200442	0.234226
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.000319	0.001301	0.006739	0.014777	0.015149	0.018979

Data File TEJ\_M3.2\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

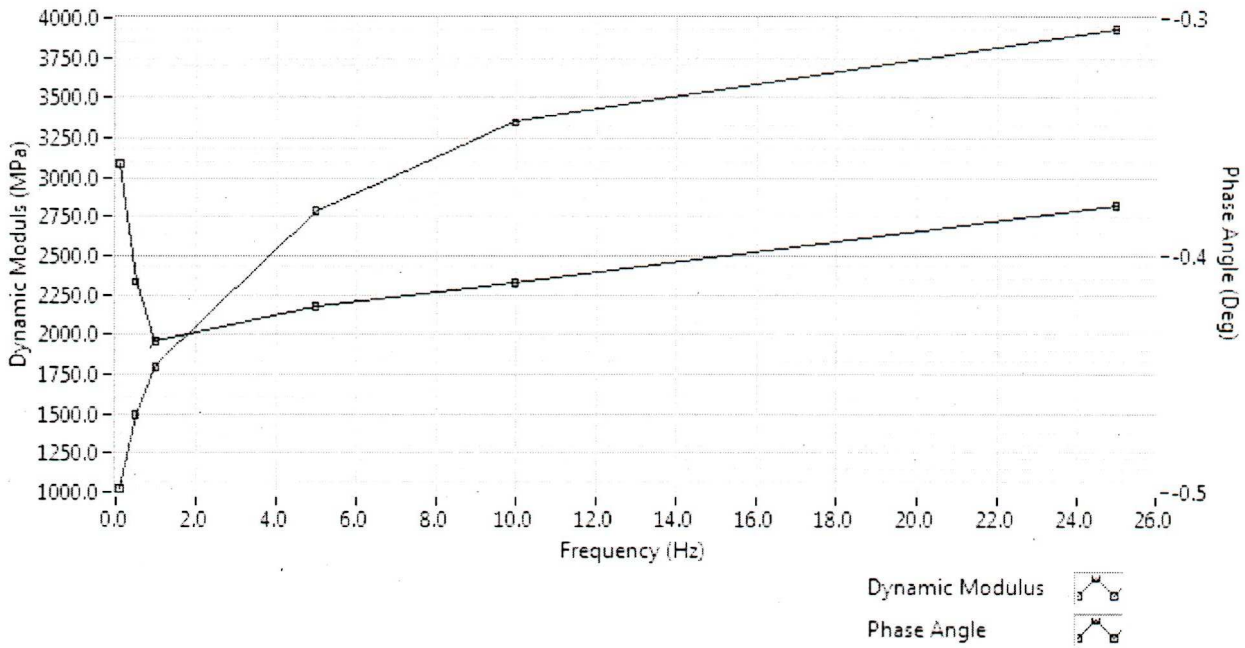
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 12:24  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_M3.3  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	37.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	101.1

Height (mm)	142.6
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	3926.4	3341.7	2776.8	1785.5	1493.2	1012.1
Phase angle (Deg) [24]	-0.378726	-0.411753	-0.421729	-0.436750	-0.411588	-0.361190
Strain magnitude [20]	49.614371	45.813104	48.456278	49.416731	49.732171	49.030153
Stress magnitude (kPa) [06]	194.806788	153.095521	134.552996	88.232691	74.259701	49.623433
Average strain error [21]	0.044020	0.058954	0.059078	0.072872	0.073216	0.081580
Uniformity coefficient for strain [22]	0.166065	0.218973	0.220918	0.237853	0.238687	0.281986
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.087917	0.084863	0.030741	0.009447	0.013915	0.010909

Data File TEJ\_M3.3\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

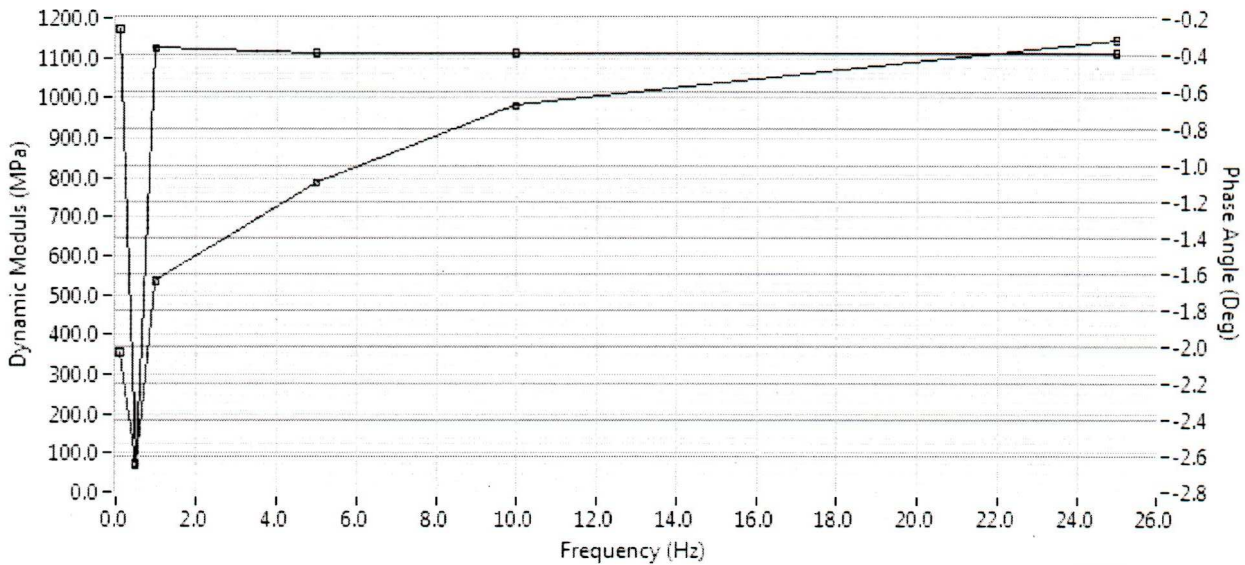
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 16:23  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_M3.4  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito Ecuador

Test temperature (DegC)	54.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	101.1

Height (mm)	142.6
Target strain (ustrain)	100



Dynamic Modulus

Phase Angle

**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	1141.8	978.5	784.5	532.2	64.9	353.7
Phase angle (Deg) [24]	-0.399329	-0.392649	-0.391795	-0.370532	-2.647431	-0.265027
Strain magnitude [20]	53.343961	55.089430	53.951916	50.435727	0.374466	64.615253
Stress magnitude (kPa) [06]	60.907179	53.906335	42.323356	26.839536	0.024320	22.854782
Average strain error [21]	0.044990	0.054833	0.060998	0.051069	6.321173	0.070782
Uniformity coefficient for strain [22]	0.181970	0.161634	0.158069	0.137514	0.036954	0.171295
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.061003	0.259698	0.079767	0.041249	-0.009218	0.000985

Data File TEJ\_M3.4\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:  
 Poisson's Ratio:  
 Description of asphaltic material:  
 How it was mixed:  
 How it was compacted:  
 How bulk density was determined:  
 How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

*Anexo 7 Resultado de los ensayos de caracterización de la  
mezcla 2*

## ÁREA DE PAVIMENTOS INFORME DE ENSAYO

### DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE LIGANTE ASFÁLTICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE POR EL MÉTODO DE IGNICIÓN

NORMA: AASHTO T308-08		ORDEN:		HOJA	1 de 3																								
CLIENTE:				SOLICITA:																									
PROYECTO:				FISCALIZA:																									
UBICACIÓN:				CONSTRUYE:																									
PROVINCIA:	Pichincha	CANTÓN:	Quito	EMISIÓN:																									
ID MUESTRA																													
MEZCLA:				FECHA ELAB	22/9/2015																								
ORIGEN MUESTRA:																													
MÉTODO:		MUESTREO :		POR:																									
CONDICIÓN MUESTRA:																													
RECEPCIÓN:		POR:		ENSAYO:																									
MÉTODO DE ENSAYO:	A	TIPO DE HORNO:		IRRADIACIÓN IR																									
¿SE DETERMINÓ CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA?		NO	MASA CTE.	SI																									
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	Si fue determinado por AASHTO T 329																												
¿SE DETERMINÓ CORRECCIÓN DE LIGANTE ASFÁLTICO?		NO	C <sub>F</sub>																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%;"><b>M<sub>b</sub></b></td> <td style="width: 15%;">3388.26</td> <td>Masa del conjunto bandeja (balanza externa) [g]</td> </tr> <tr> <td><b>M<sub>ti</sub></b></td> <td>4588.71</td> <td>Masa total inicial (balanza externa) [g]</td> </tr> <tr> <td><b>M<sub>i</sub></b></td> <td>1200.45</td> <td>Masa de muestra inicial (M<sub>ti</sub>-M<sub>b</sub>) [g]</td> </tr> <tr> <td><b>M<sub>th</sub></b></td> <td>4590.8</td> <td>Masa total (balanza horno) [g] (Aplica en Método A)</td> </tr> <tr> <td><b>ΔM</b></td> <td>2.09</td> <td>Comprobar si esta dentro de ± 5 g (Aplica en Método A)</td> </tr> <tr> <td><b>M<sub>tf</sub></b></td> <td>4534.01</td> <td>Masa total final (balanza externa) [g]</td> </tr> <tr> <td><b>M<sub>f</sub></b></td> <td>1145.75</td> <td>Masa de muestra inicial (M<sub>tf</sub>-M<sub>b</sub>) [g]</td> </tr> <tr> <td><b>P<sub>b</sub></b></td> <td>4.74</td> <td>Porcentaje de pérdida (valor del ticket) [%] (Aplica en Método A)</td> </tr> </table>						<b>M<sub>b</sub></b>	3388.26	Masa del conjunto bandeja (balanza externa) [g]	<b>M<sub>ti</sub></b>	4588.71	Masa total inicial (balanza externa) [g]	<b>M<sub>i</sub></b>	1200.45	Masa de muestra inicial (M <sub>ti</sub> -M <sub>b</sub> ) [g]	<b>M<sub>th</sub></b>	4590.8	Masa total (balanza horno) [g] (Aplica en Método A)	<b>ΔM</b>	2.09	Comprobar si esta dentro de ± 5 g (Aplica en Método A)	<b>M<sub>tf</sub></b>	4534.01	Masa total final (balanza externa) [g]	<b>M<sub>f</sub></b>	1145.75	Masa de muestra inicial (M <sub>tf</sub> -M <sub>b</sub> ) [g]	<b>P<sub>b</sub></b>	4.74	Porcentaje de pérdida (valor del ticket) [%] (Aplica en Método A)
<b>M<sub>b</sub></b>	3388.26	Masa del conjunto bandeja (balanza externa) [g]																											
<b>M<sub>ti</sub></b>	4588.71	Masa total inicial (balanza externa) [g]																											
<b>M<sub>i</sub></b>	1200.45	Masa de muestra inicial (M <sub>ti</sub> -M <sub>b</sub> ) [g]																											
<b>M<sub>th</sub></b>	4590.8	Masa total (balanza horno) [g] (Aplica en Método A)																											
<b>ΔM</b>	2.09	Comprobar si esta dentro de ± 5 g (Aplica en Método A)																											
<b>M<sub>tf</sub></b>	4534.01	Masa total final (balanza externa) [g]																											
<b>M<sub>f</sub></b>	1145.75	Masa de muestra inicial (M <sub>tf</sub> -M <sub>b</sub> ) [g]																											
<b>P<sub>b</sub></b>	4.74	Porcentaje de pérdida (valor del ticket) [%] (Aplica en Método A)																											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 80%;"><b>¿CORRECCIÓN INCLUIDA EN EL TICKET?</b></td> <td>NO</td> <td>(Aplica en Método A)</td> </tr> </table>		<b>¿CORRECCIÓN INCLUIDA EN EL TICKET?</b>	NO	(Aplica en Método A)																									
<b>¿CORRECCIÓN INCLUIDA EN EL TICKET?</b>	NO	(Aplica en Método A)																											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;"><b>P<sub>b c</sub></b></td> <td></td> <td>Contenido de ligante corregido [%]</td> </tr> <tr> <td><b>T</b></td> <td></td> <td>Temperatura de ensayo [°C]</td> </tr> </table>		<b>P<sub>b c</sub></b>		Contenido de ligante corregido [%]	<b>T</b>		Temperatura de ensayo [°C]																						
<b>P<sub>b c</sub></b>		Contenido de ligante corregido [%]																											
<b>T</b>		Temperatura de ensayo [°C]																											
<b>COMENTARIOS SOBRE EL ENSAYO:</b>																													
Se trabaja con material disgregado a partir de mezcla asfáltica compactada																													

## ÁREA DE PAVIMENTOS INFORME DE ENSAYO

### DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE LIGANTE ASFÁLTICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE POR EL MÉTODO DE IGNICIÓN

NORMA: AASHTO T308-08		ORDEN:		HOJA	2 de 3
CLIENTE:				SOLICITA:	
PROYECTO:				FISCALIZA:	
UBICACIÓN:	Av. Simón Bolívar			CONSTRUYE:	
PROVINCIA:	Pichincha	CANTÓN:	Quito	EMISIÓN:	
ID MUESTRA:					
MEZCLA:				FECHA ELAI:	22/9/2015
ORIGEN MUESTRA:					
MÉTODO:		MUESTREO :		POR:	
CONDICIÓN MUESTRA:					
RECEPCIÓN:		POR:		ENSAYO:	
MÉTODO DE ENSAYO:	A	TIPO DE HORNO:		IRRADIACIÓN IR	
¿SE DETERMINÓ CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA?		NO	MASA CTE.	SI	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	Si fue determinado por AASHTO T 329				
¿SE DETERMINÓ CORRECCIÓN DE LIGANTE ASFÁLTICO?		NO	Cf		
<b>Mb</b>	3391.79	<i>Masa del conjunto bandeja (balanza externa) [g]</i>			
<b>Mti</b>	4591.21	<i>Masa total inicial (balanza externa) [g]</i>			
<b>Mi</b>	1199.42	<i>Masa de muestra inicial (Mti-Mb) [g]</i>			
<b>Mth</b>	4593.2	<i>Masa total (balanza horno) [g] (Aplica en Método A)</i>			
<b>ΔM</b>	1.99	<i>Comprobar si esta dentro de ± 5 g (Aplica en Método A)</i>			
<b>Mtf</b>	4534.86	<i>Masa total final (balanza externa) [g]</i>			
<b>Mf</b>	1143.07	<i>Masa de muestra inicial (Mtf-Mb) [g]</i>			
<b>Pb</b>	4.93	<i>Porcentaje de pérdida (valor del ticket) [%] (Aplica en Método A)</i>			
¿CORRECCIÓN INCLUIDA EN EL TICKET?		NO	(Aplica en Método A)		
<b>Pb c</b>		Contenido de ligante corregido [%]			
<b>T</b>		Temperatura de ensayo [°C]			
<b>COMENTARIOS SOBRE EL ENSAYO:</b>					
Se trabaja con material disgregado a partir de mezcla asfáltica compactada					

## ÁREA DE PAVIMENTOS INFORME DE ENSAYO

### DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE LIGANTE ASFÁLTICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE POR EL MÉTODO DE IGNICIÓN

NORMA: AASHTO T308-08		ORDEN:		HOJA	3 de 3
CLIENTE:				SOLICITA:	
PROYECTO:				FISCALIZA:	
UBICACIÓN:	Av. Simón Bolívar			CONSTRUYE:	
PROVINCIA:	Pichincha	CANTÓN:	Quito	EMISIÓN:	
ID MUESTRA:					
MEZCLA:				FECHA ELAI	22/9/2015
ORIGEN MUESTRA:					
MÉTODO:		MUESTREO :		POR:	
CONDICIÓN MUESTRA:					
RECEPCIÓN:		POR:		ENSAYO:	
MÉTODO DE ENSAYO:	A	TIPO DE HORNO:		IRRADIACIÓN IR	
¿SE DETERMINÓ CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA?		NO	MASA CTE.	SI	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	Si fue determinado por AASHTO T 329				
¿SE DETERMINÓ CORRECCIÓN DE LIGANTE ASFÁLTICO?		NO	Cf		
<b>Mb</b>	3381.42	<i>Masa del conjunto bandeja (balanza externa) [g]</i>			
<b>Mti</b>	4581.55	<i>Masa total inicial (balanza externa) [g]</i>			
<b>Mi</b>	1200.13	<i>Masa de muestra inicial (Mti-Mb) [g]</i>			
<b>Mth</b>	4584.1	<i>Masa total (balanza horno) [g] (Aplica en Método A)</i>			
<b>ΔM</b>	2.55	<i>Comprobar si esta dentro de ± 5 g (Aplica en Método A)</i>			
<b>Mtf</b>	4523.01	<i>Masa total final (balanza externa) [g]</i>			
<b>Mf</b>	1141.59	<i>Masa de muestra inicial (Mtf-Mb) [g]</i>			
<b>Pb</b>	4.97	<i>Porcentaje de pérdida (valor del ticket) [%] (Aplica en Método A)</i>			
¿CORRECCIÓN INCLUIDA EN EL TICKET?		NO	(Aplica en Método A)		
<b>Pb c</b>		Contenido de ligante corregido [%]			
<b>T</b>		Temperatura de ensayo [°C]			
<b>COMENTARIOS SOBRE EL ENSAYO:</b>					
Se trabaja con material disgregado a partir de mezcla asfáltica compactada					





**ÁREA DE PAVIMENTOS**  
**GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD**  
**DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE**

<b>NORMA:</b> AASHTO T 209-08		<b>ORDEN:</b>	<b>HOJA:</b>	1 de 3
<b>CLIENTE:</b>		<b>SOLICITA:</b>		
<b>PROYECTO:</b>		<b>FISCALIZA:</b>		
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. Simon Bolivar	<b>CONSTRUYE:</b>		
<b>PROVINCIA:</b>	Pichincha	<b>CANTÓN:</b>	Quito	<b>EMISIÓN:</b>
<b>ID MUESTRA:</b>				
<b>MEZCLA:</b>		<b>FECHA ELAB:</b>	21-Sept-15	
<b>ORIGEN MUESTRA:</b>				
<b>MÉTODO:</b>	N/D	<b>MUESTREO:</b>	N/D	<b>POR:</b>
<b>CONDICIÓN MUESTRA:</b>	Muestreo realizado en la Planta			
<b>RECEPCIÓN:</b>		<b>POR:</b>		<b>ENSAYO:</b>
<b>TIPO DE CONTENEDOR:</b>	METÁLICO	<b>PROCEDIMIENTO:</b>	DETERMINACIÓN DE MASA EN AIRE	
	M	1	Número de muestra	
	TM	3	Número total de muestras	
	A	2,272.60	Masa de la Muestra [g]	
	D	7,411.40	Masa del contenedor lleno de agua a 25 ± 0.5 °C [g]	
	E	8,745.90	Masa del contenedor lleno con la muestra y agua a 25 ± 0.5 °C [g]	
	PS	No	Se utilizó el procedimiento suplementario para determinar A?	
<b>PROCEDIMIENTO SUPLEMENTARIO (Si Aplica)</b>				
	B	-	Masa de la bandeja [g]	
	MI	-	Masa inicial del conjunto abndeja y muestra húmeda [g]	
	CICLO	Masa [g]	Δ [%]	
	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			
	7			
	8			
	A'		Masa inicial del conjunto abndeja y muestra húmeda [g]	
	Gmm	2.423	Gravedad Especifica Máxima Teorica	
<b>COMENTARIOS SOBRE EL ENSAYO</b>				

**ÁREA DE PAVIMENTOS**  
**GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD**  
**DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE**

<b>NORMA:</b> AASHTO T 209-08		<b>ORDEN:</b>		<b>HOJA:</b>	2 de 3
<b>CLIENTE:</b>				<b>SOLICITA:</b>	
<b>PROYECTO:</b>				<b>FISCALIZA:</b>	
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. Simon Bolivar			<b>CONSTRUYE:</b>	
<b>PROVINCIA:</b>	Pichincha	<b>CANTÓN:</b>	Quito	<b>EMISIÓN:</b>	
<b>ID MUESTRA:</b>					
<b>MEZCLA:</b>				<b>FECHA ELAB:</b>	21-Sept-15
<b>ORIGEN MUESTRA:</b>					
<b>MÉTODO:</b>	N/D	<b>MUESTREO:</b>	N/D	<b>POR:</b>	
<b>CONDICIÓN MUESTRA:</b>	Muestreo realizado en la Planta				
<b>RECEPCIÓN:</b>		<b>POR:</b>		<b>ENSAYO:</b>	
<b>TIPO DE CONTENEDOR:</b>	METÁLICO		<b>PROCEDIMIENTO:</b>	DETERMINACIÓN DE MASA EN AIRE	
	M	2	Número de muestra		
	TM	3	Número total de muestras		
	A	2,258.20	Masa de la Muestra [g]		
	D	7,411.40	Masa del contenedor lleno de agua a 25 ± 0.5 °C [g]		
	E	8,740.10	Masa del contenedor lleno con la muestra y agua a 25 ± 0.5 °C [g]		
	PS	No	Se utilizó el procedimiento suplementario para determinar A?		
<b>PROCEDIMIENTO SUPLEMENTARIO (Si Aplica)</b>					
	B	-	Masa de la bandeja [g]		
	MI	-	Masa inicial del conjunto abndaja y muestra húmeda [g]		
	CICLO	Masa [g]	Δ [%]		
	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
	7				
	8				
	A'		Masa inicial del conjunto abndaja y muestra húmeda [g]		
	Gmm	2.429	Gravedad Especifica Máxima Teorica		
<b>COMENTARIOS SOBRE EL ENSAYO</b>					

## ÁREA DE PAVIMENTOS

### GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

NORMA: AASHTO T 209-08		ORDEN:	HOJA:	3 de 3
CLIENTE:			SOLICITA:	
PROYECTO:			FISCALIZA:	
UBICACIÓN:	Av. Simon Bolivar		CONSTRUYE:	
PROVINCIA:	Pichincha	CANTÓN:	Quito	EMISIÓN:
ID MUESTRA:				
MEZCLA:			FECHA ELAB:	21-Sept-15
ORIGEN MUESTRA:				
MÉTODO:	N/D	MUESTREO:	N/D	POR:
CONDICIÓN MUESTRA:	Muestreo realizado en la Planta			
RECEPCIÓN:		POR:		ENSAYO:
TIPO DE CONTENEDOR:	METÁLICO	PROCEDIMIENTO:	DETERMINACIÓN DE MASA EN AIRE	
M	3	Número de muestra		
TM	3	Número total de muestras		
A	2,220.30	Masa de la Muestra [g]		
D	7,411.40	Masa del contenedor lleno de agua a 25 ± 0.5 °C [g]		
E	8,717.50	Masa del contenedor lleno con la muestra y agua a 25 ± 0.5 °C [g]		
PS	No	Se utilizó el procedimiento suplementario para determinar A?		
<b>PROCEDIMIENTO SUPLEMENTARIO (Si Aplica)</b>				
B	-	Masa de la bandeja [g]		
MI	-	Masa inicial del conjunto abndeya y muestra húmeda [g]		
CICLO	Masa [g]	Δ [%]		
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
A'		Masa inicial del conjunto abndeya y muestra húmeda [g]		
Gmm	2.429	Gravedad Especifica Máxima Teorica		
COMENTARIOS SOBRE EL ENSAYO				

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

Obra			SOLICITADO POR		
Localizacion	Sector Túnel de Guayasamín		ENSAYADO POR		
Muestra No	1		CALCULADO POR		
Profundidad			APROBADO POR		
Descripcion			FECHA		
NORMA	AASHTO T 27 - 06				
Serie Gruesa					
3"	76.2				
2 1/2"	64				
2"	50.8				
1 1/2"	38.1				
1"	25.4				
3/4"	19	36.50	36.50	3.20	96.80
1/2"	12.7	373.30	409.80	35.90	64.10
3/8"	9.51	141.00	550.80	48.25	51.75
Nº4	4.76	222.60	773.40	67.75	32.25
Nº8	2.362	94.80	868.2	76.06	23.94
Nº16	1.19	64.70	932.9	81.73	18.27
Nº30	0.595	44.50	977.4	85.62	14.38
Nº50	0.297	28.20	1005.6	88.09	11.91
Nº100	0.149	20.30	1025.90	89.87	10.13
Nº200	0.074	13.60	1039.50	91.06	8.94
Masa Total		<b>1039.50</b>			
			Peso Inicial Seco		<b>1141.50</b>

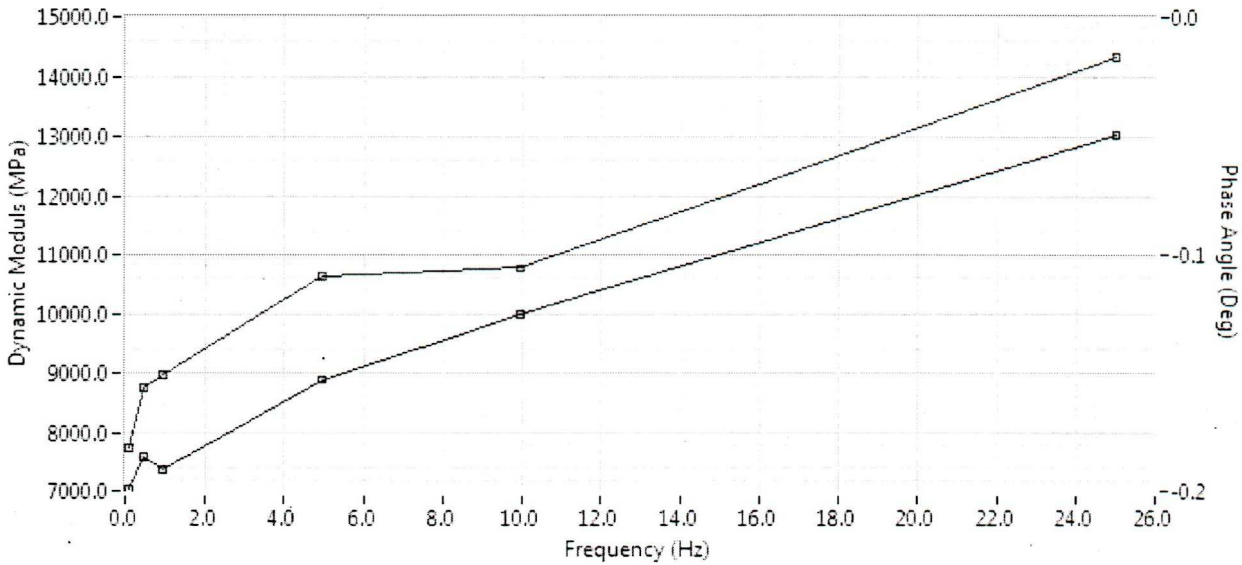
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test jue, 28 de ene de 2016 @ 9:30  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_N1  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	-10.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.6

Height (mm)	138.1
Target strain (ustrain)	100



Dynamic Modulus

Phase Angle

**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	14316.7	10752.9	10612.3	8939.0	8731.8	7724.8
Phase angle (Deg) [24]	-0.049825	-0.125909	-0.153140	-0.191199	-0.186060	-0.199755
Strain magnitude [20]	43.566590	32.245895	33.051314	33.111564	33.436866	31.125573
Stress magnitude (kPa) [06]	623.728977	346.735388	350.749905	295.985621	291.964088	240.438258
Average strain error [21]	0.050355	0.064702	0.074803	0.085642	0.084452	0.091495
Uniformity coefficient for strain [22]	0.698619	0.641628	0.634601	0.623506	0.605442	0.559703
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.235110	0.029768	0.012784	0.007591	0.016306	0.009359

Data File TEJ\_N1\_2.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

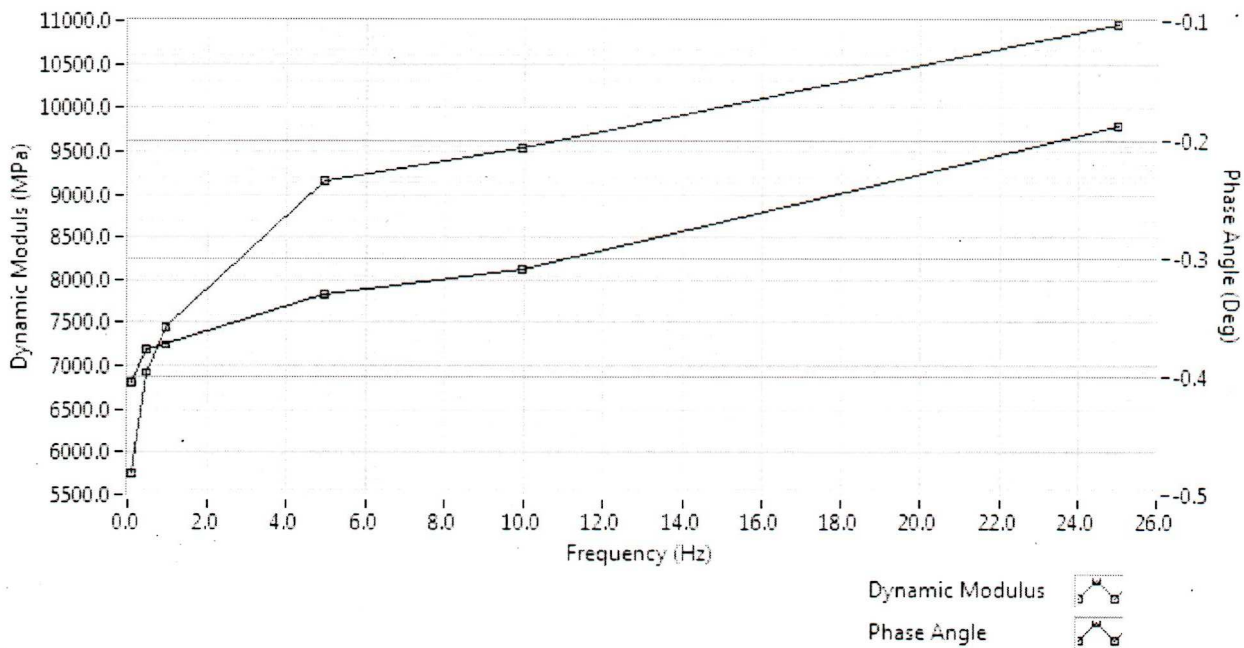
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test jue, 28 de ene de 2016 @ 14:28  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_N1.1  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	4.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.6

Height (mm)	138.1
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	10951.1	9530.2	9147.1	7434.8	6913.7	5744.0
Phase angle (Deg) [24]	-0.188625	-0.309792	-0.331193	-0.373877	-0.377970	-0.405483
Strain magnitude [20]	45.210997	33.594903	35.261329	36.358447	37.399851	36.243737
Stress magnitude (kPa) [06]	495.110072	320.167546	322.540151	270.318457	258.569751	208.182964
Average strain error [21]	0.051295	0.075388	0.080907	0.088166	0.087611	0.102250
Uniformity coefficient for strain [22]	0.796904	0.843280	0.871973	0.857028	0.863986	0.875938
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.338682	0.231250	0.135968	0.109363	0.116418	0.135586

Data File TEJ\_N1.1\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

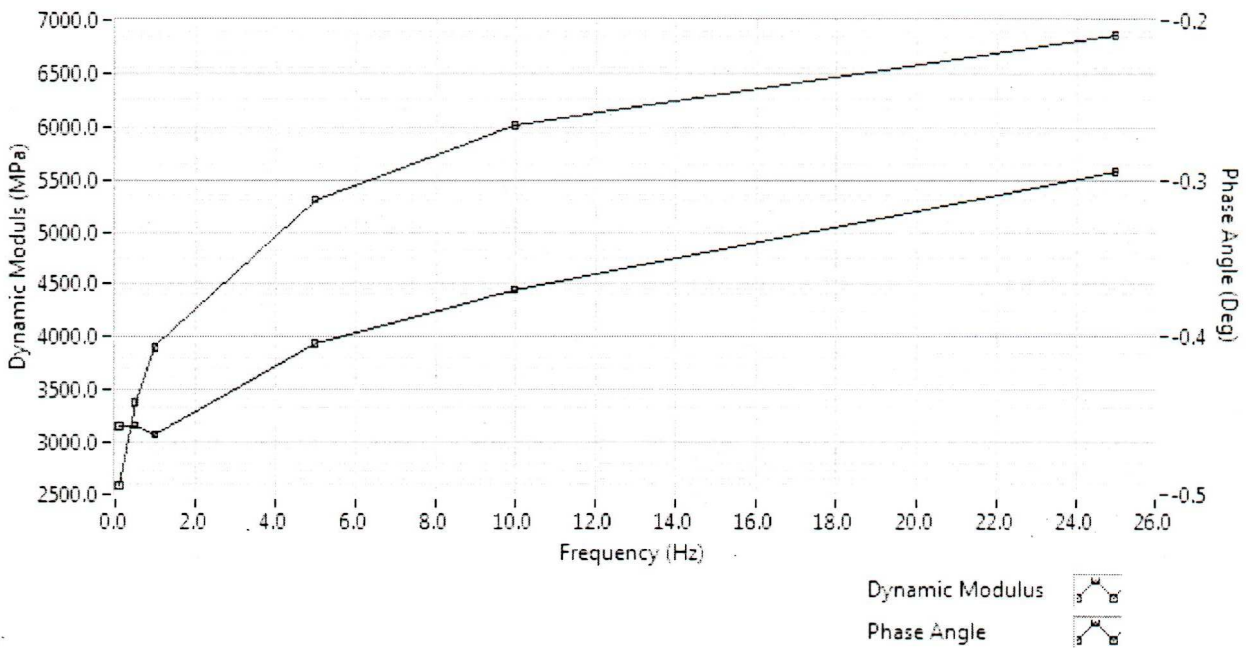
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 9:00  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_N1.2  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	21.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.6

Height (mm)	138.1
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	6846.9	6008.1	5300.7	3886.5	3378.6	2573.0
Phase angle (Deg) [24]	-0.295470	-0.370973	-0.405289	-0.462051	-0.456374	-0.456517
Strain magnitude [20]	49.149817	40.484393	44.017811	45.087716	46.695163	46.063326
Stress magnitude (kPa) [06]	336.525274	243.235063	233.326596	175.235002	157.765381	118.520945
Average strain error [21]	0.047695	0.061013	0.068341	0.095131	0.104073	0.108526
Uniformity coefficient for strain [22]	0.609512	0.585458	0.578802	0.508279	0.472167	0.370344
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.253862	0.183782	0.076613	0.036054	0.032764	0.027737

Data File TEJ\_N1.2\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

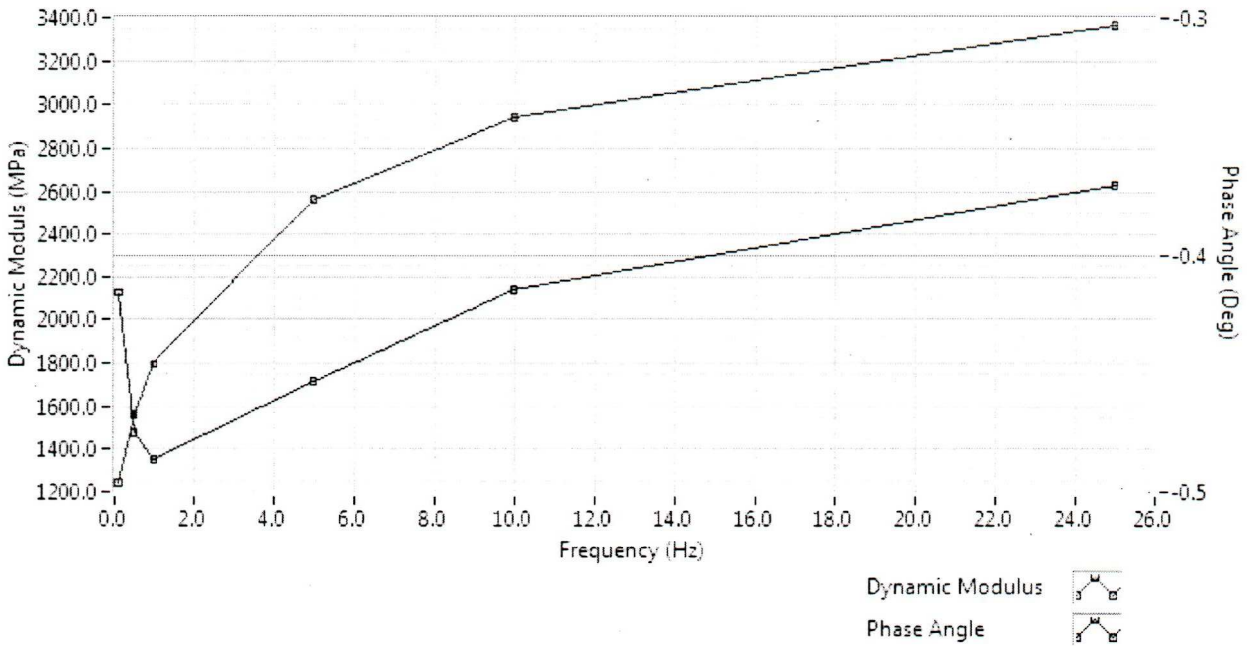
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 14:16  
 Report Number  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_N1.3  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test temperature (DegC)	34.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.6

Height (mm)	138.1
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	3359.9	2936.1	2555.4	1792.0	1560.8	1237.0
Phase angle (Deg) [24]	-0.370389	-0.414793	-0.453374	-0.486427	-0.475200	-0.416250
Strain magnitude [20]	51.973601	47.317338	50.488651	50.323046	50.988110	50.678432
Stress magnitude (kPa) [06]	174.624595	138.927051	129.017341	90.177922	79.580931	62.691483
Average strain error [21]	0.049041	0.065485	0.072522	0.098541	0.095696	0.104851
Uniformity coefficient for strain [22]	0.658782	0.625371	0.609908	0.485284	0.436550	0.402875
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.219366	0.450207	0.285774	0.245723	0.249558	0.203323

Data File TEJ\_N1.3\_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:  
 Bulk Density:  
 Poisson's Ratio:  
 Description of asphaltic material:  
 How it was mixed:  
 How it was compacted:  
 How bulk density was determined:  
 How the specimen was stored:

Signed

Date

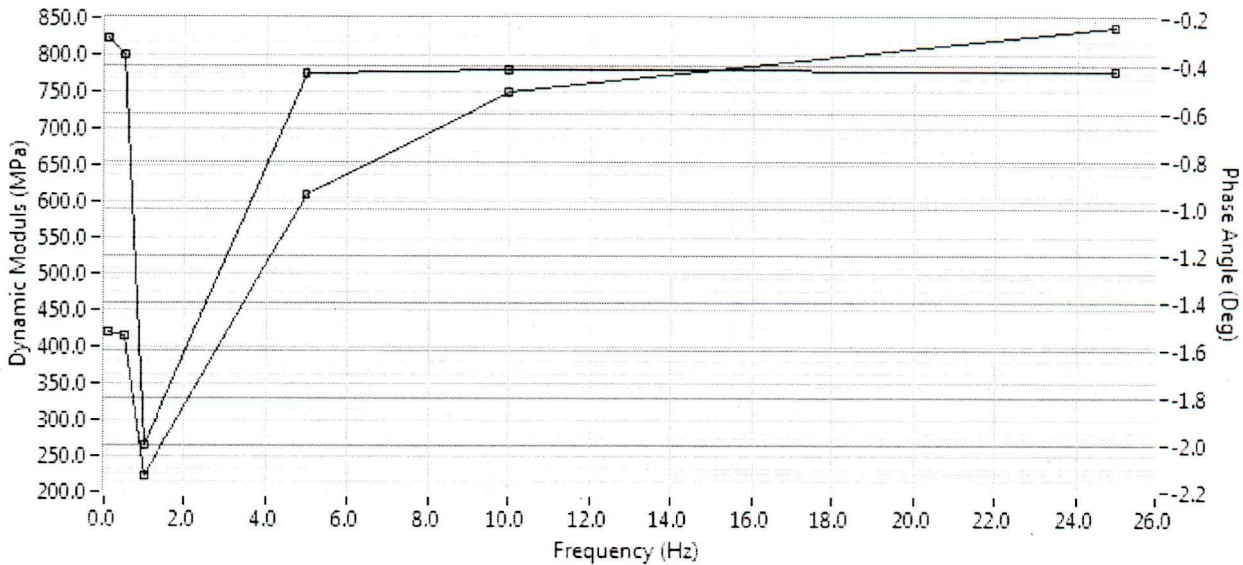
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 18:19  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID ETJ\_N1.4  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	54.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.6

Height (mm)	138.1
Target strain (ustrain)	100



Dynamic Modulus

Phase Angle

**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	836.0	747.7	608.3	220.7	413.0	417.5
Phase angle (Deg) [24]	-0.429522	-0.420057	-0.432558	-2.002464	-0.355671	-0.286881
Strain magnitude [20]	51.887060	53.621362	50.914245	0.243108	109.455846	195.526048
Stress magnitude (kPa) [06]	43.375481	40.094890	30.969286	0.053649	45.207672	81.641195
Average strain error [21]	0.044461	0.058089	0.057375	5.608864	0.078812	0.139747
Uniformity coefficient for strain [22]	0.018689	0.090532	0.134683	0.000106	0.187868	0.182422
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.121527	1.105325	0.087673	-0.030256	0.010428	0.016602

Data File ETJ\_N1.4\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:  
 Poisson's Ratio:  
 Description of asphaltic material:  
 How it was mixed:  
 How it was compacted:  
 How bulk density was determined:  
 How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

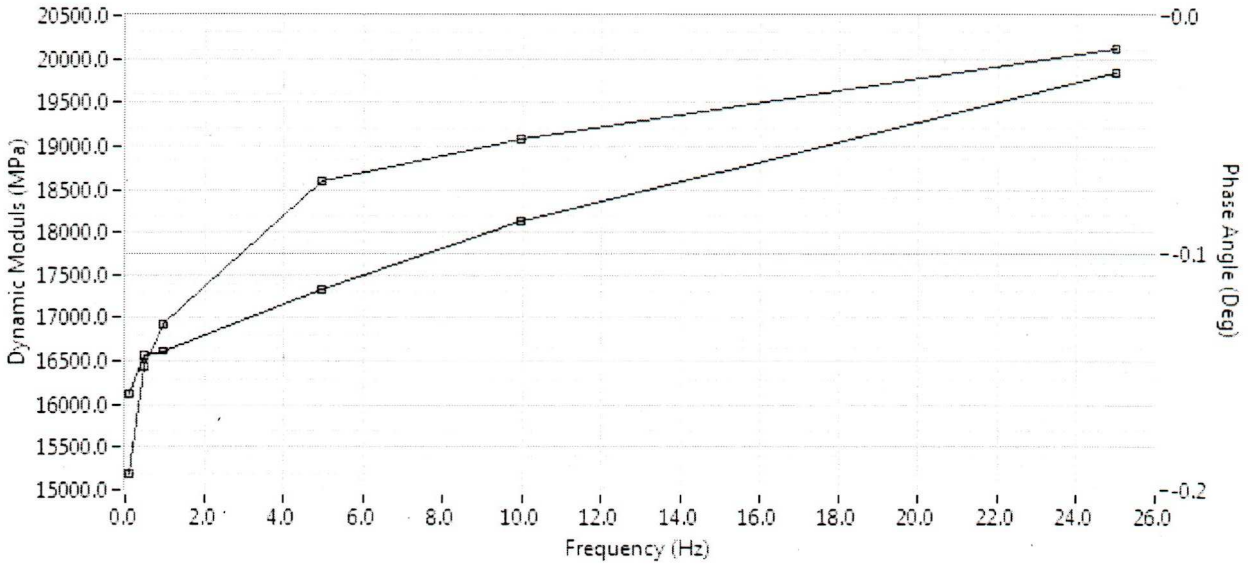
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test jue, 28 de ene de 2016 @ 8:41  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_N2  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test temperature (DegC)	-10.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.9

Height (mm)	135.3
Target strain (ustrain)	100



Dynamic Modulus

Phase Angle

**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	20109.2	19077.7	18579.6	16918.3	16419.2	15184.3
Phase angle (Deg) [24]	-0.024466	-0.086455	-0.115793	-0.141651	-0.143713	-0.159612
Strain magnitude [20]	40.953251	25.549510	28.490627	27.078832	27.525109	24.734682
Stress magnitude (kPa) [06]	823.538628	487.425153	529.344572	458.128902	451.940235	375.578530
Average strain error [21]	0.050885	0.065563	0.052412	0.055112	0.052340	0.072519
Uniformity coefficient for strain [22]	0.349885	0.299742	0.302144	0.283724	0.265738	0.228333
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.711358	0.093802	0.049708	0.043772	0.046272	0.042079

Data File TEJ\_N2\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

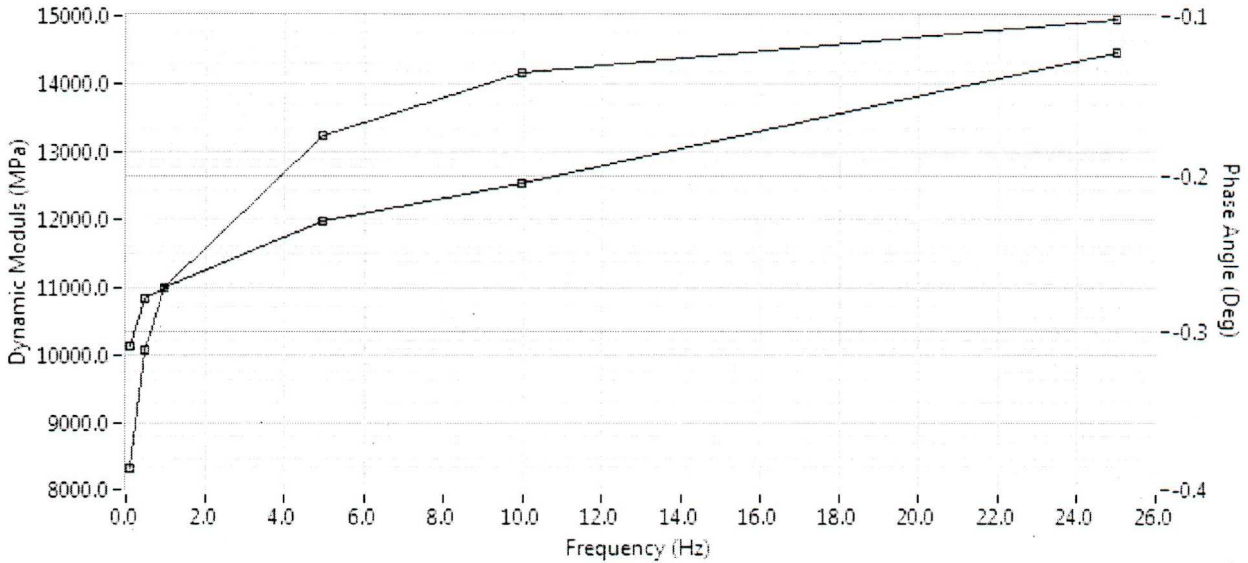
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test jue, 28 de ene de 2016 @ 14:55  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_N2.1  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	4.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.9

Height (mm)	135.3
Target strain (ustrain)	100



Dynamic Modulus

Phase Angle

**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	14922.6	14150.0	13236.9	10960.7	10051.4	8300.9
Phase angle (Deg) [24]	-0.124156	-0.205367	-0.229558	-0.272759	-0.279521	-0.309423
Strain magnitude [20]	44.771754	30.559646	33.970176	34.064896	35.245634	33.253133
Stress magnitude (kPa) [06]	668.110955	432.418988	449.660822	373.376705	354.267557	276.030635
Average strain error [21]	0.043450	0.060110	0.054062	0.059405	0.064616	0.077793
Uniformity coefficient for strain [22]	0.048427	0.148551	0.142565	0.152210	0.160825	0.193055
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.236512	0.093799	0.045538	0.039230	0.038753	0.040296

Data File TEJ\_N2.1\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

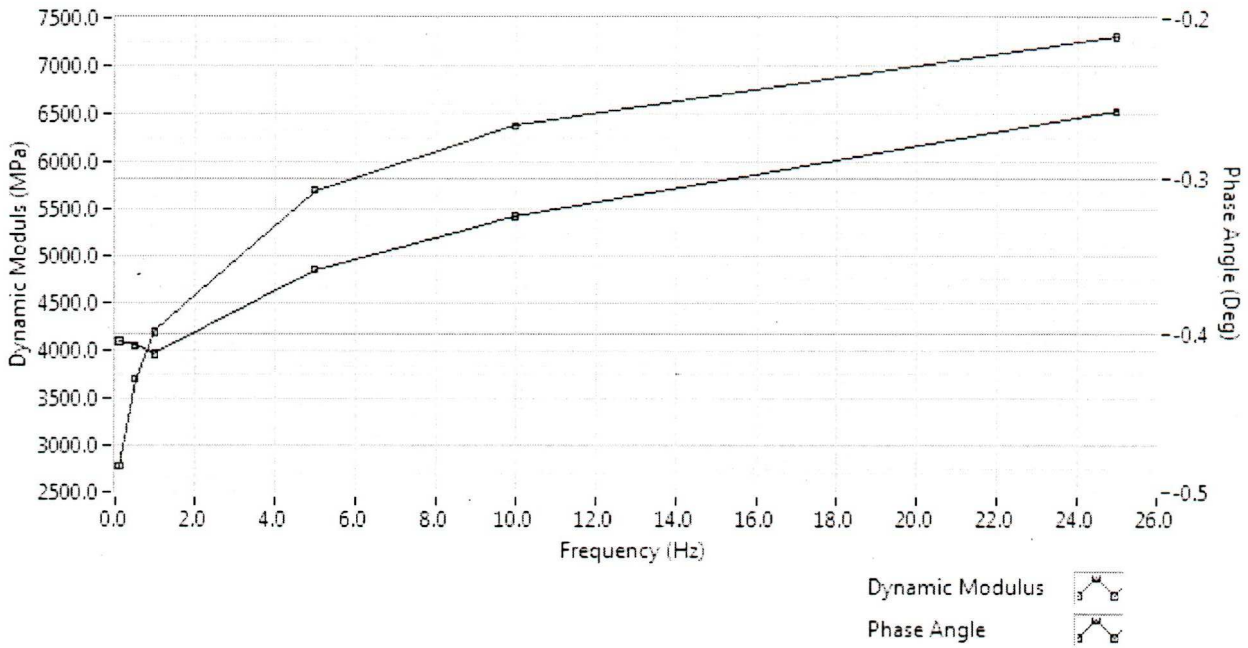
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 9:24  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_N2.2  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	21.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.9

Height (mm)	135.3
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	7303.3	6364.9	5690.8	4183.3	3689.1	2766.5
Phase angle (Deg) [24]	-0.258902	-0.325625	-0.359353	-0.413282	-0.407722	-0.405282
Strain magnitude [20]	47.488426	41.009410	42.084571	43.696457	44.756900	43.792538
Stress magnitude (kPa) [06]	346.819981	261.022786	239.492839	182.793284	165.111227	121.153672
Average strain error [21]	0.050759	0.054139	0.052626	0.077343	0.084223	0.096635
Uniformity coefficient for strain [22]	0.065927	0.056316	0.055947	0.018810	0.001253	0.016624
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.174601	0.098850	0.051439	0.039818	0.034067	0.027081

Data File TEJ\_N2.2\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:  
 Poisson's Ratio:  
 Description of asphaltic material:  
 How it was mixed:  
 How it was compacted:  
 How bulk density was determined:  
 How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

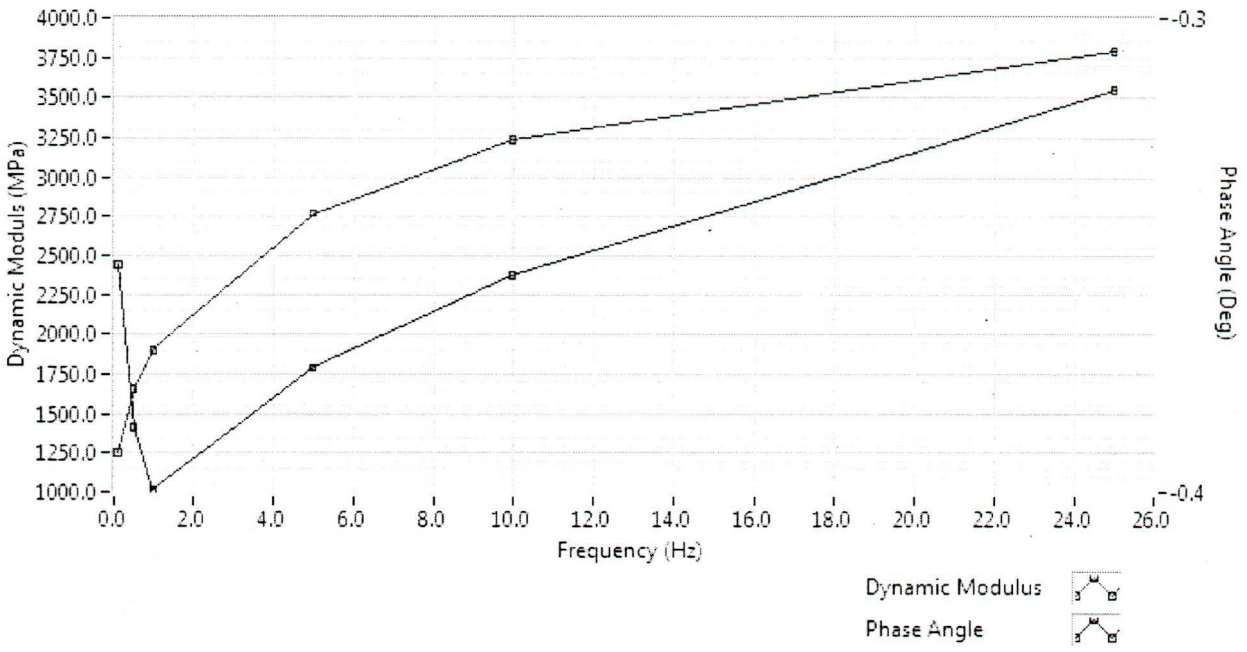
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 12:49  
 Report Number  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_N2.3  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test temperature (DegC)	37.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.9

Height (mm)	135.3
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	3784.4	3229.9	2763.0	1891.4	1653.7	1244.0
Phase angle (Deg) [24]	-0.315229	-0.354343	-0.373881	-0.399911	-0.386298	-0.352194
Strain magnitude [20]	49.388726	44.170776	45.901231	47.247508	47.769741	46.488218
Stress magnitude (kPa) [06]	186.905836	142.667140	126.825241	89.364531	78.995455	57.831656
Average strain error [21]	0.045940	0.053491	0.060810	0.077587	0.086152	0.103124
Uniformity coefficient for strain [22]	0.315444	0.316598	0.316374	0.322324	0.333105	0.364374
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.042666	0.036689	0.046596	0.045369	0.052882	0.063499

Data File TEJ\_N2.3\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed

Date

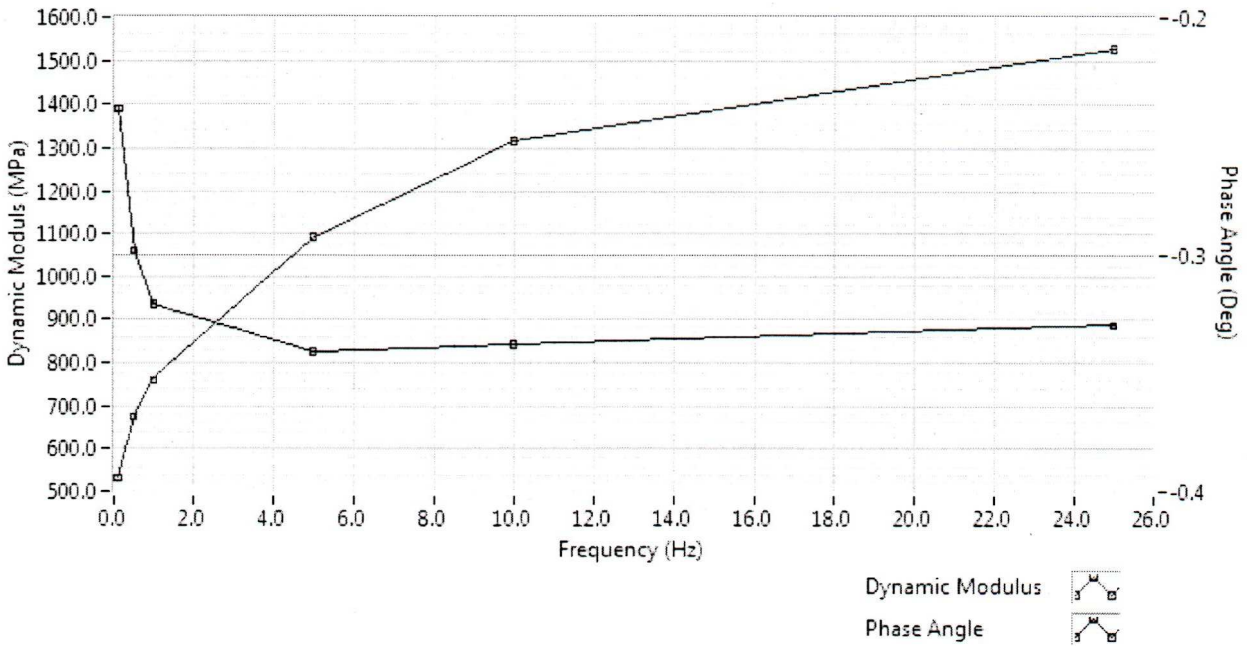
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 16:45  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_N2.4  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	54.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.9

Height (mm)	135.3
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	1524.4	1315.1	1088.2	758.2	673.1	529.6
Phase angle (Deg) [24]	-0.329991	-0.338387	-0.341023	-0.321050	-0.298644	-0.238513
Strain magnitude [20]	50.689304	55.728988	53.859051	49.799443	50.719433	49.953007
Stress magnitude (kPa) [06]	77.271698	73.288986	58.610725	37.756675	34.139338	26.456191
Average strain error [21]	0.044012	0.056224	0.070719	0.072978	0.069870	0.063306
Uniformity coefficient for strain [22]	0.003947	0.046328	0.069841	0.096061	0.098452	0.144125
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.041566	0.092925	0.039688	0.016227	0.007113	0.001562

Data File TEJ\_N2.4\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

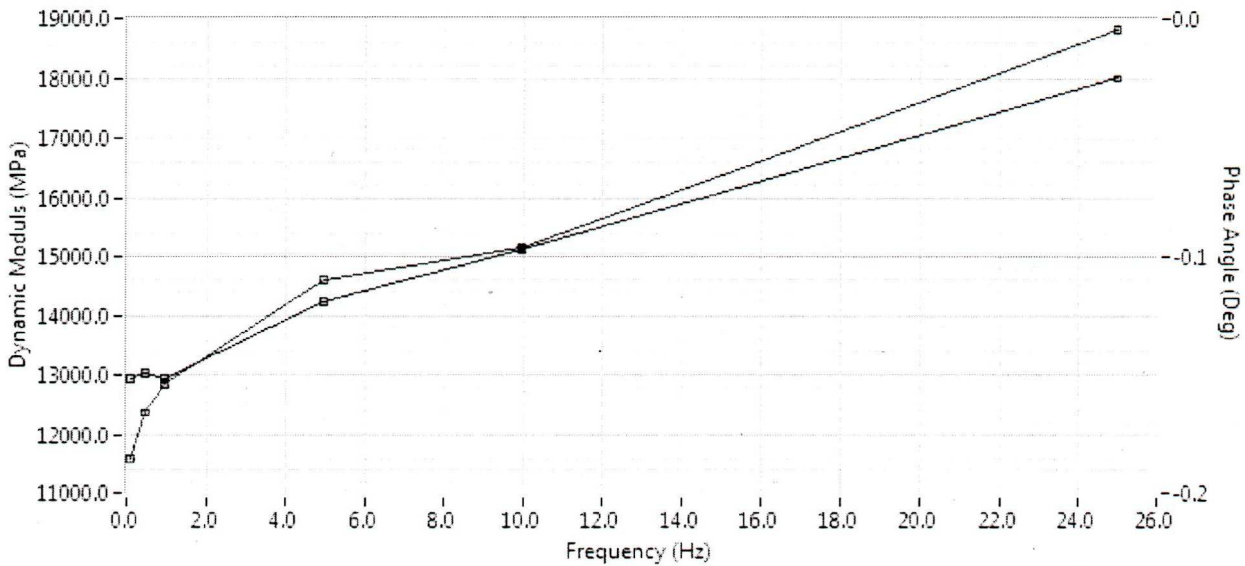
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test jue, 28 de ene de 2016 @ 9:03  
 Report Number  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_N3  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test temperature (DegC)	-10.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.9

Height (mm)	133.3
Target strain (ustrain)	100



Dynamic Modulus

Phase Angle

**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	18792.7	15136.6	14576.8	12826.4	12353.3	11572.9
Phase angle (Deg) [24]	-0.025417	-0.097232	-0.119428	-0.152291	-0.149581	-0.151953
Strain magnitude [20]	42.640560	28.733727	30.865881	30.314054	30.301054	27.365169
Stress magnitude (kPa) [06]	801.333380	434.929969	449.926127	388.818787	374.318589	316.693628
Average strain error [21]	0.053847	0.056758	0.063233	0.059081	0.065067	0.075489
Uniformity coefficient for strain [22]	0.071494	0.119924	0.115263	0.151367	0.156434	0.209682
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.282675	0.042912	0.033327	0.027107	0.026422	0.032918

Data File TEJ\_N3\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed

Date

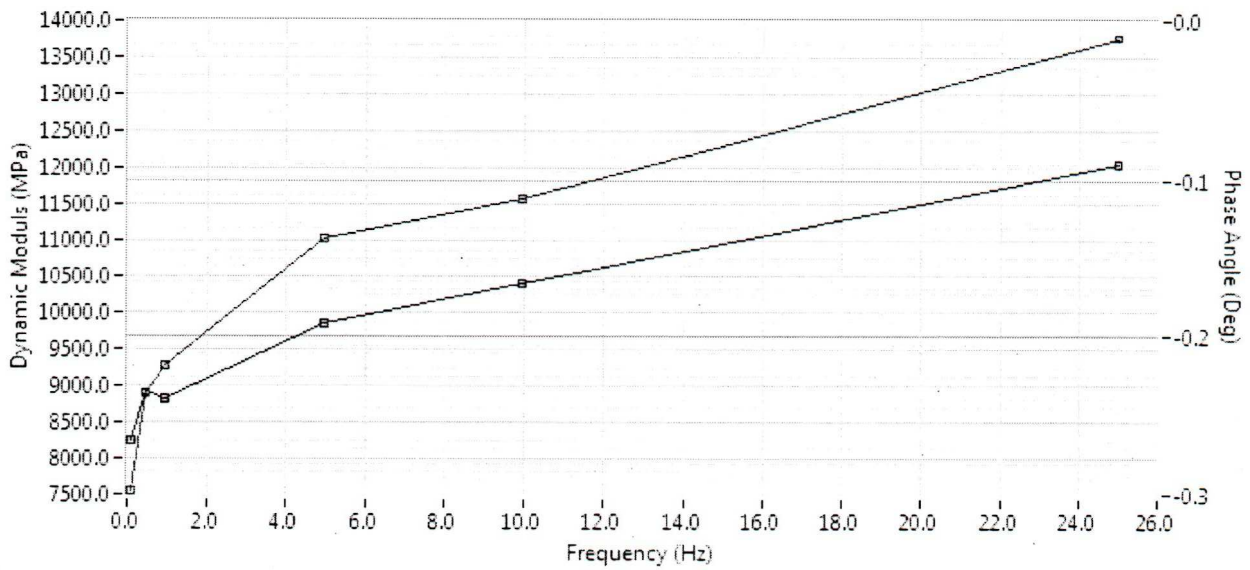
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test jue, 28 de ene de 2016 @ 15:19  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_N3.1  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	4.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.9

Height (mm)	133.3
Target strain (ustrain)	100



Dynamic Modulus

Phase Angle

**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	13747.6	11562.2	11001.3	9260.5	8892.1	7532.5
Phase angle (Deg) [24]	-0.090329	-0.166640	-0.192252	-0.239367	-0.235410	-0.265741
Strain magnitude [20]	44.442883	32.360112	33.821395	33.973346	34.288835	33.381214
Stress magnitude (kPa) [06]	610.984733	374.155294	372.078042	314.611720	304.899384	251.445022
Average strain error [21]	0.039156	0.049759	0.051393	0.058156	0.063881	0.077985
Uniformity coefficient for strain [22]	0.041820	0.049215	0.063268	0.104288	0.132899	0.142743
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.117993	0.036954	0.028037	0.025558	0.034032	0.032449

Data File TEJ\_N3.1\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

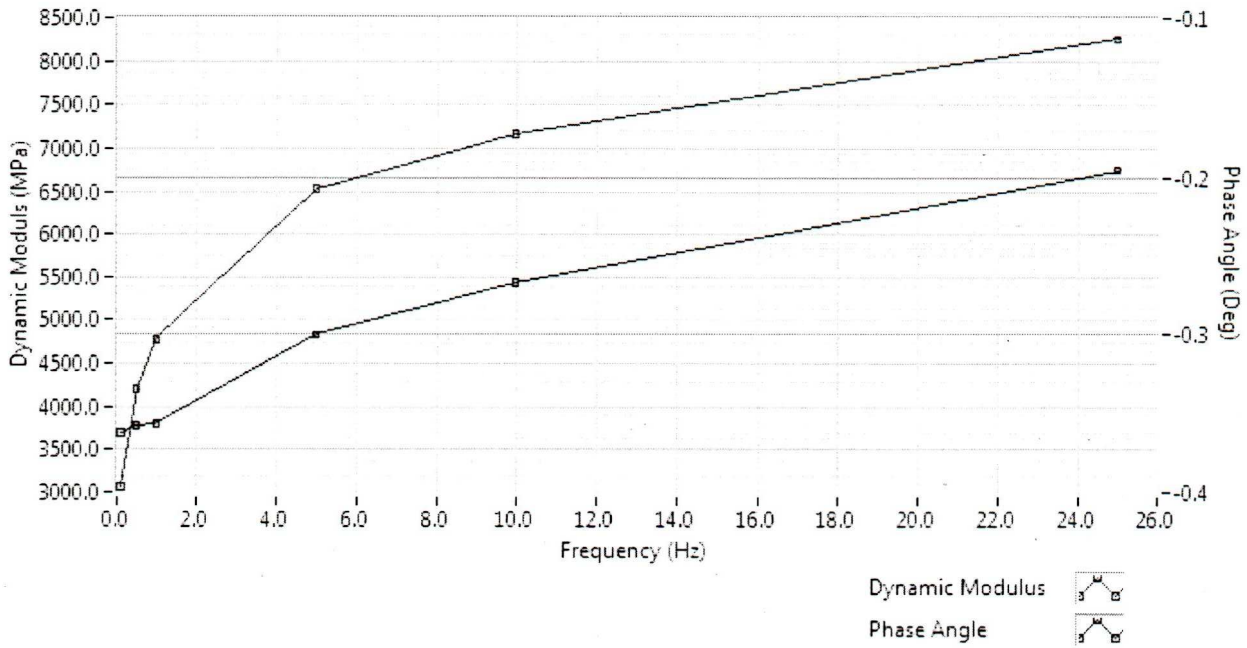
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 9:45  
 Report Number  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_N3.2  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test temperature (DegC)	21.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.9

Height (mm)	133.3
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	8247.1	7154.0	6520.5	4761.0	4192.2	3057.7
Phase angle (Deg) [24]	-0.195977	-0.267895	-0.300876	-0.356874	-0.358490	-0.362527
Strain magnitude [20]	44.983747	36.767740	39.991649	42.007736	43.140933	42.678429
Stress magnitude (kPa) [06]	370.987014	263.037822	260.767307	199.999033	180.855464	130.498254
Average strain error [21]	0.035353	0.048652	0.049035	0.077249	0.091021	0.102232
Uniformity coefficient for strain [22]	0.020035	0.037651	0.044212	0.049755	0.055260	0.053496
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.003098	0.005826	0.002078	0.003185	0.005784	0.001181

Data File TEJ\_N3.2\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed

Date

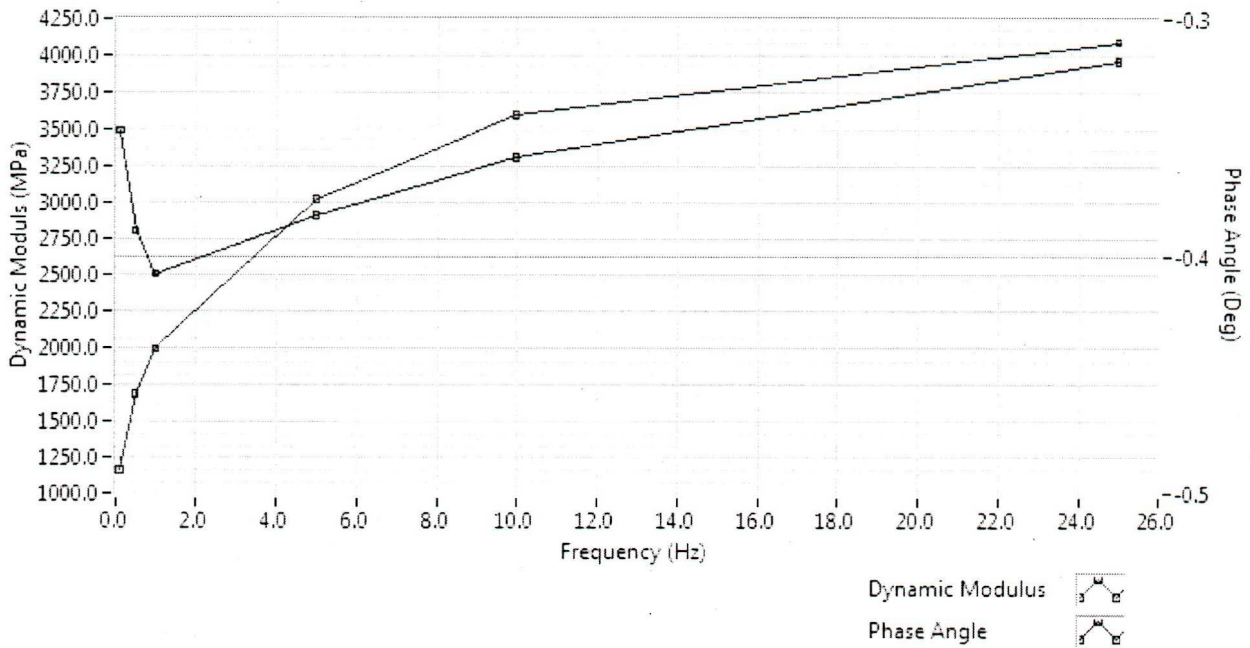
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03.**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 13:11  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_N3.3  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	37.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.3

Height (mm)	133.3
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	4086.1	3593.6	3014.1	1986.5	1680.7	1155.9
Phase angle (Deg) [24]	-0.318139	-0.358311	-0.382652	-0.407748	-0.389290	-0.347021
Strain magnitude [20]	49.380343	43.776933	47.597383	47.962823	48.819659	48.420686
Stress magnitude (kPa) [06]	201.771706	157.316781	143.462827	95.276316	82.052083	55.968514
Average strain error [21]	0.035826	0.049477	0.056986	0.073499	0.077184	0.084558
Uniformity coefficient for strain [22]	0.030030	0.044256	0.059510	0.116615	0.141650	0.198570
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.024562	0.006336	0.000612	0.000866	0.000375	0.006393

Data File TEJ\_N3.3\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

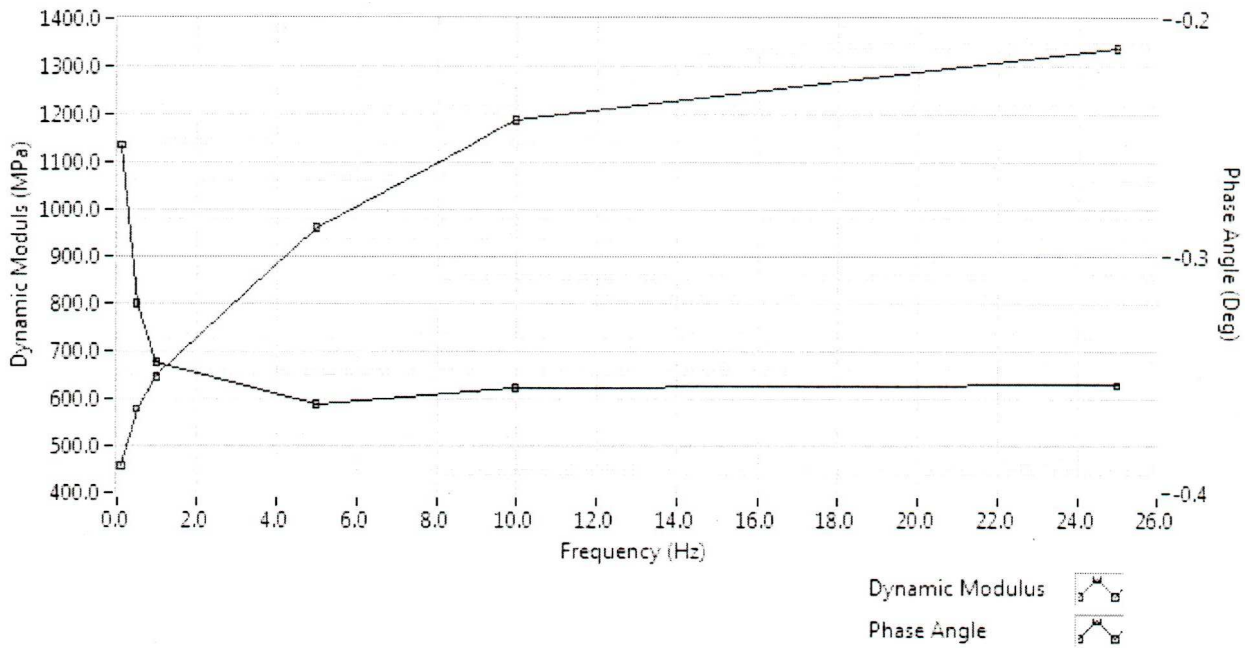
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 17:07  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_N3.4  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	54.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.9

Height (mm)	133.3
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	1336.5	1185.0	958.2	644.9	576.5	454.4
Phase angle (Deg) [24]	-0.354646	-0.355794	-0.363051	-0.345178	-0.320304	-0.253194
Strain magnitude [20]	52.410929	53.387014	53.697046	51.092461	51.454393	50.611789
Stress magnitude (kPa) [06]	70.046536	63.264337	51.454046	32.947607	29.660999	22.999477
Average strain error [21]	0.038153	0.053057	0.062792	0.058983	0.061218	0.058861
Uniformity coefficient for strain [22]	0.125066	0.135911	0.140792	0.169387	0.175056	0.150590
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.001533	0.033486	0.013677	0.021898	0.024236	0.014871

Data File TEJ\_N3.4\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

*Anexo 8 Resultado de los ensayos de caracterización de la  
mezcla 3*

## ÁREA DE PAVIMENTOS

NORMA: AASHTO T308-08		ORDEN:		HOJA	1 de 3
CLIENTE:	Planta Asfáltica Ocampo			SOLICITA:	
PROYECTO:				FISCALIZA:	
UBICACIÓN:	Mitad del Mundo			CONSTRUYE:	
PROVINCIA:	Pichincha	CANTÓN:	Quito	EMISIÓN:	
ID MUESTRA:					
MEZCLA:				FECHA ELAB:	
ORIGEN MUESTRA:					
MÉTODO:		MUESTREO :		POR:	
CONDICIÓN MUESTRA:					
RECEPCIÓN:		POR:		ENSAYO:	
MÉTODO DE ENSAYO:	A	TIPO DE HORNO:		IRRADIACIÓN IR	
¿SE DETERMINÓ CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA?		NO	MASA CTE.	SI	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	Si fue determinado por AASHTO T 329				
¿SE DETERMINÓ CORRECCIÓN DE LIGANTE ASFÁLTICO?		NO	Cr		
<b>Mb</b>	3391.44	<i>Masa del conjunto bandeja (balanza externa) [g]</i>			
<b>Mti</b>	4615.37	<i>Masa total inicial (balanza externa) [g]</i>			
<b>Mi</b>	1223.93	<i>Masa de muestra inicial (Mti-Mb) [g]</i>			
<b>Mth</b>	4618	<i>Masa total (balanza horno) [g] (Aplica en Método A)</i>			
<b>ΔM</b>	2.63	<i>Comprobar si esta dentro de ± 5 g (Aplica en Método A)</i>			
<b>Mtf</b>	4511.71	<i>Masa total final (balanza externa) [g]</i>			
<b>Mf</b>	1120.27	<i>Masa de muestra inicial (Mtf-Mb) [g]</i>			
<b>Pb</b>	8.25	<i>Porcentaje de pérdida (valor del ticket) [%] (Aplica en Método A)</i>			
<b>¿CORRECCIÓN INCLUIDA EN EL TICKET?</b>		NO	(Aplica en Método A)		
<b>Pb c</b>		Contenido de ligante corregido [%]			
<b>T</b>		Temperatura de ensayo [°C]			
<b>COMENTARIOS SOBRE EL ENSAYO:</b>					
Se trabaja con material disgregado a partir de mezcla asfáltica compactada					

## ÁREA DE PAVIMENTOS

NORMA: AASHTO T308-08		ORDEN:		HOJA	1 de 3
CLIENTE:	Planta Asfáltica Ocampo			SOLICITA:	
PROYECTO:				FISCALIZA:	
UBICACIÓN:	Mitad del Mundo			CONSTRUYE:	
PROVINCIA:	Pichincha	CANTÓN:	Quito	EMISIÓN:	
ID MUESTRA:					
MEZCLA:				FECHA ELAB:	
ORIGEN MUESTRA:					
MÉTODO:		MUESTREO :		POR:	
CONDICIÓN MUESTRA:					
RECEPCIÓN:		POR:		ENSAYO:	
MÉTODO DE ENSAYO:	A	TIPO DE HORNO:		IRRADIACIÓN IR	
¿SE DETERMINÓ CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA?		NO	MASA CTE.	SI	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	Si fue determinado por AASHTO T 329				
¿SE DETERMINÓ CORRECCIÓN DE LIGANTE ASFÁLTICO?		NO	Cr		
<b>Mb</b>	3388.37	<i>Masa del conjunto bandeja (balanza externa) [g]</i>			
<b>Mti</b>	4641.34	<i>Masa total inicial (balanza externa) [g]</i>			
<b>Mi</b>	1252.97	<i>Masa de muestra inicial (Mti-Mb) [g]</i>			
<b>Mth</b>	4643.8	<i>Masa total (balanza horno) [g] (Aplica en Método A)</i>			
<b>ΔM</b>	2.46	<i>Comprobar si esta dentro de ± 5 g (Aplica en Método A)</i>			
<b>Mtf</b>	4541.37	<i>Masa total final (balanza externa) [g]</i>			
<b>Mf</b>	1153	<i>Masa de muestra inicial (Mtf-Mb) [g]</i>			
<b>Pb</b>	7.76	<i>Porcentaje de pérdida (valor del ticket) [%] (Aplica en Método A)</i>			
<b>¿CORRECCIÓN INCLUIDA EN EL TICKET?</b>		NO	(Aplica en Método A)		
<b>Pb c</b>		Contenido de ligante corregido [%]			
<b>T</b>		Temperatura de ensayo [°C]			
<b>COMENTARIOS SOBRE EL ENSAYO:</b>					
Se trabaja con material disgregado a partir de mezcla asfáltica compactada					

## ÁREA DE PAVIMENTOS

NORMA: AASHTO T308-08		ORDEN:		HOJA	1 de 3
CLIENTE:	Planta Asfáltica Ocampo			SOLICITA:	
PROYECTO:				FISCALIZA:	
UBICACIÓN:	Mitad del Mundo			CONSTRUYE:	
PROVINCIA:	Pichincha	CANTÓN:	Quito	EMISIÓN:	
ID MUESTRA:					
MEZCLA:				FECHA ELAB:	
ORIGEN MUESTRA:					
MÉTODO:		MUESTREO :		POR:	
CONDICIÓN MUESTRA:					
RECEPCIÓN:		POR:		ENSAYO:	
MÉTODO DE ENSAYO:	A	TIPO DE HORNO:		IRRADIACIÓN IR	
¿SE DETERMINÓ CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA?		NO	MASA CTE.	SI	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	Si fue determinado por AASHTO T 329				
¿SE DETERMINÓ CORRECCIÓN DE LIGANTE ASFÁLTICO?		NO	Cr		
<b>Mb</b>	3380.73	<i>Masa del conjunto bandeja (balanza externa) [g]</i>			
<b>Mti</b>	4633.54	<i>Masa total inicial (balanza externa) [g]</i>			
<b>Mi</b>	1252.81	<i>Masa de muestra inicial (Mti-Mb) [g]</i>			
<b>Mth</b>	4636.1	<i>Masa total (balanza horno) [g] (Aplica en Método A)</i>			
<b>ΔM</b>	2.56	<i>Comprobar si esta dentro de ± 5 g (Aplica en Método A)</i>			
<b>Mtf</b>	4532.03	<i>Masa total final (balanza externa) [g]</i>			
<b>Mf</b>	1151.3	<i>Masa de muestra inicial (Mtf-Mb) [g]</i>			
<b>Pb</b>	8.07	<i>Porcentaje de pérdida (valor del ticket) [%] (Aplica en Método A)</i>			
<b>¿CORRECCIÓN INCLUIDA EN EL TICKET?</b>		NO	(Aplica en Método A)		
<b>Pb c</b>		Contenido de ligante corregido [%]			
<b>T</b>		Temperatura de ensayo [°C]			
<b>COMENTARIOS SOBRE EL ENSAYO:</b>					
Se trabaja con material disgregado a partir de mezcla asfáltica compactada					





PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR					
FACULTAD DE INGENIERÍA					
LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN					
Obra		SOLICITADO POR			
Localizacion	Sector Mitad del mundo	ENSAYADO POR			
Muestra No	1	CALCULADO POR			
Profundidad		APROBADO POR			
Descripcion		FECHA			
NORMA	AASHTO T 27 - 06				
GRANULOMETRIA DE AGREGADOS					
MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL (gr)	MASA RETENIDA ACUMULADA (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
Serie Gruesa					
3"	76.2				
2 1/2"	64				
2"	50.8				
1 1/2"	38.1				
1"	25.4	8.23	8.23	0.73	99.27
3/4"	19	9.22	17.45	1.56	98.44
1/2"	12.7	100.66	118.11	10.54	89.46
3/8"	9.51	111.27	229.38	20.48	79.52
Nº4	4.76	156.26	385.64	34.42	65.58
Nº8	2.362	117.93	503.57	44.95	55.05
Nº16	1.19	116.19	619.76	55.32	44.68
Nº30	0.595	109.50	729.26	65.10	34.90
Nº50	0.297	108.28	837.54	74.76	25.24
Nº100	0.149	127.43	964.97	86.14	13.86
Nº200	0.074	75.32	1040.29	92.86	7.14
Masa Total		<b>1032.06</b>			
			Peso Inicial Seco		<b>1120.27</b>

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR					
FACULTAD DE INGENIERÍA					
LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN					
Obra		SOLICITADO POR			
Localizacion	Sector Mitad del mundo	ENSAYADO POR			
Muestra No	2	CALCULADO POR			
Profundidad		APROBADO POR			
Descripcion		FECHA			
NORMA	AASHTO T 27 - 06				
GRANULOMETRIA DE AGREGADOS					
MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL (gr)	MASA RETENIDA ACUMULADA (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
Serie Guesa					
3"	76.2				
2 1/2"	64				
2"	50.8				
1 1/2"	38.1				
1"	25.4	12.44	12.44	1.08	98.92
3/4"	19	16.99	29.43	2.55	97.45
1/2"	12.7	57.69	87.12	7.56	92.44
3/8"	9.51	128.78	215.90	18.73	81.27
N°4	4.76	239.03	454.93	39.46	60.54
N°8	2.362	120.43	575.36	49.90	50.10
N°16	1.19	105.03	680.39	59.01	40.99
N°30	0.595	98.02	778.41	67.51	32.49
N°50	0.297	99.03	877.44	76.10	23.90
N°100	0.149	120.61	998.05	86.56	13.44
N°200	0.074	76.84	1074.89	93.23	6.77
Masa Total		<b>1062.45</b>			
			Peso Inicial Seco		<b>1153.00</b>

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR					
FACULTAD DE INGENIERÍA					
LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN					
Obra		SOLICITADO POR			
Localizacion	Sector Mitad del mundo	ENSAYADO POR			
Muestra No	3	CALCULADO POR			
Profundidad		APROBADO POR			
Descripcion		FECHA			
NORMA	AASHTO T 27 - 06				
GRANULOMETRIA DE AGREGADOS					
MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL (gr)	MASA RETENIDA ACUMULADA (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
Serie Gruesa					
3"	76.2				
2 1/2"	64				
2"	50.8				
1 1/2"	38.1	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.4	9.87	9.87	0.86	99.14
3/4"	19	3.90	13.77	1.20	98.80
1/2"	12.7	116.05	129.82	11.32	88.68
3/8"	9.51	80.53	210.35	18.34	81.66
Nº4	4.76	186.11	396.46	34.57	65.43
Nº8	2.362	121.06	517.52	45.13	54.87
Nº16	1.19	117.00	634.52	55.33	44.67
Nº30	0.595	112.90	747.42	65.17	34.83
Nº50	0.297	110.73	858.15	74.83	25.17
Nº100	0.149	126.58	984.73	85.86	14.14
Nº200	0.074	73.52	1058.25	92.28	7.72
Masa Total		<b>1048.38</b>			
			Peso Inicial Seco		<b>1146.84</b>

**ÁREA DE PAVIMENTOS**  
**GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD**  
**DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE**

NORMA: AASHTO T 209-08      ORDEN:      HOJA: 1 de 3

CLIENTE:      SOLICITA:      PROYECTO:      FISCALIZA:      UBICACIÓN: Mitad del Mundo      CONSTRUYE:      PROVINCIA: Pichincha      CANTÓN: Quito      EMISIÓN:

ID MUESTRA:      MEZCLA:      FECHA ELAB:      ORIGEN:      MÉTODO: N/D      MUESTREO: N/D      POR:      CONDICIÓN: Muestreo realizado en la Planta      RECEPCIÓN:      POR:      ENSAYO:

TIPO DE CONTENEDOR: METÁLICO      PROCEDIMIENTO: DETERMINACIÓN DE MASA EN AIRE

M	1	Número de muestra
TM	3	Número total de muestras
A	2,233.20	Masa de la Muestra [g]
D	7,411.40	Masa del contenedor lleno de agua a 25 ± 0.5 °C [g]
E	8,664.10	Masa del contenedor lleno con la muestra y agua a 25 ± 0.5 °C [g]
PS	No	Se utilizó el procedimiento suplementario para determinar A?

**PROCEDIMIENTO SUPLEMENTARIO (Si Aplica)**

B	-	Masa de la bandeja [g]
MI	-	Masa inicial del conjunto abndeya y muestra húmeda [g]

CICLO	Masa [g]	Δ [%]
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		

A'		Masa inicial del conjunto abndeya y muestra húmeda [g]
----	--	--

Gmm	2.278	Gravedad Especifica Máxima Teorica
-----	-------	------------------------------------

COMENTARIOS SOBRE EL ENSAYO

## ÁREA DE PAVIMENTOS

<b>NORMA:</b> AASHTO T 209-08		<b>ORDEN:</b>		<b>HOJA:</b>	1 de 3
<b>CLIENTE:</b>				<b>SOLICITA:</b>	
<b>PROYECTO:</b>				<b>FISCALIZA:</b>	
<b>UBICACIÓN:</b>	Mitad del Mundo			<b>CONSTRUYE:</b>	
<b>PROVINCIA:</b>	Pichincha	<b>CANTÓN:</b>	Quito	<b>EMISIÓN:</b>	
<b>ID MUESTRA:</b>					
<b>MEZCLA:</b>				<b>FECHA ELAB:</b>	
<b>ORIGEN</b>					
<b>MÉTODO:</b>	N/D	<b>MUESTREO:</b>	N/D	<b>POR:</b>	
<b>CONDICIÓN</b>	Muestreo realizado en la Planta				
<b>RECEPCIÓN:</b>		<b>POR:</b>		<b>ENSAYO:</b>	
<b>TIPO DE CONTENEDOR:</b>	METÁLICO		<b>PROCEDIMIENTO:</b>	DETERMINACIÓN DE MASA EN AIRE	
	M	2	<i>Número de muestra</i>		
	TM	3	<i>Número total de muestras</i>		
	A	2,214.30	<i>Masa de la Muestra [g]</i>		
	D	7,411.40	<i>Masa del contenedor lleno de agua a 25 ± 0.5 °C [g]</i>		
	E	8,659.30	<i>Masa del contenedor lleno con la muestra y agua a 25 ± 0.5 °C [g]</i>		
	PS	No	<i>Se utilizó el procedimiento suplementario para determinar A?</i>		
<b>PROCEDIMIENTO SUPLEMENTARIO (Si Aplica)</b>					
	B	-	<i>Masa de la bandeja [g]</i>		
	MI	-	<i>Masa inicial del conjunto abndaja y muestra húmeda [g]</i>		
	CICLO	Masa [g]	Δ [%]		
	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
	7				
	8				
	A'		<i>Masa inicial del conjunto abndaja y muestra húmeda [g]</i>		
	Gmm	2.291	<i>Gravedad Especifica Máxima Teorica</i>		
<b>COMENTARIOS SOBRE EL ENSAYO</b>					

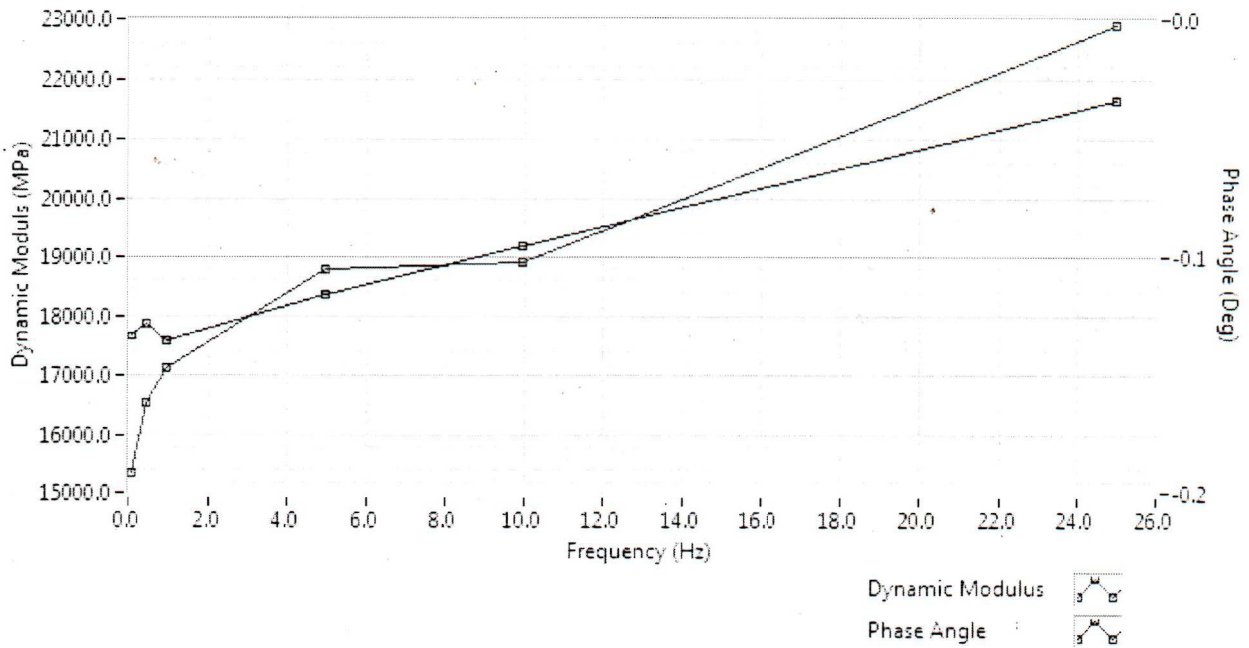
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test mié, 27 de ene de 2016 @ 7:40  
 Report Number  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ-1  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test temperature (DegC)	-10.0
Air void content (%)	0
Diameter (mm)	100.6

Height (mm)	127.3
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	22878.7	18887.1	18772.3	17096.4	16523.4	15319.1
Phase angle (Deg) [24]	-0.034537	-0.096103	-0.116629	-0.135638	-0.129180	-0.133891
Strain magnitude [20]	38.303279	25.701147	27.538285	26.159179	26.658356	24.017759
Stress magnitude (kPa) [06]	876.329927	485.420090	516.957098	447.227738	440.487257	367.929474
Average strain error [21]	0.062305	0.058721	0.063299	0.068457	0.067100	0.070715
Uniformity coefficient for strain [22]	0.055208	0.100984	0.076570	0.065724	0.043502	0.000402
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.288937	0.078921	0.049949	0.040081	0.035802	0.039366

Data File TEJ-1\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed

Date

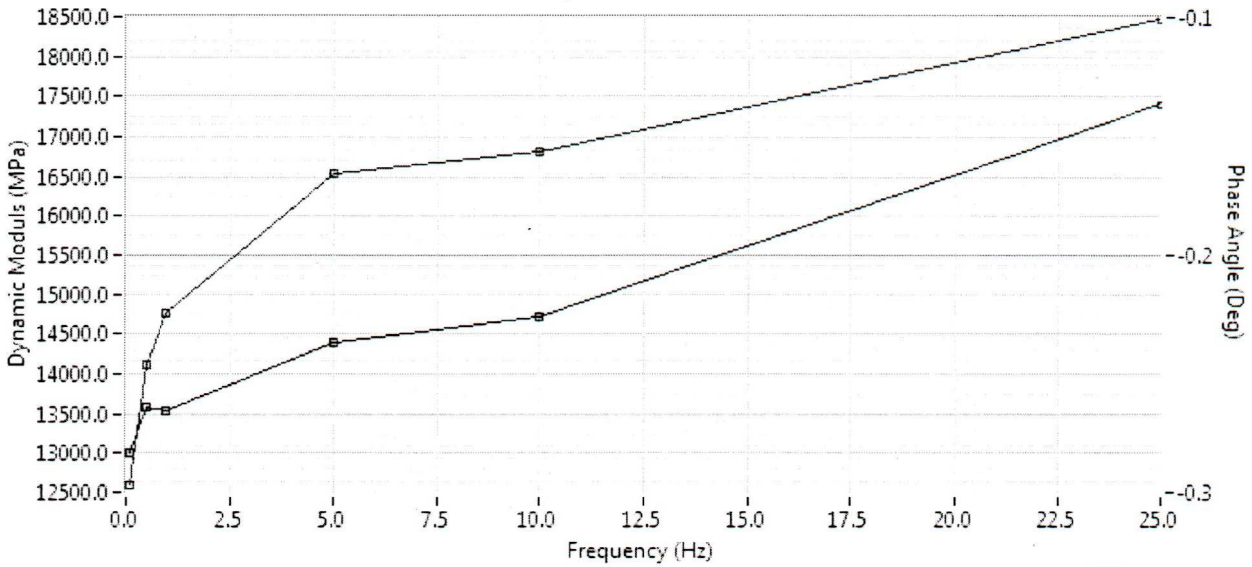
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test mié, 27 de ene de 2016 @ 14:07  
 Report Number  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_1.1  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test temperature (DegC)	4.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.6

Height (mm)	127.3
Target strain (ustrain)	100



Dynamic Modulus

Phase Angle

**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	18465.8	16811.2	16534.4	14740.7	14094.7	12575.5
Phase angle (Deg) [24]	-0.136970	-0.226833	-0.237596	-0.265997	-0.264383	-0.283272
Strain magnitude [20]	42.424834	28.405322	30.672767	30.504072	30.977770	28.179331
Stress magnitude (kPa) [06]	783.409746	477.528924	507.156617	449.651438	436.622834	354.369216
Average strain error [21]	0.053139	0.059101	0.061907	0.063339	0.066547	0.080330
Uniformity coefficient for strain [22]	0.034965	0.077582	0.061079	0.055476	0.053555	0.040982
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.503907	0.155980	0.110789	0.097932	0.099915	0.100454

Data File TEJ\_1.1\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed

Date

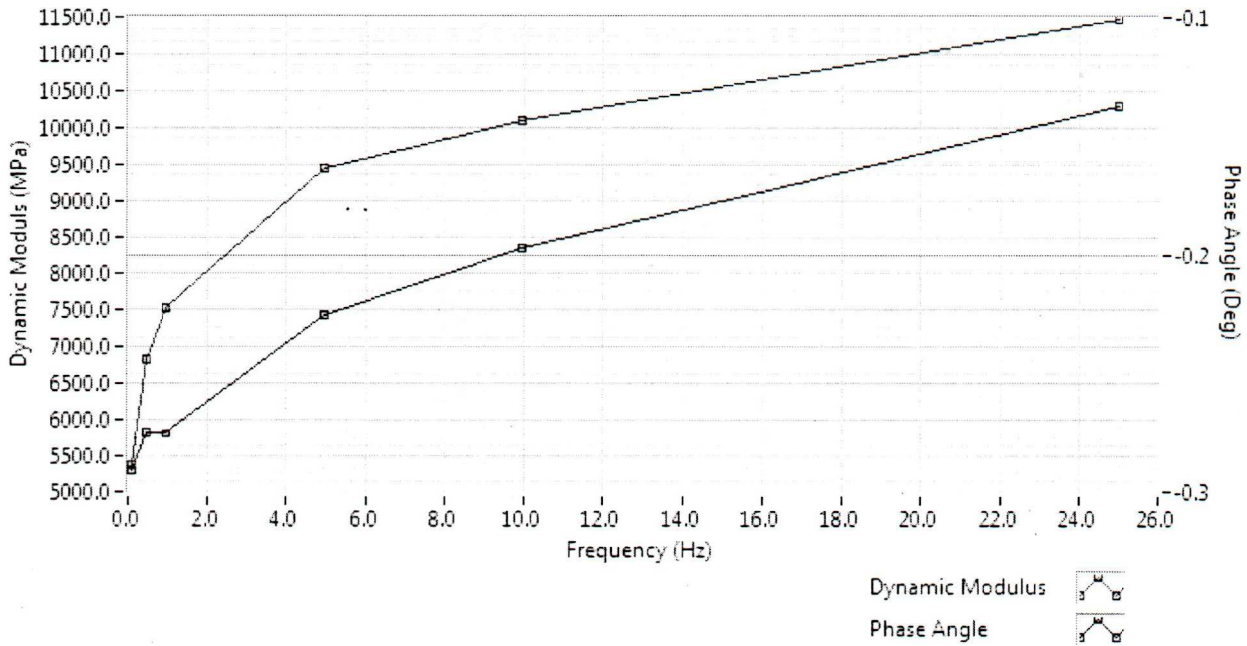
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 10:09  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_1.2  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	21.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.6

Height (mm)	127.3
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	11466.9	10085.9	9428.0	7502.1	6810.4	5370.4
Phase angle (Deg) [24]	-0.137335	-0.197541	-0.225731	-0.275480	-0.275139	-0.291416
Strain magnitude [20]	45.226828	33.788438	36.137632	37.394077	38.626676	37.670049
Stress magnitude (kPa) [06]	518.610118	340.787583	340.704496	280.532783	263.063735	202.304514
Average strain error [21]	0.035569	0.045868	0.047019	0.057904	0.067002	0.075575
Uniformity coefficient for strain [22]	0.059658	0.017291	0.012352	0.006989	0.016214	0.022370
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.031743	0.022148	0.007815	0.009903	0.007487	0.009944

Data File TEJ\_1.2\_2.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

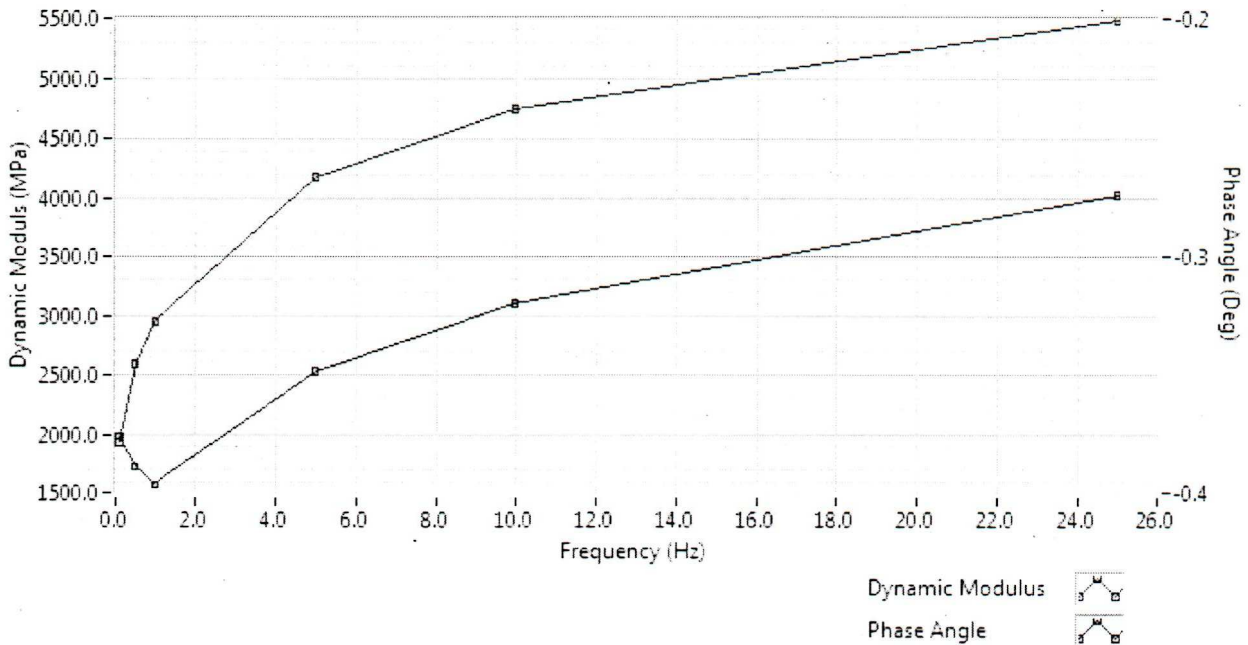
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 13:39  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_1.3  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito Ecuador

Test temperature (DegC)	37.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.6

Height (mm)	127.3
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	5478.5	4734.1	4163.5	2931.3	2580.4	1922.1
Phase angle (Deg) [24]	-0.274076	-0.320216	-0.349036	-0.396911	-0.389316	-0.376289
Strain magnitude [20]	47.408242	41.978147	43.608765	45.765488	45.807175	45.340615
Stress magnitude (kPa) [06]	259.727362	198.730049	181.565200	134.154434	118.200215	87.150967
Average strain error [21]	0.041796	0.046493	0.050916	0.073813	0.077091	0.093686
Uniformity coefficient for strain [22]	0.000162	0.008435	0.014934	0.011884	0.016370	0.035931
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.008196	0.012575	0.006800	0.002787	0.006500	0.006965

Data File TEJ\_1.3\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

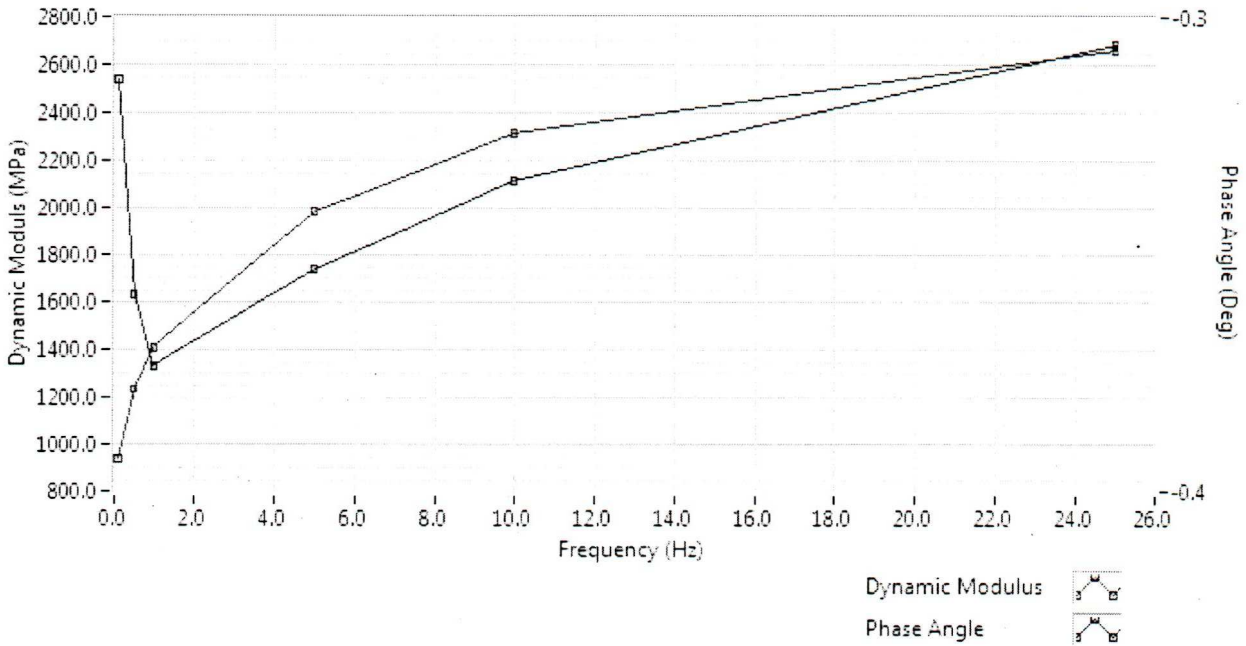
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 17:31  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_1.4  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	54.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.6

Height (mm)	127.3
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	2657.3	2308.6	1979.6	1404.3	1230.1	935.3
Phase angle (Deg) [24]	-0.305910	-0.334451	-0.353175	-0.373750	-0.358789	-0.313238
Strain magnitude [20]	50.238734	46.210429	48.928035	48.688171	49.328482	48.651438
Stress magnitude (kPa) [06]	133.501893	106.682579	96.858637	68.371970	60.680479	45.504331
Average strain error [21]	0.039617	0.051025	0.056913	0.067356	0.073647	0.089967
Uniformity coefficient for strain [22]	0.217065	0.210657	0.210675	0.219688	0.202867	0.188498
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.001596	0.002204	0.002977	0.004812	0.005221	0.016174

Data File TEJ\_1.4\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

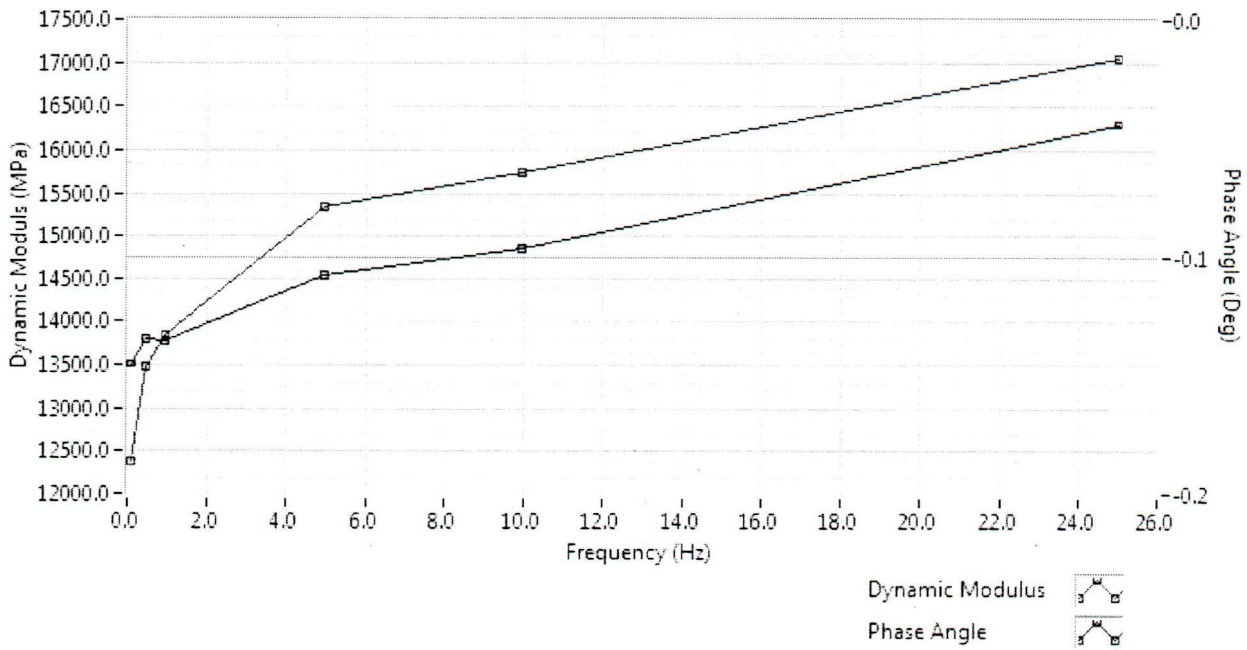
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test mié, 27 de ene de 2016 @ 8:06  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ-2  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	-10.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	102.6

Height (mm)	130.3
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	17042.0	15731.2	15337.2	13831.8	13470.5	12370.1
Phase angle (Deg) [24]	-0.043945	-0.096750	-0.107874	-0.136027	-0.134849	-0.145493
Strain magnitude [20]	44.696965	28.411279	30.733340	29.457955	29.742091	26.725236
Stress magnitude (kPa) [06]	761.723744	446.943015	471.364783	407.456461	400.640486	330.595166
Average strain error [21]	0.063378	0.058042	0.055298	0.056402	0.055335	0.067229
Uniformity coefficient for strain [22]	0.232665	0.311409	0.282781	0.277633	0.262809	0.192506
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.437529	0.029896	0.020692	0.019506	0.022449	0.018026

Data File TEJ-2\_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

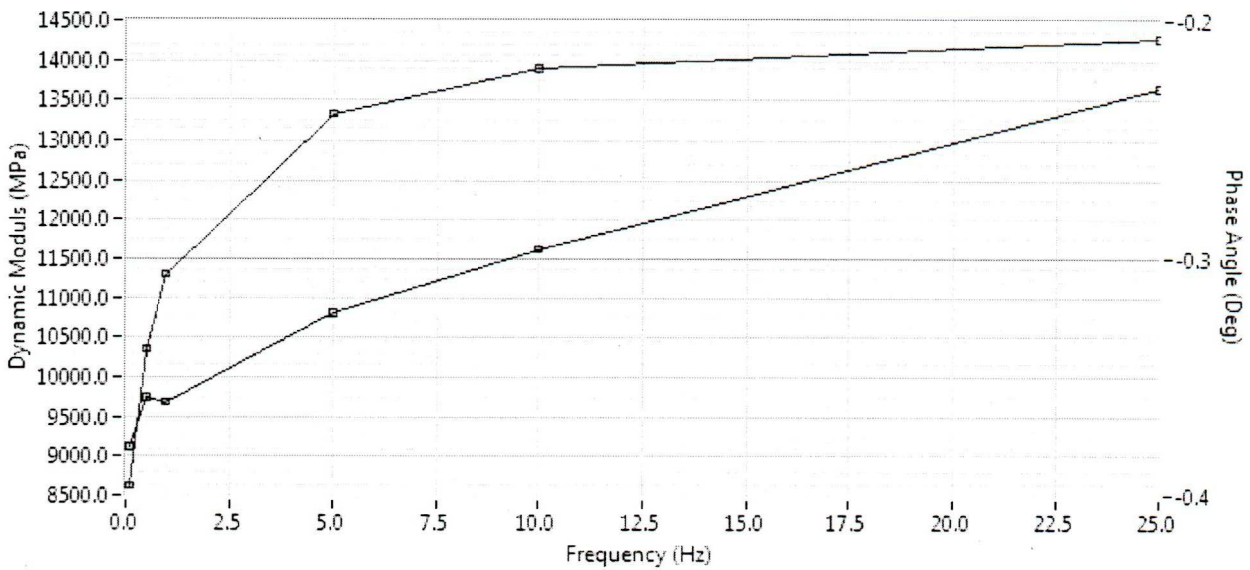
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test mié, 27 de ene de 2016 @ 14:30  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_2.1  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test temperature (DegC)	4.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	102.6

Height (mm)	130.3
Target strain (ustrain)	100



Dynamic Modulus

Phase Angle

**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	14255.5	13891.7	13320.2	11288.8	10343.0	8610.7
Phase angle (Deg) [24]	-0.228584	-0.296277	-0.323499	-0.360870	-0.358614	-0.379917
Strain magnitude [20]	46.630087	31.687397	33.619958	33.834981	34.957047	33.857672
Stress magnitude (kPa) [06]	664.734504	440.190564	447.823505	381.957895	361.561256	291.538389
Average strain error [21]	0.050835	0.074743	0.072252	0.078844	0.075640	0.090217
Uniformity coefficient for strain [22]	0.148970	0.309616	0.289168	0.273330	0.244848	0.242167
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.742608	0.337719	0.226074	0.200282	0.187125	0.197927

Data File TEJ\_2.1\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

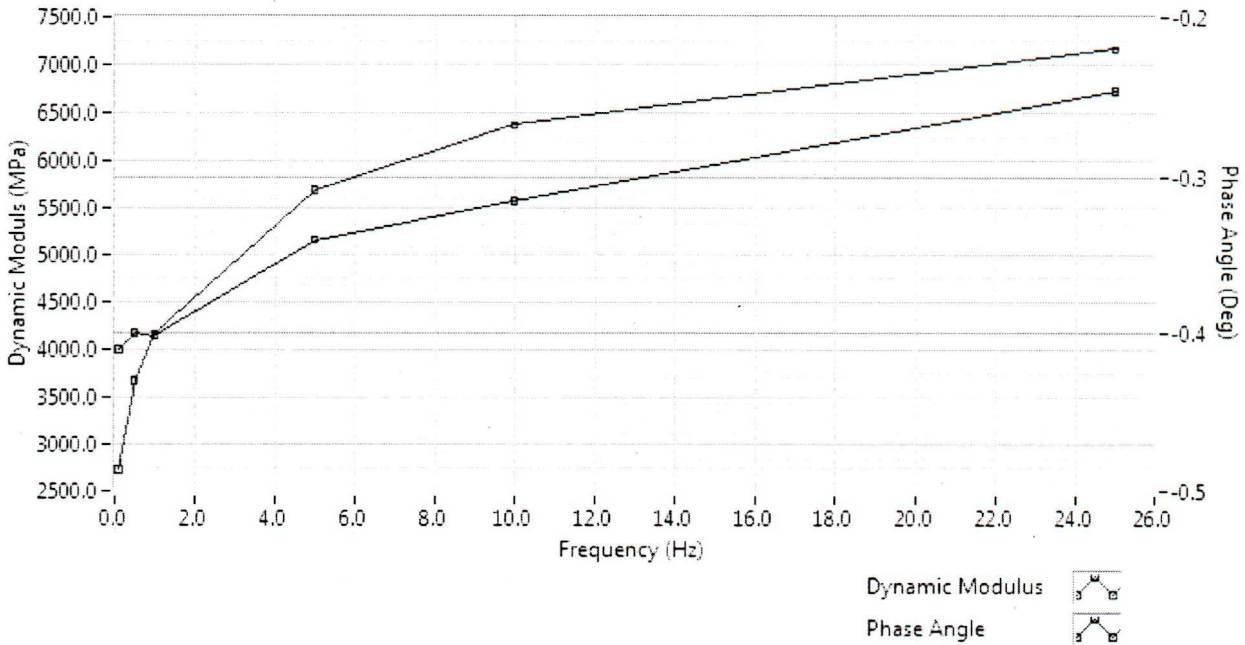
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 6:59  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_2.2  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	21.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	102.6

Height (mm)	130.3
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	7154.3	6363.4	5676.2	4148.8	3655.5	2714.4
Phase angle (Deg) [24]	-0.246823	-0.315883	-0.341059	-0.402058	-0.400262	-0.410514
Strain magnitude [20]	46.349330	39.867520	42.476986	44.365311	45.694252	44.610781
Stress magnitude (kPa) [06]	331.594733	253.693297	241.109835	184.060862	167.036528	121.092503
Average strain error [21]	0.037486	0.046472	0.049491	0.075394	0.081207	0.102571
Uniformity coefficient for strain [22]	0.008227	0.032513	0.039451	0.020300	0.028504	0.063816
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.294592	0.146461	0.107473	0.091447	0.090830	0.096864

Data File TEJ\_2.2\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

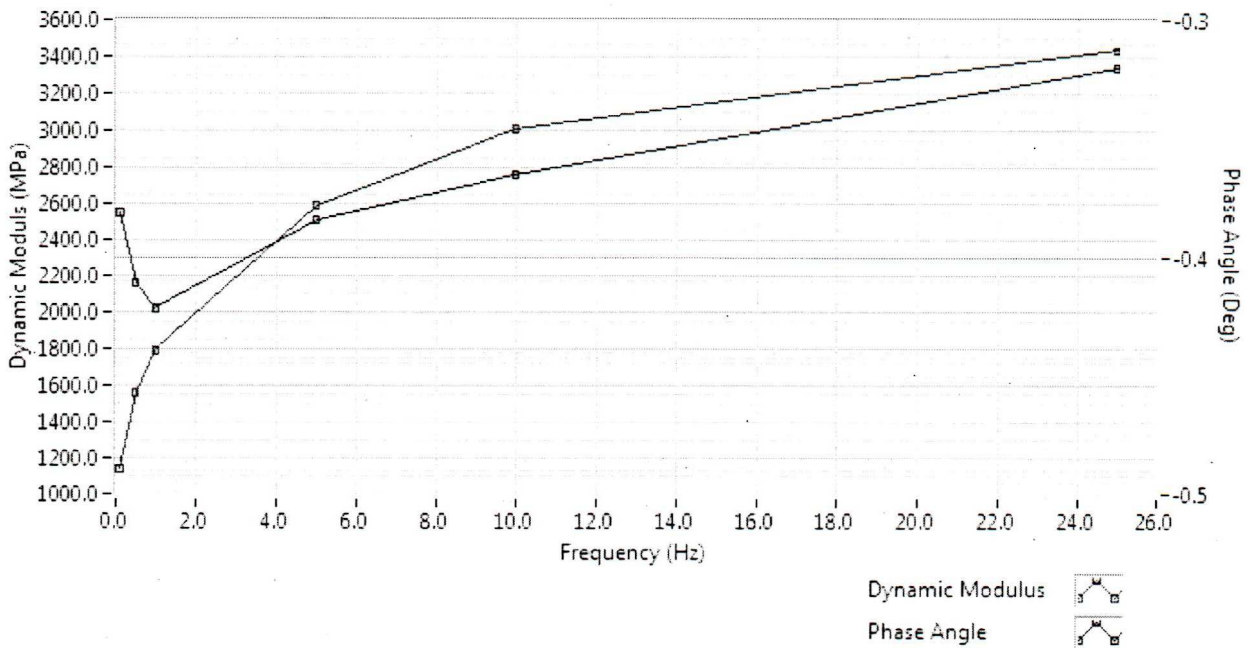
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 10:51  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_2.3  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito Ecuador

Test temperature (DegC)	37.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	102.6

Height (mm)	130.3
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	3429.7	3003.6	2585.8	1784.1	1553.8	1134.8
Phase angle (Deg) [24]	-0.320431	-0.365020	-0.384184	-0.422183	-0.411265	-0.381458
Strain magnitude [20]	49.320835	44.041213	47.590723	48.003173	48.990934	48.253727
Stress magnitude (kPa) [06]	169.156359	132.281247	123.058850	85.643568	76.122520	54.757244
Average strain error [21]	0.039243	0.053126	0.053865	0.080774	0.091496	0.105739
Uniformity coefficient for strain [22]	0.031422	0.043558	0.040866	0.061541	0.076966	0.098604
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.066470	0.039394	0.013058	0.002348	0.005058	0.009733

Data File TEJ\_2.2\_2.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

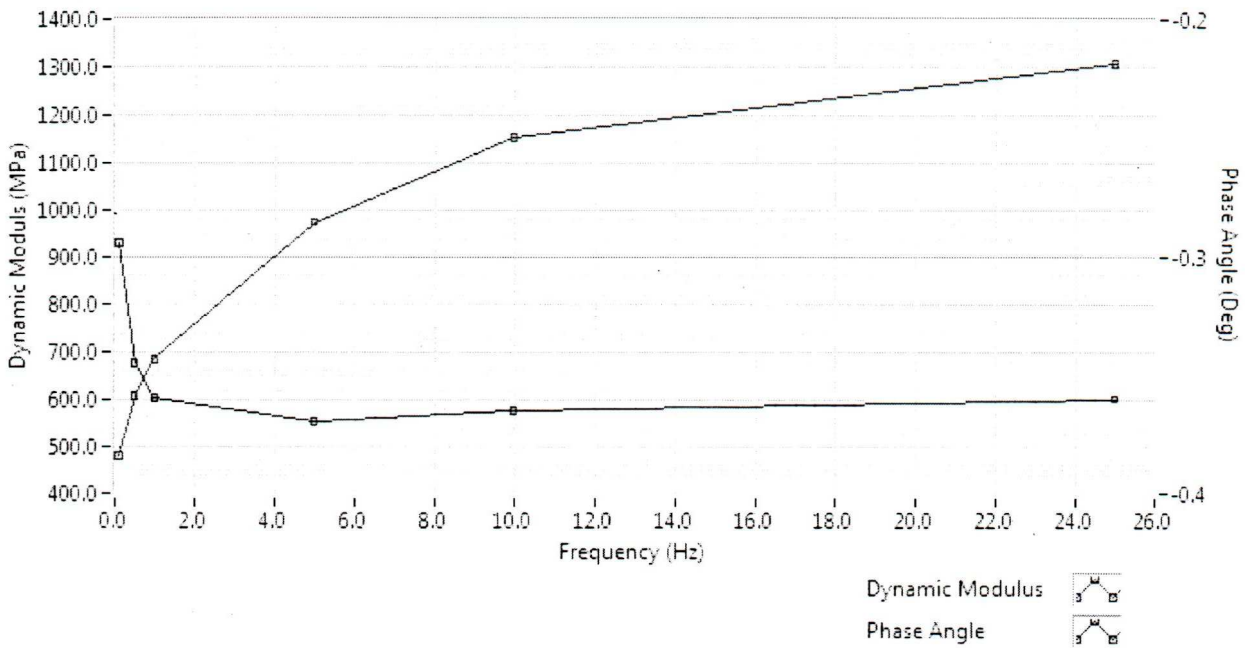
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 14:46  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_2.4  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	54.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	102.6

Height (mm)	130.3
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	1305.6	1151.1	972.4	682.8	603.9	479.9
Phase angle (Deg) [24]	-0.360137	-0.364781	-0.369418	-0.359516	-0.344916	-0.294069
Strain magnitude [20]	51.899583	50.482063	51.928863	51.131381	49.555078	49.197454
Stress magnitude (kPa) [06]	67.759906	58.111769	50.497553	34.914786	29.926586	23.607974
Average strain error [21]	0.039493	0.049192	0.059527	0.065157	0.066780	0.069757
Uniformity coefficient for strain [22]	0.099933	0.102010	0.094978	0.089348	0.070779	0.051930
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.019330	0.021919	0.019478	0.013260	0.005288	0.018407

Data File TEJ\_2.4\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:  
 Poisson's Ratio:  
 Description of asphaltic material:  
 How it was mixed:  
 How it was compacted:  
 How bulk density was determined:  
 How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

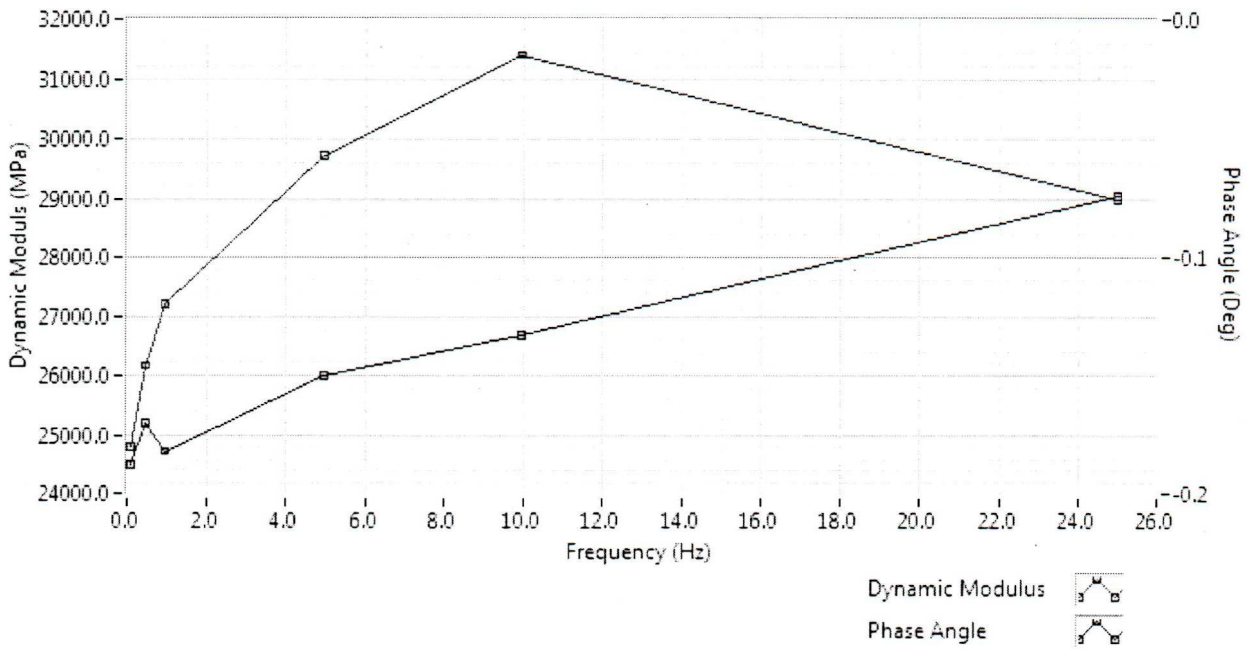
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test mié, 27 de ene de 2016 @ 8:35  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ-3  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	-10.0
Air void content (%)	0
Diameter (mm)	100.9

Height (mm)	126.5
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	28959.4	31379.2	29703.8	27188.6	26147.9	24774.8
Phase angle (Deg) [24]	-0.074535	-0.133399	-0.150625	-0.182428	-0.170648	-0.188336
Strain magnitude [20]	29.689018	18.679729	22.069088	20.638310	21.059744	17.843563
Stress magnitude (kPa) [06]	859.776174	586.155728	655.536432	561.127384	550.667081	442.070411
Average strain error [21]	0.067791	0.084934	0.066736	0.066915	0.070011	0.078995
Uniformity coefficient for strain [22]	0.150379	0.026003	0.055189	0.045299	0.064405	0.038831
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.459961	0.070656	0.043236	0.039057	0.035076	0.045446

Data File TEJ-3\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

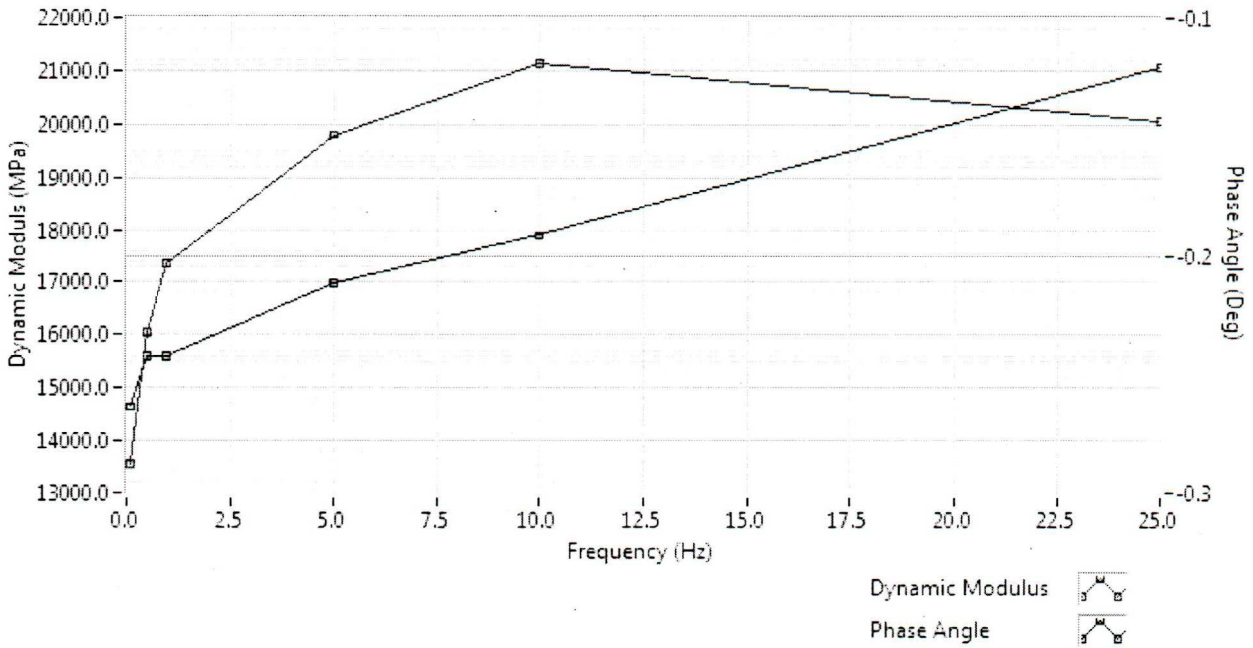
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test mié, 27 de ene de 2016 @ 14:53  
 Report Number  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_3.1  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test temperature (DegC)	4.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.9

Height (mm)	126.5
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	20029.4	21110.9	19779.5	17345.8	16019.4	13535.8
Phase angle (Deg) [24]	-0.121442	-0.191587	-0.212124	-0.242512	-0.242922	-0.263916
Strain magnitude [20]	42.232277	25.492978	28.906411	27.812861	29.233221	27.805383
Stress magnitude (kPa) [06]	845.886950	538.179872	571.754227	482.436333	468.298006	376.368942
Average strain error [21]	0.050512	0.075008	0.066754	0.063693	0.071619	0.087135
Uniformity coefficient for strain [22]	0.335286	0.313269	0.334216	0.340896	0.379795	0.431376
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.285950	0.066932	0.029968	0.022795	0.026728	0.026592

Data File TEJ\_3.1\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed

Date

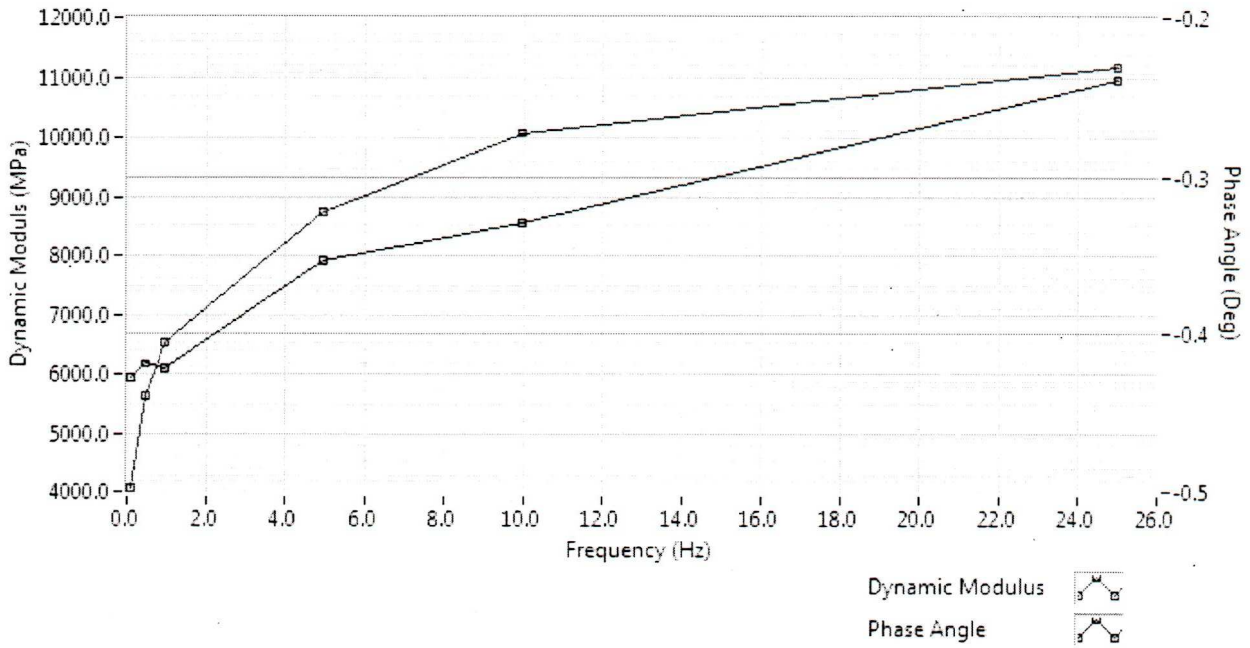
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 7:31  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_3.2  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	21.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.9

Height (mm)	126.5
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	11154.6	10055.8	8719.6	6510.7	5606.8	4040.3
Phase angle (Deg) [24]	-0.239587	-0.329608	-0.353848	-0.422550	-0.419220	-0.428129
Strain magnitude [20]	48.098986	39.939456	43.593649	43.555437	44.965718	44.720175
Stress magnitude (kPa) [06]	536.526674	401.623966	380.121031	283.574927	252.113339	180.681685
Average strain error [21]	0.065775	0.078982	0.066796	0.085675	0.098626	0.110757
Uniformity coefficient for strain [22]	0.188928	0.173808	0.174413	0.137864	0.123791	0.086560
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.396776	0.178861	0.105455	0.102675	0.104264	0.103138

Data File TEJ\_3.2\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

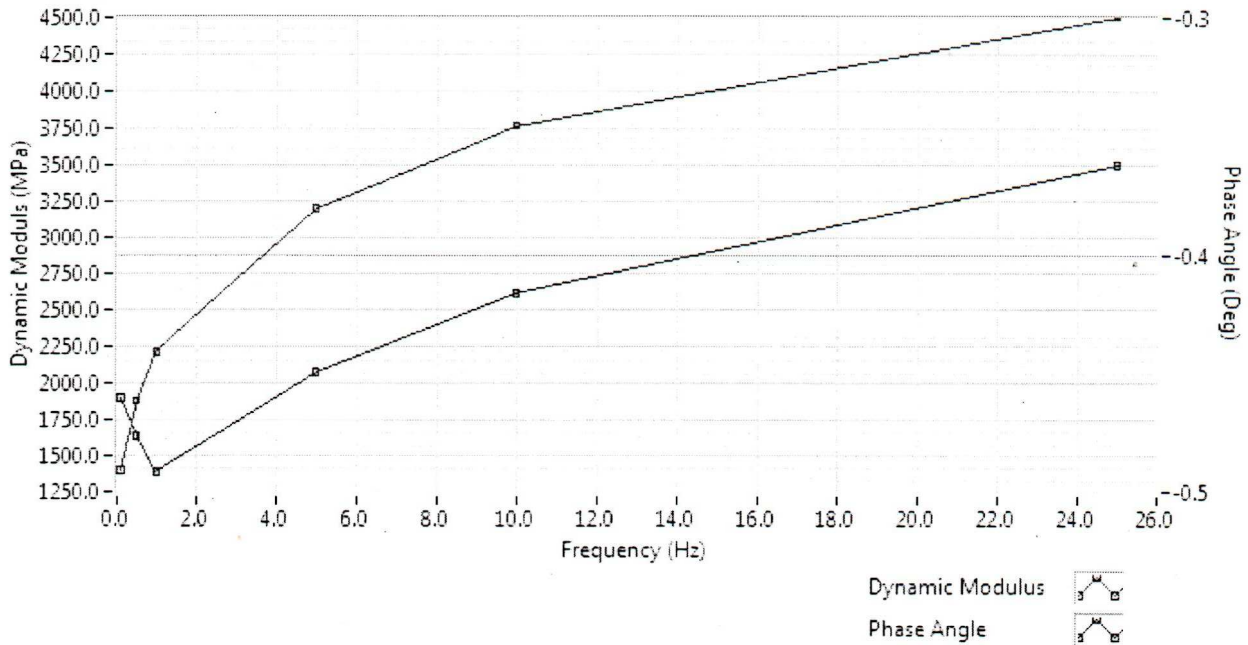
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 11:15  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_3.3  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	37.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.9

Height (mm)	126.5
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	4498.8	3759.8	3196.5	2207.4	1874.7	1394.3
Phase angle (Deg) [24]	-0.361731	-0.416675	-0.449599	-0.492015	-0.476333	-0.460168
Strain magnitude [20]	50.194150	44.248688	47.245264	48.365960	49.402511	47.809723
Stress magnitude (kPa) [06]	225.813289	166.364243	151.018676	106.763050	92.614190	66.659324
Average strain error [21]	0.052950	0.062647	0.060435	0.081121	0.089017	0.119627
Uniformity coefficient for strain [22]	0.266400	0.260098	0.245694	0.251466	0.242074	0.249326
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.194642	0.197931	0.114684	0.091836	0.075767	0.076449

Data File TEJ\_3.2\_2.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:  
 Bulk Density:  
 Poisson's Ratio:  
 Description of asphaltic material:  
 How it was mixed:  
 How it was compacted:  
 How bulk density was determined:  
 How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

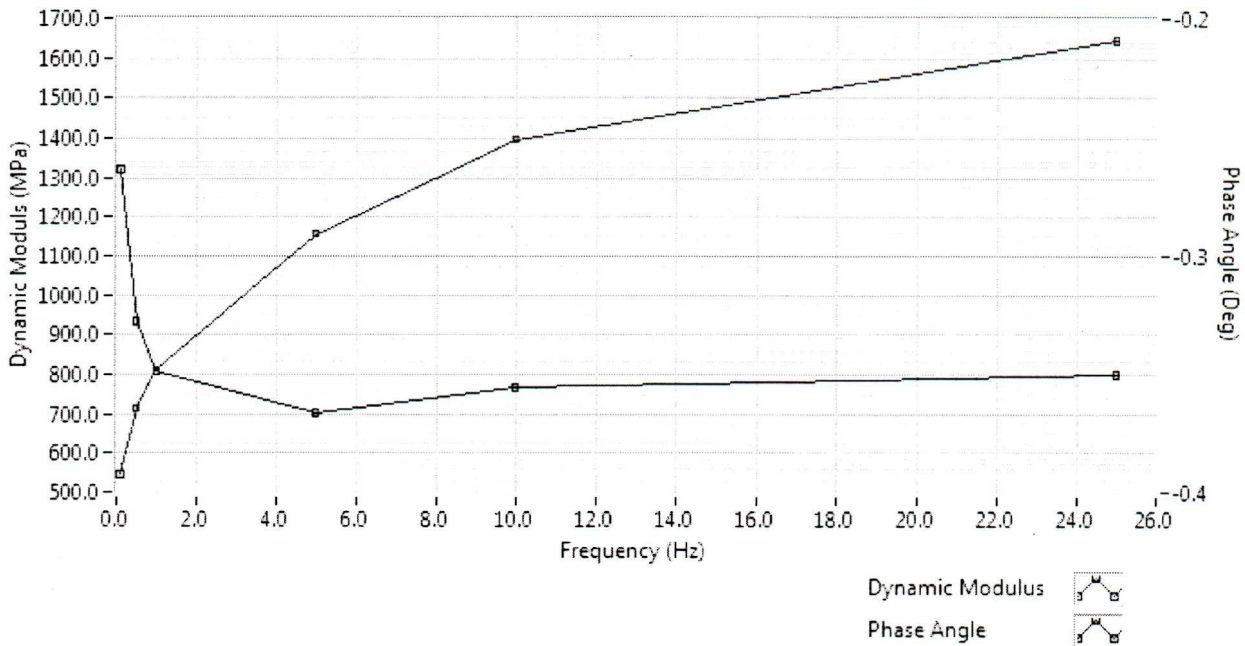
**Determining Dynamic Modulus: AASHTO TP-62-03**

Date of Test vie, 29 de ene de 2016 @ 15:18  
 Report Number \_\_\_\_\_  
 Operator Jose  
 Specimen ID TEJ\_3.4  
 Client Name \_\_\_\_\_

Lab Address Quito  
Ecuador

Test temperature (DegC)	54.0
Air void content (%)	34
Diameter (mm)	100.9

Height (mm)	126.5
Target strain (ustrain)	100



**Test Result**

	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz	0.1Hz
Dynamic modulus (MPa) [25]	1640.3	1394.8	1155.0	807.6	712.1	543.8
Phase angle (Deg) [24]	-0.350654	-0.355781	-0.366686	-0.348924	-0.328052	-0.263780
Strain magnitude [20]	52.012002	49.175687	51.727571	50.304105	49.740399	50.150968
Stress magnitude (kPa) [06]	85.312892	68.588192	59.747002	40.626834	35.419568	27.274249
Average strain error [21]	0.045581	0.051814	0.056762	0.065919	0.073050	0.071412
Uniformity coefficient for strain [22]	0.181666	0.191866	0.219502	0.247126	0.244720	0.237284
Uniformity coefficient for phase [23]	-0.058878	0.043686	0.026460	0.014055	0.016322	0.017611

Data File TEJ\_3.4\_1.tdms

**Notes** Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:  
 Poisson's Ratio:  
 Description of asphaltic material:  
 How it was mixed:  
 How it was compacted:  
 How bulk density was determined:  
 How the specimen was stored:

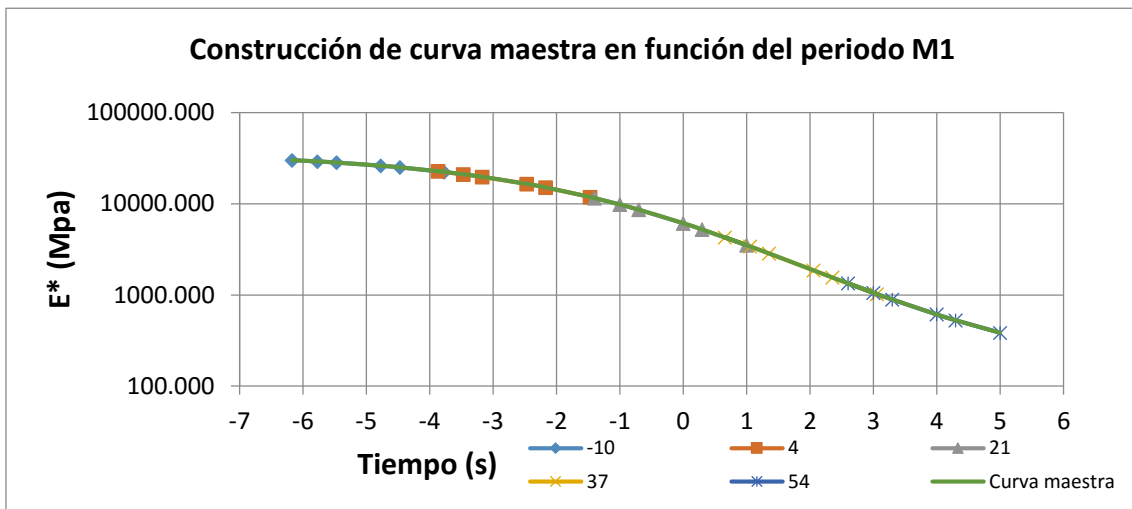
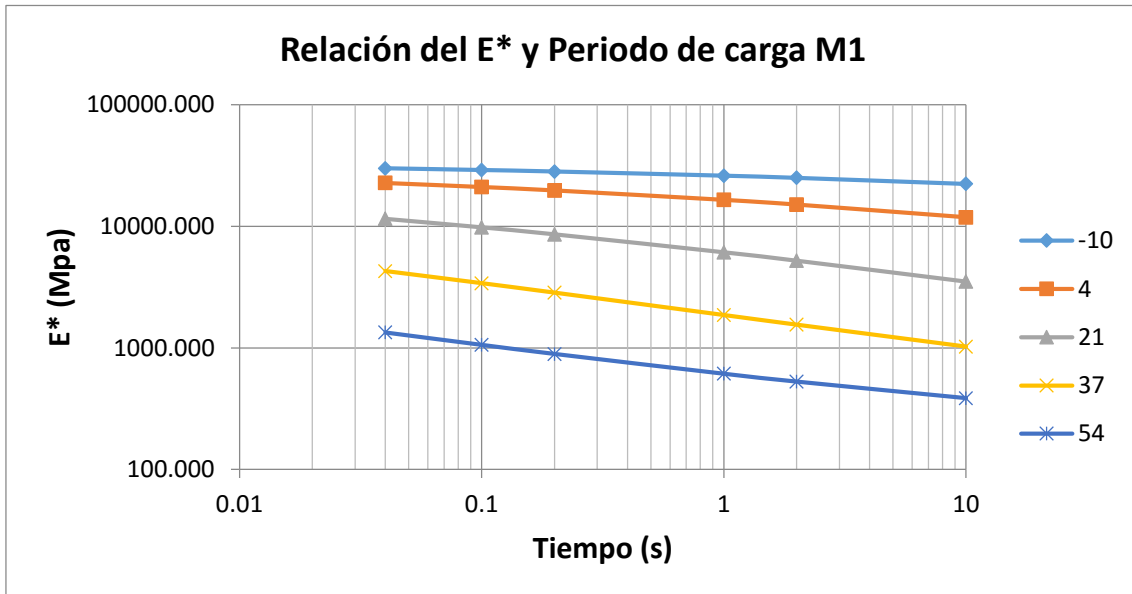
Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

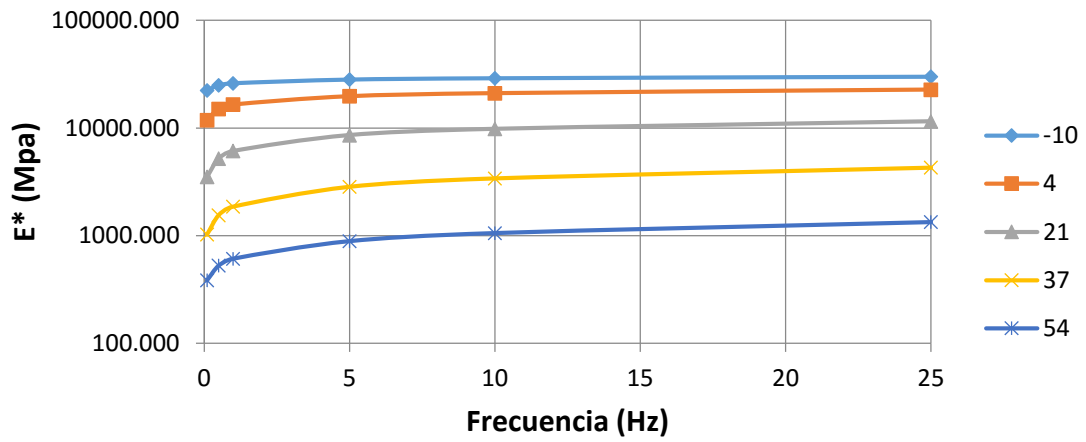
*Anexo 9 Gráficas para la construcción de curvas maestras.*

## Mezcla 1

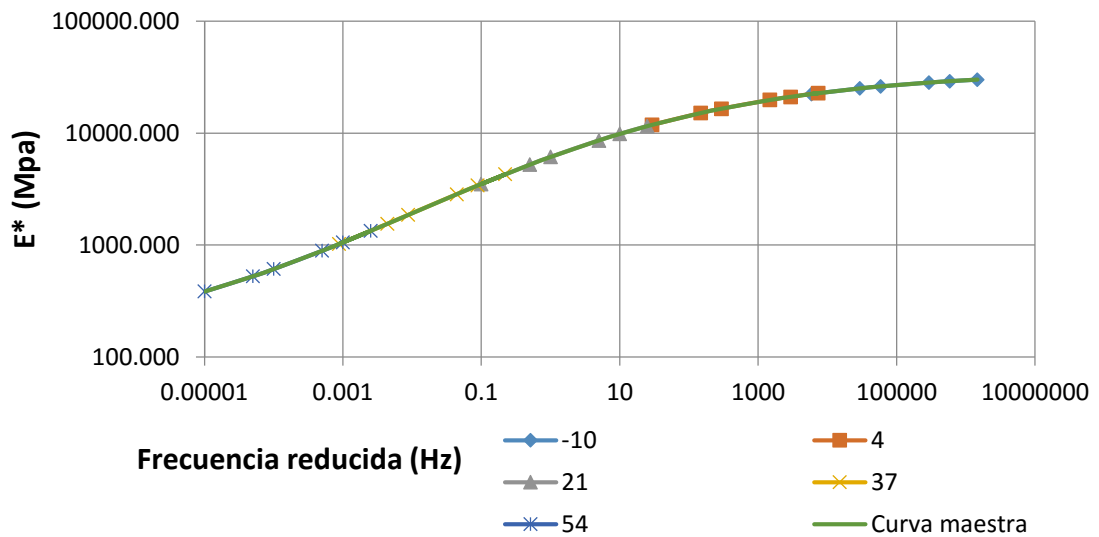
- Núcleo M1



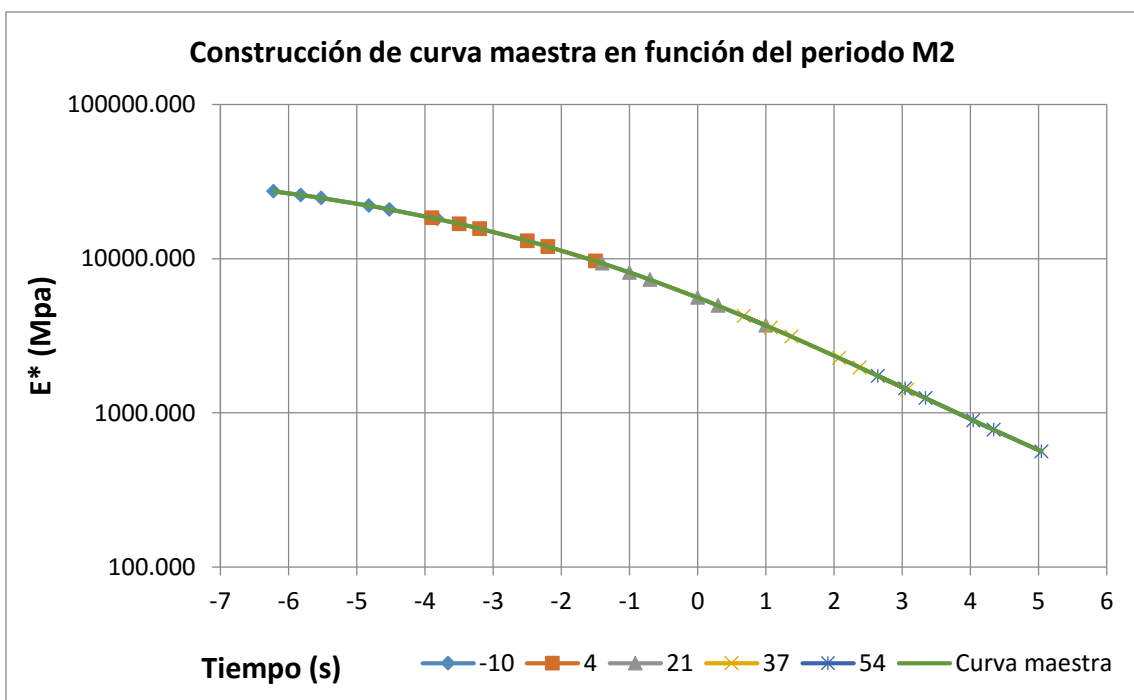
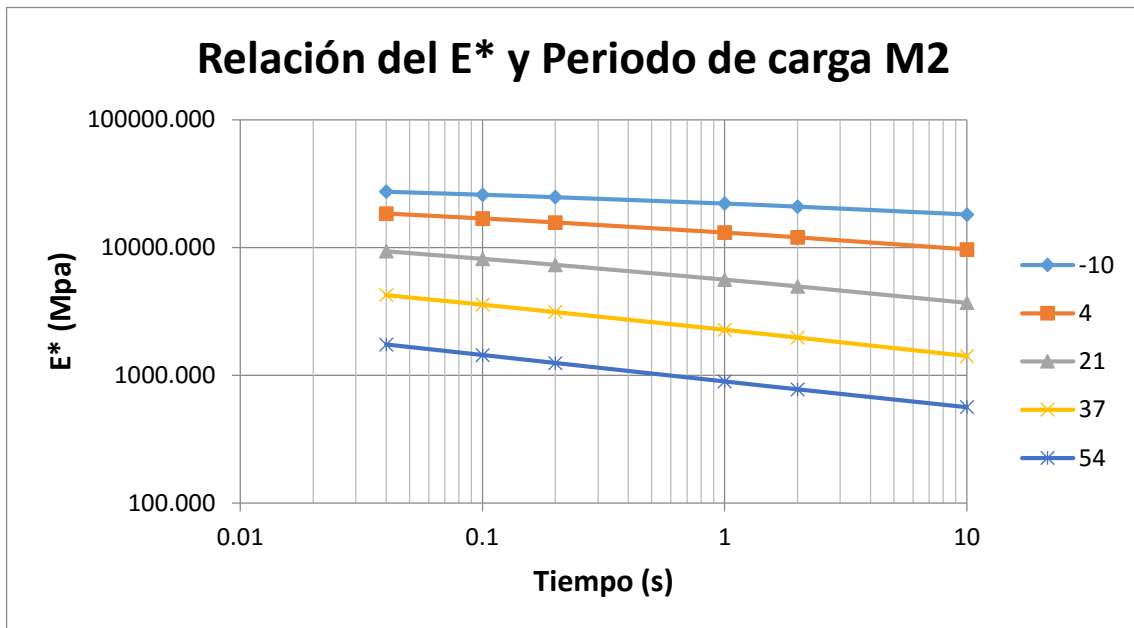
### Relación del E\* y Frecuencia de carga M1



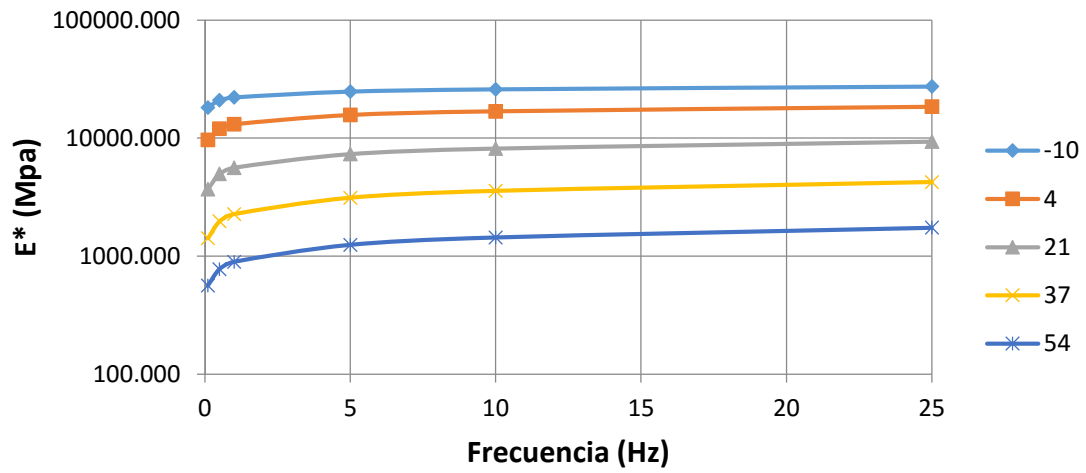
### Construcción de curva maestra en función de la frecuencia M1



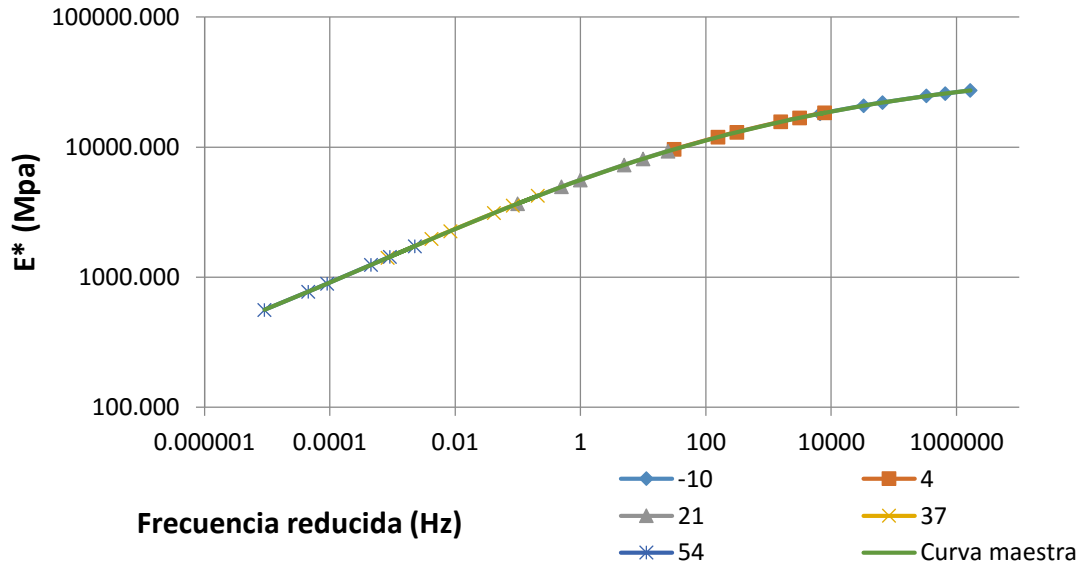
- Núcleo M2



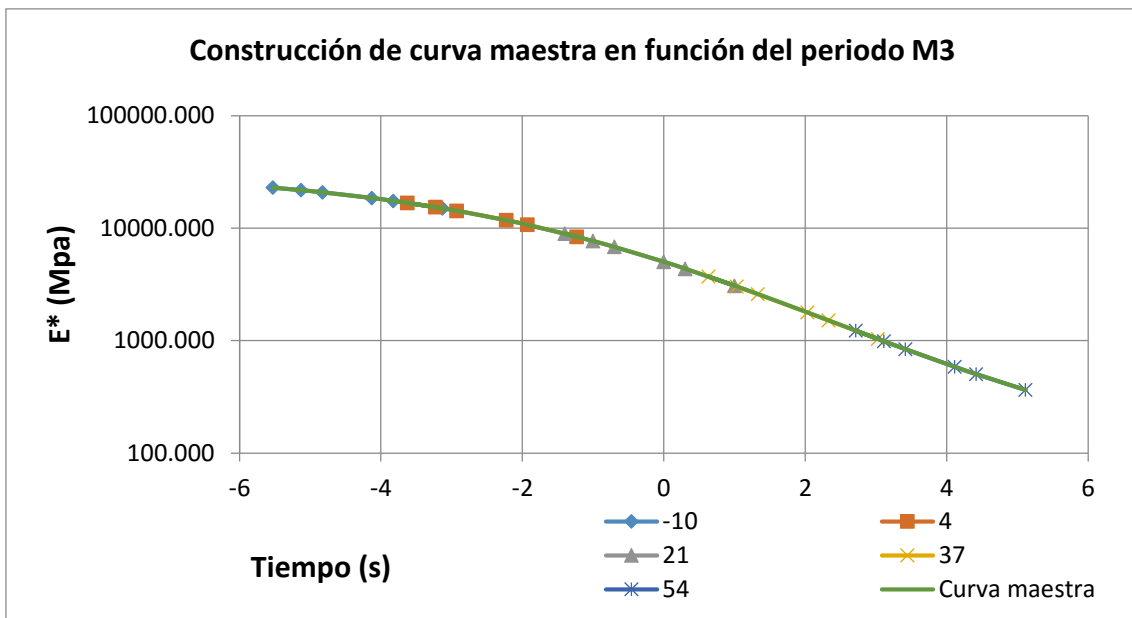
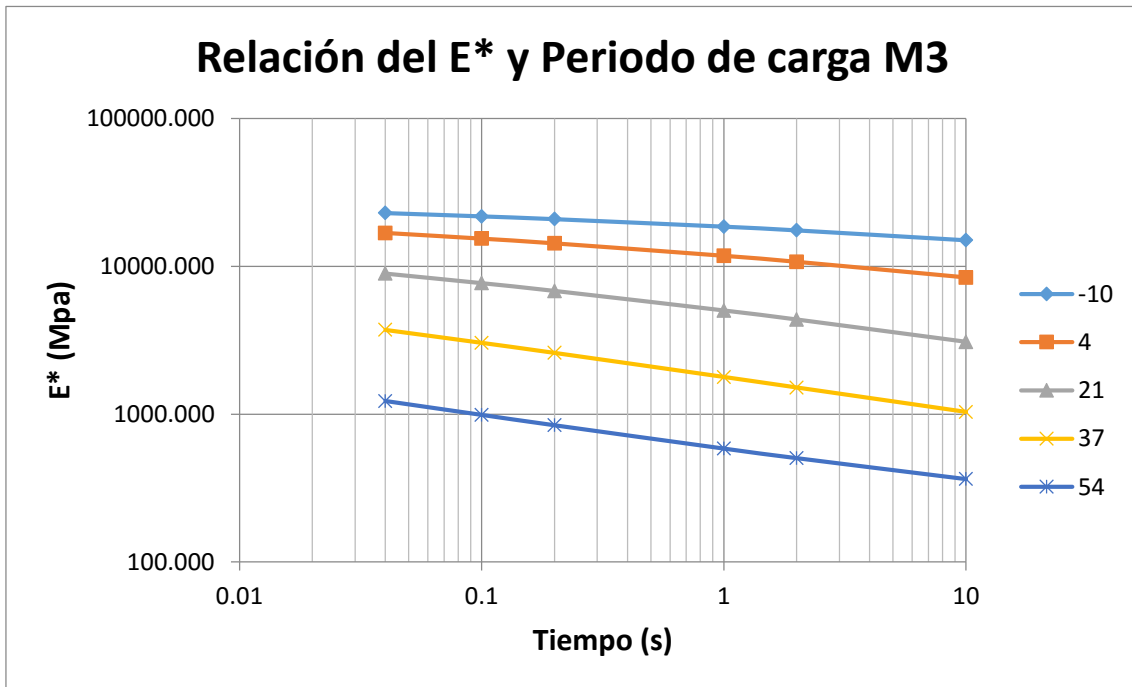
### Relación del E\* y Frecuencia de carga M2



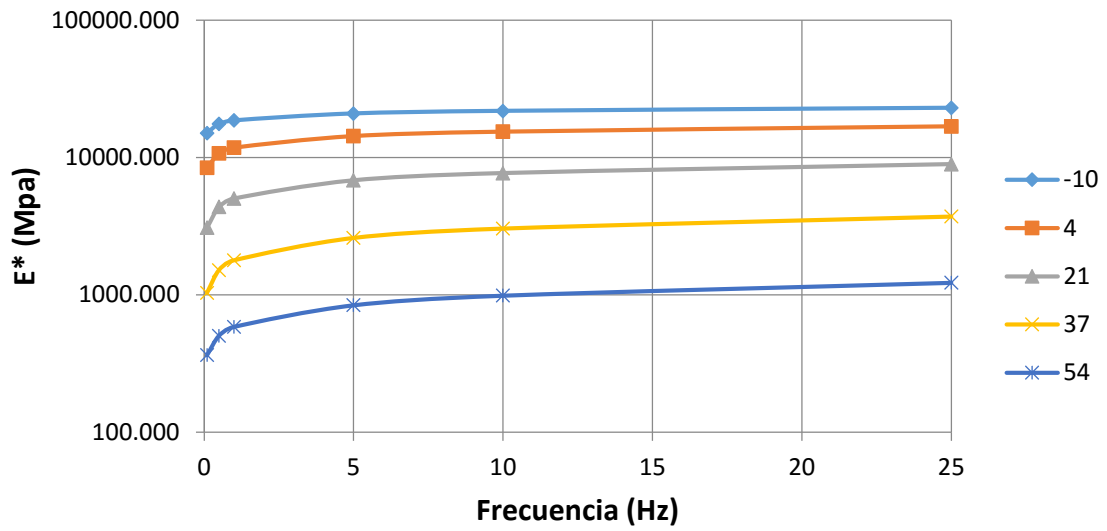
### Construcción de curva maestra en función de la frecuencia M2



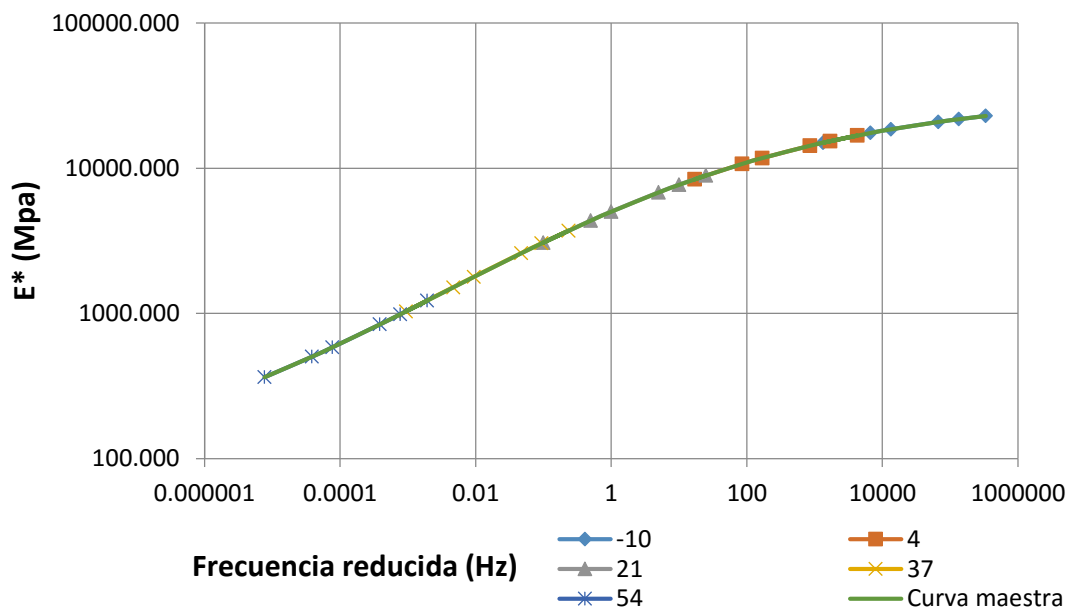
- Núcleo M3



### Relación del E\* y Frecuencia de carga M3

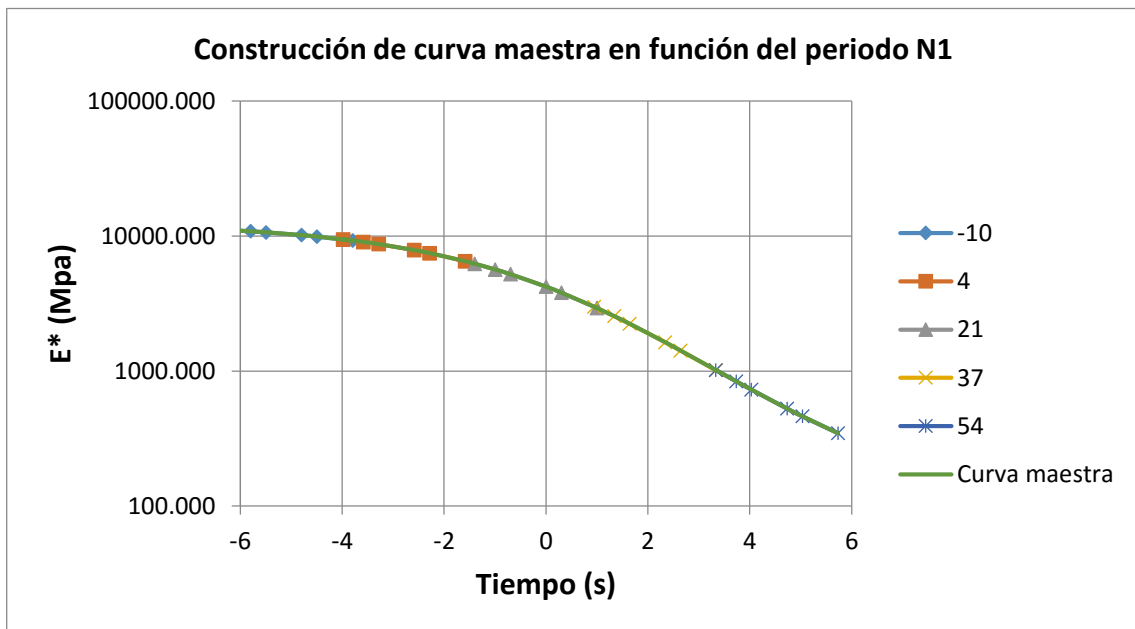
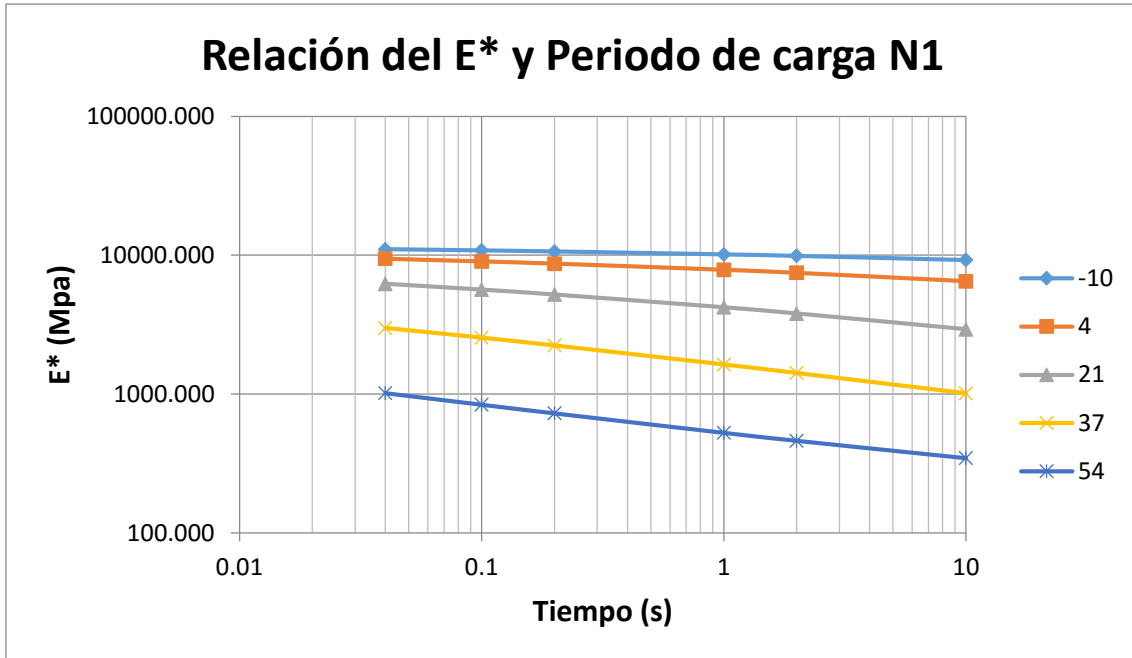


### Construcción de curva maestra en función de la frecuencia M3

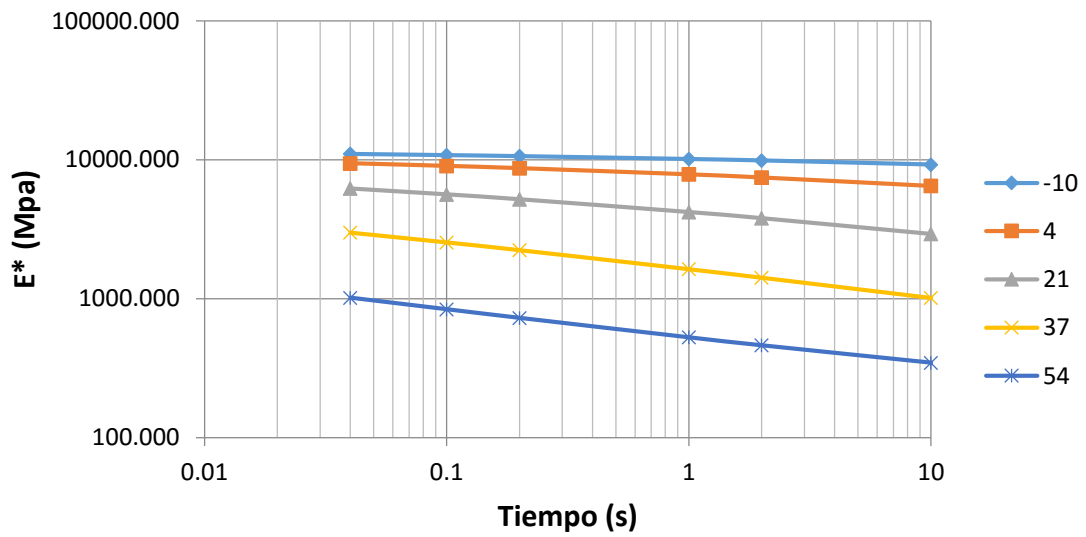


## Mezcla 2

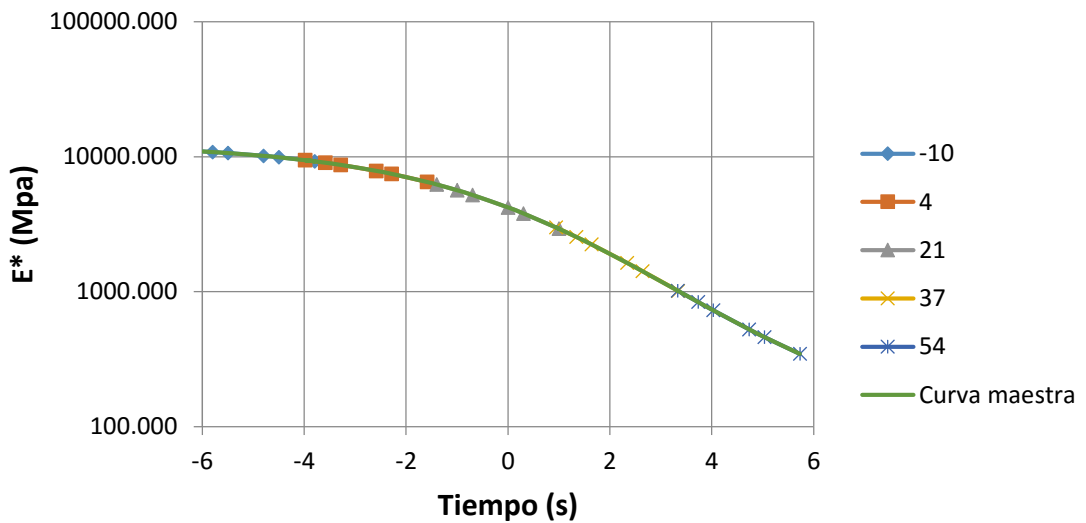
- Núcleo N1



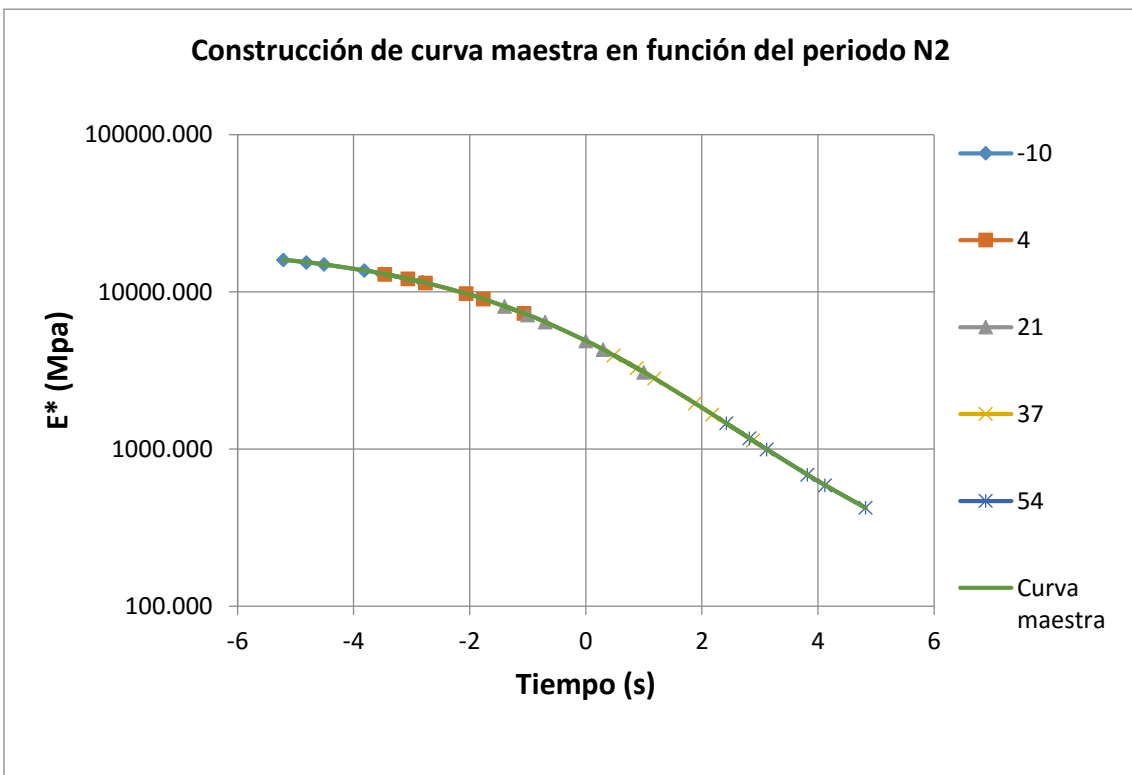
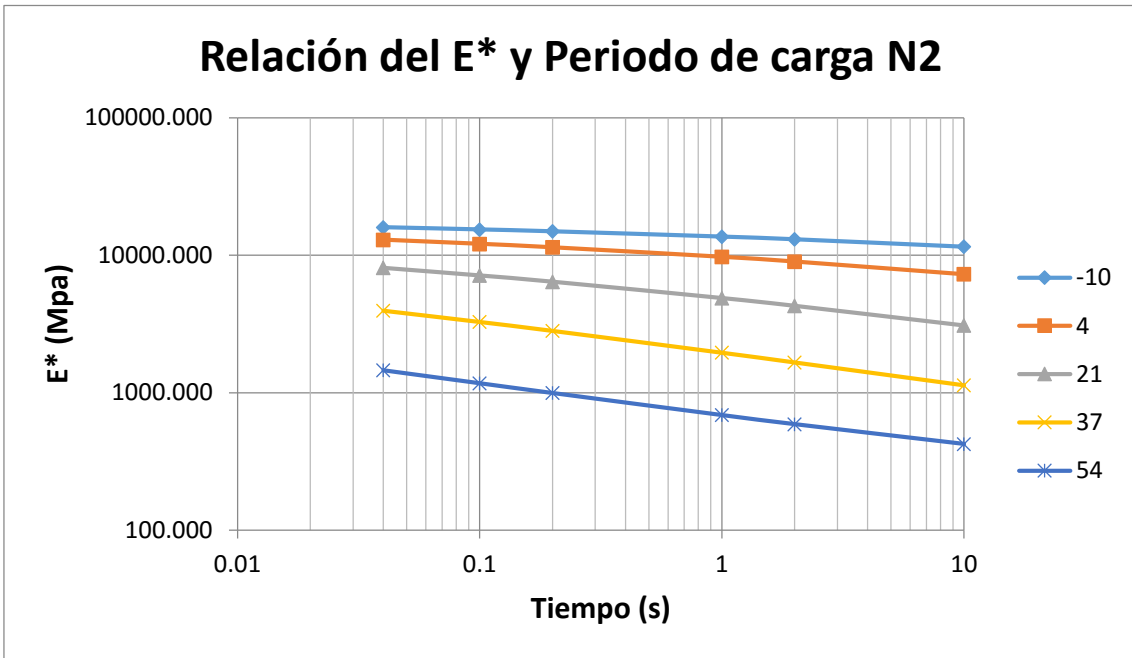
### Relación del E\* y Periodo de carga N1



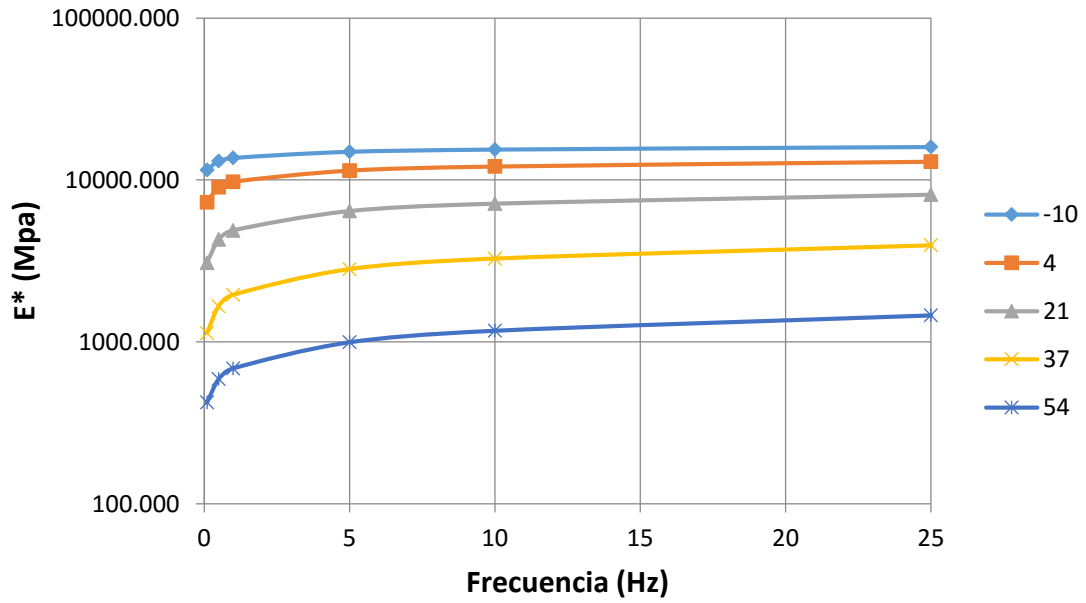
### Construcción de curva maestra en función del periodo N1



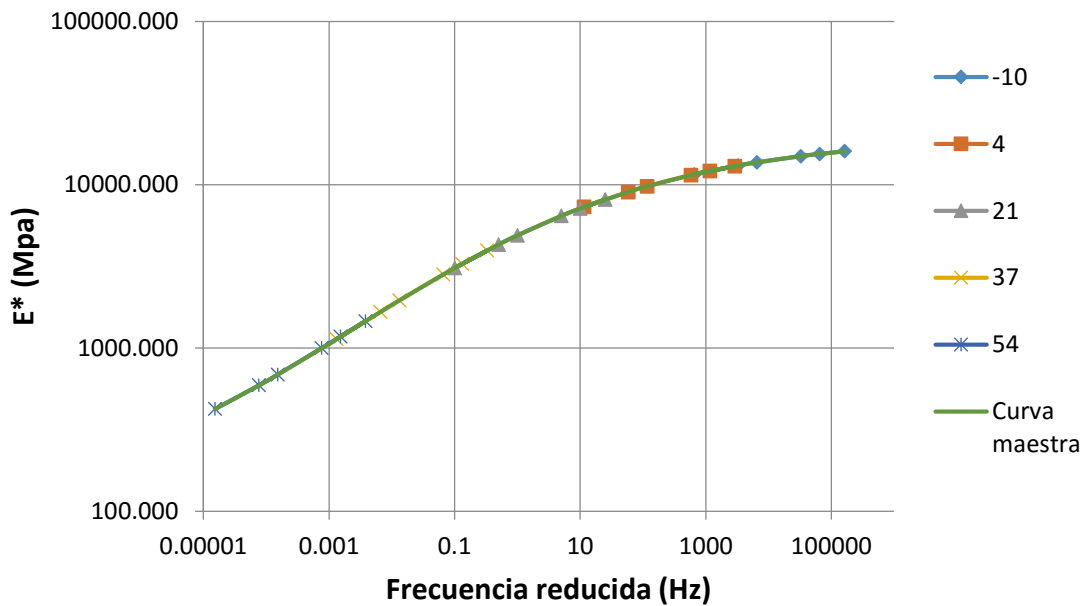
- Núcleo N2



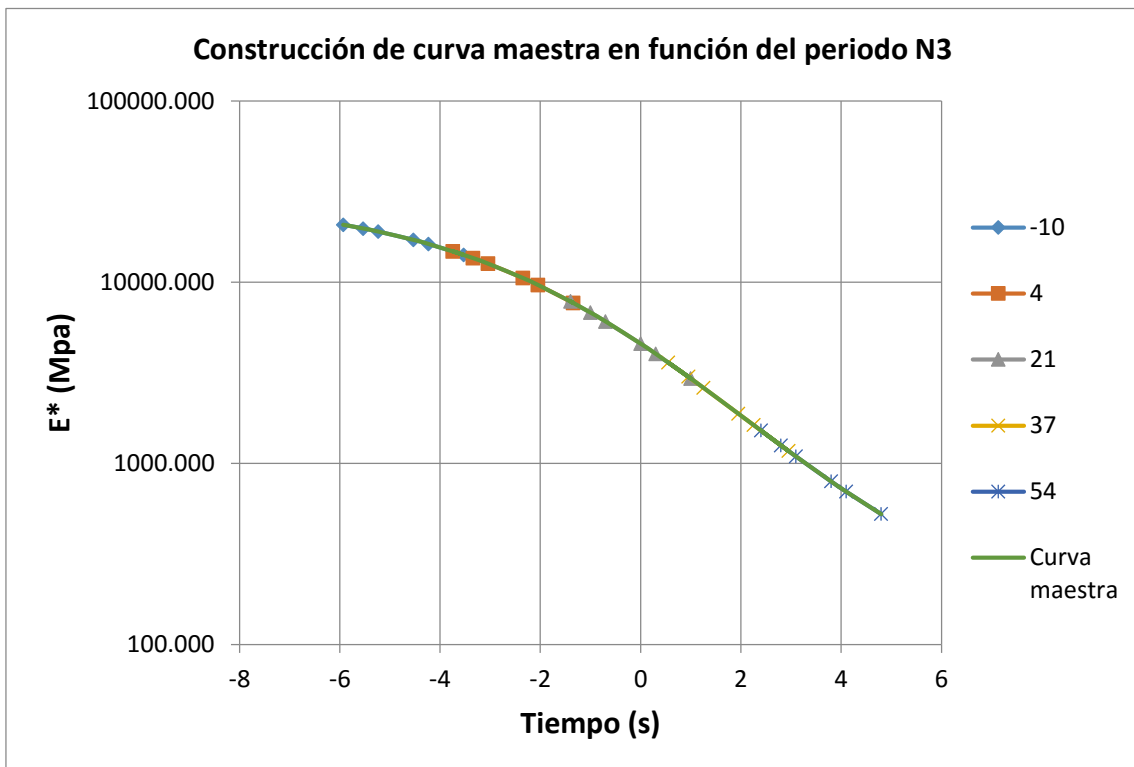
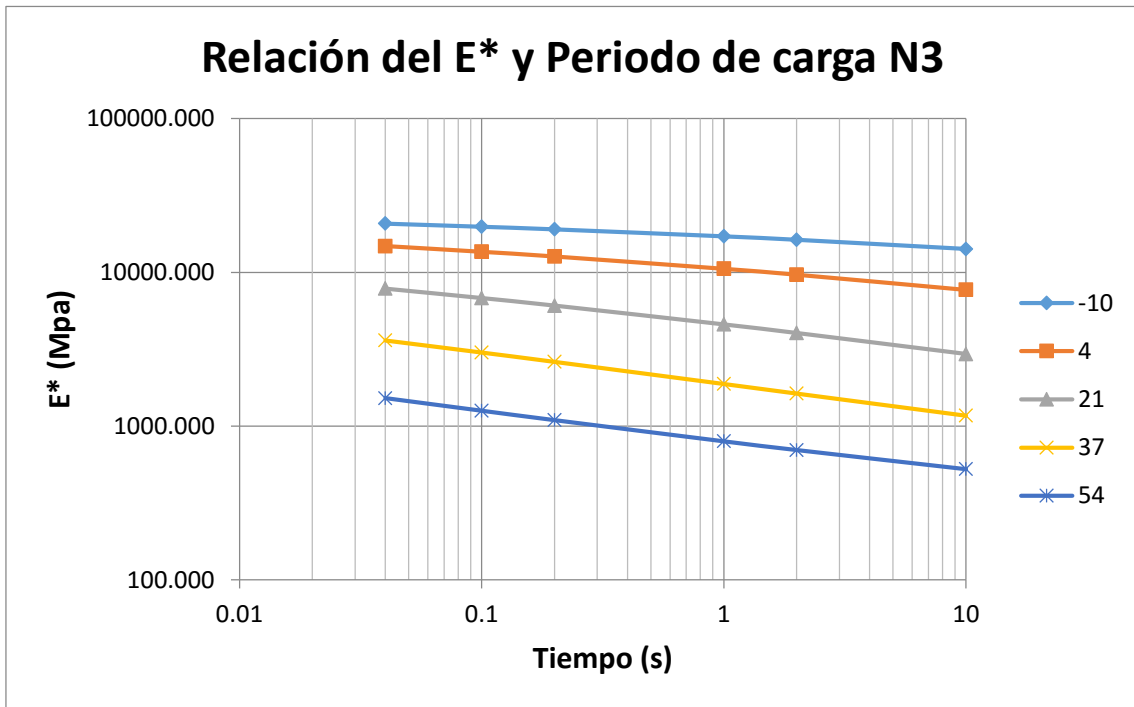
### Relación del E\* y Frecuencia de carga N2

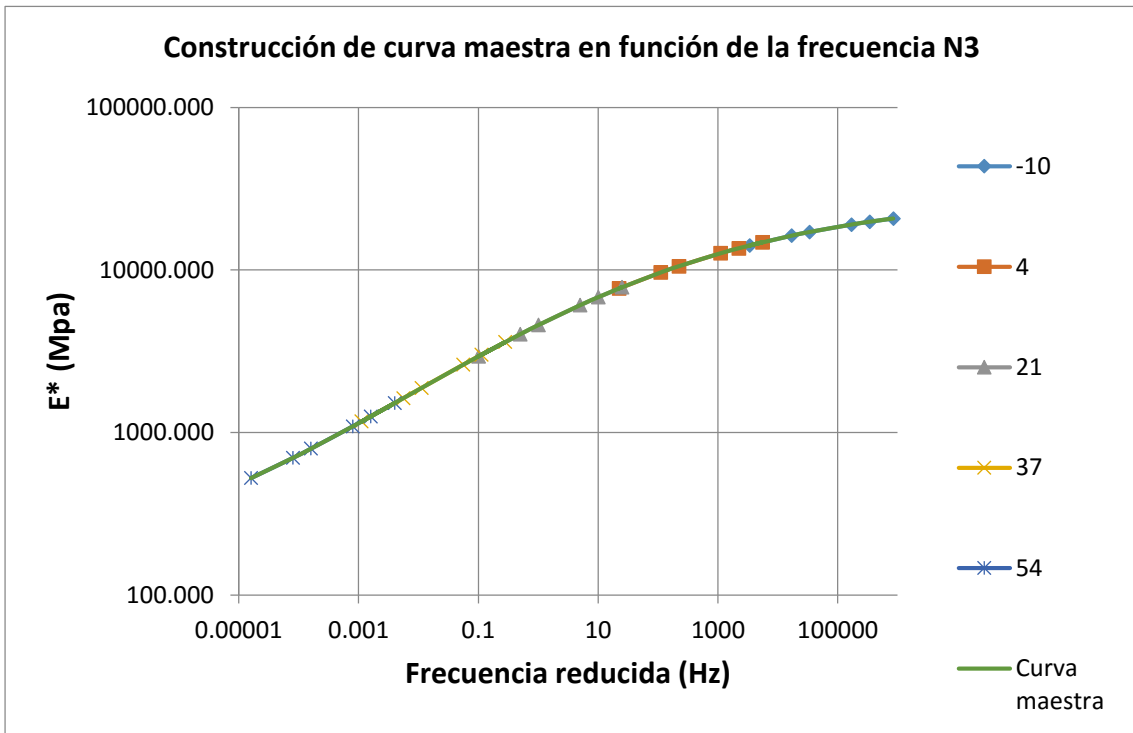
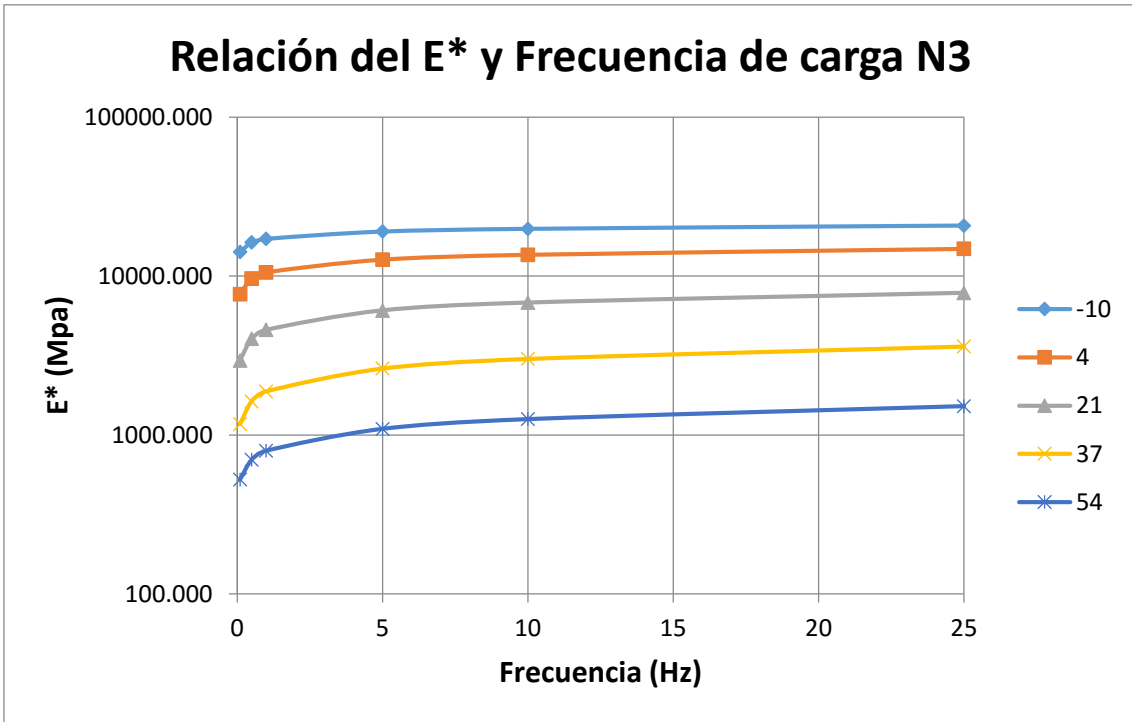


### Construcción de curva maestra en función de la frecuencia N2



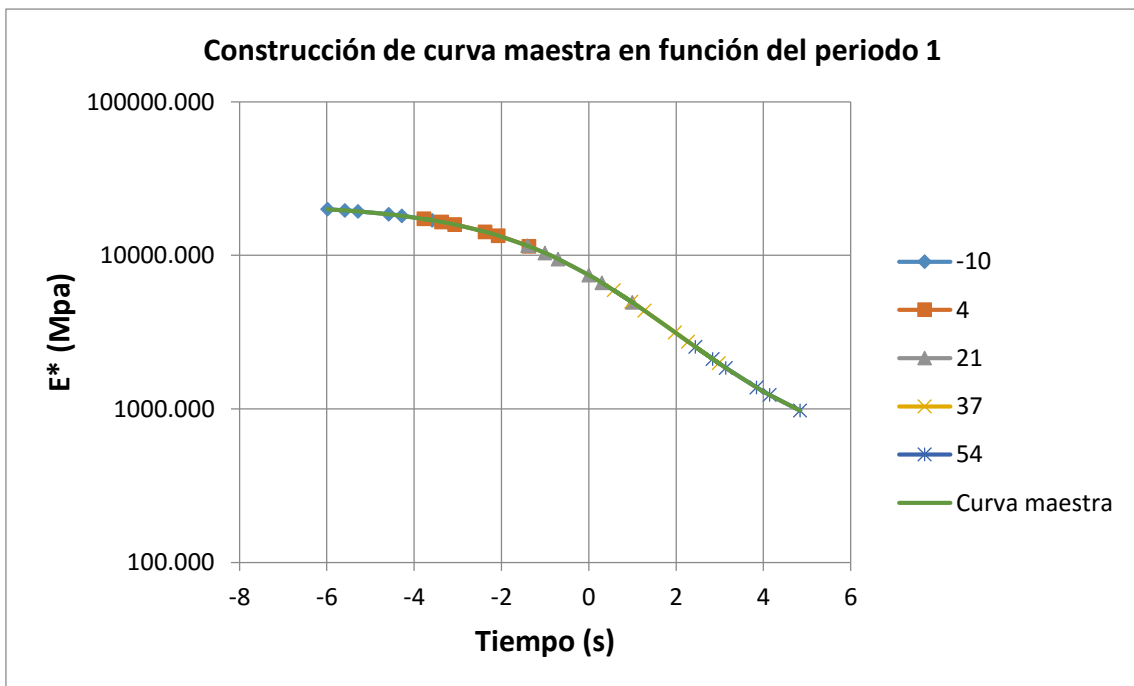
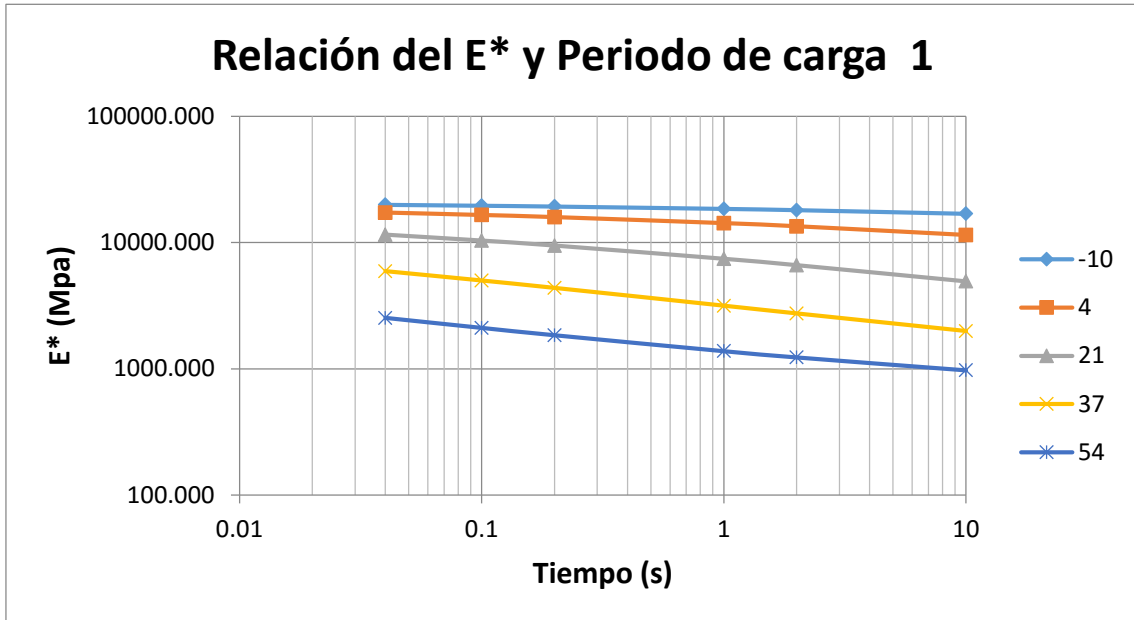
- Núcleo N3



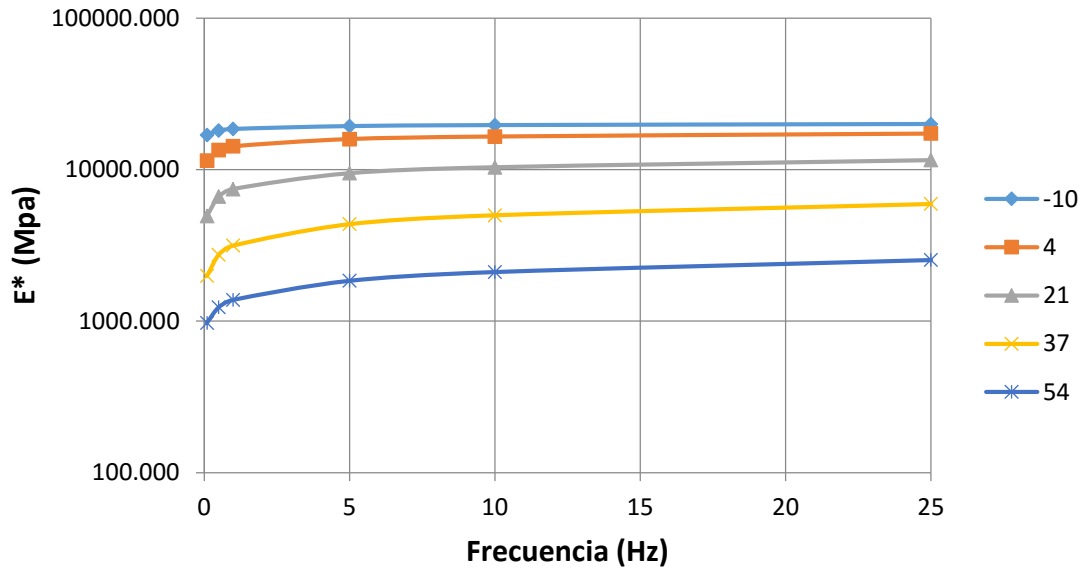


### Mezcla 3

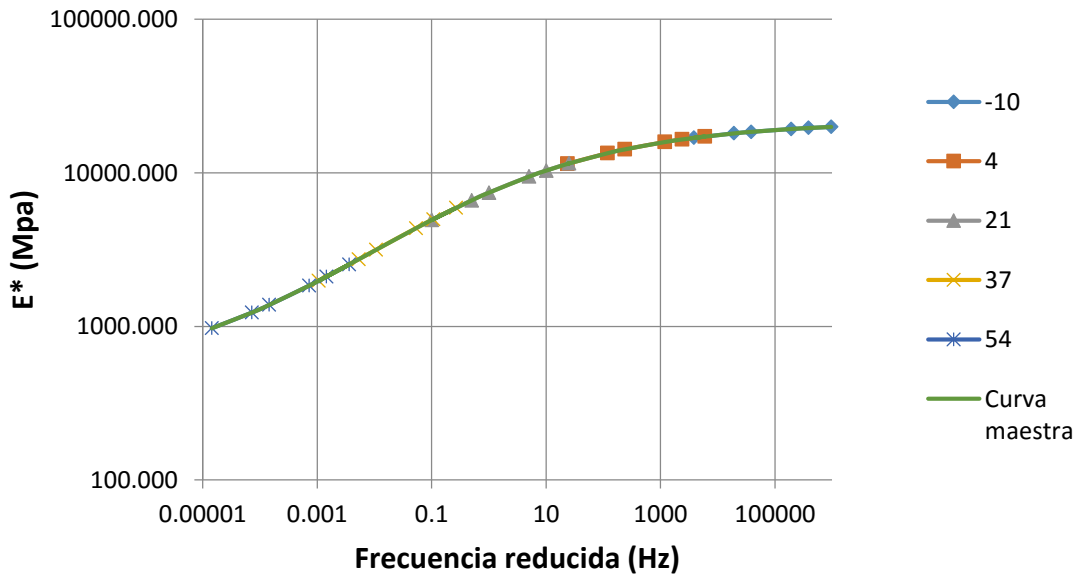
- Núcleo 1



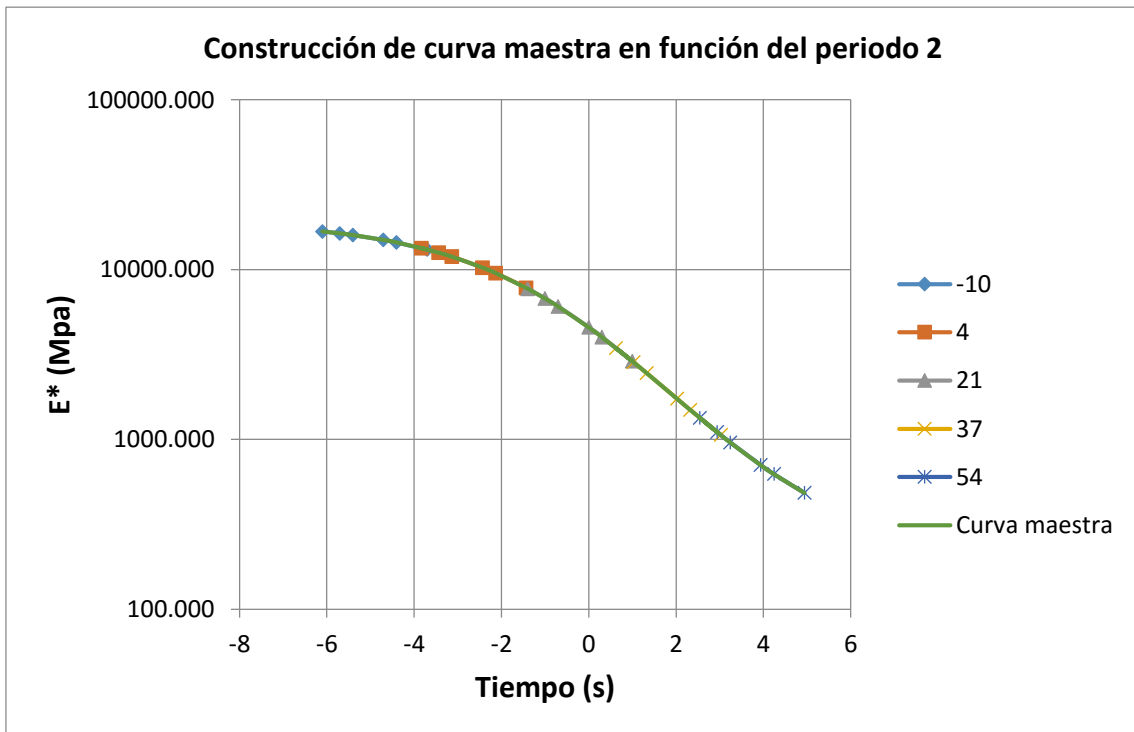
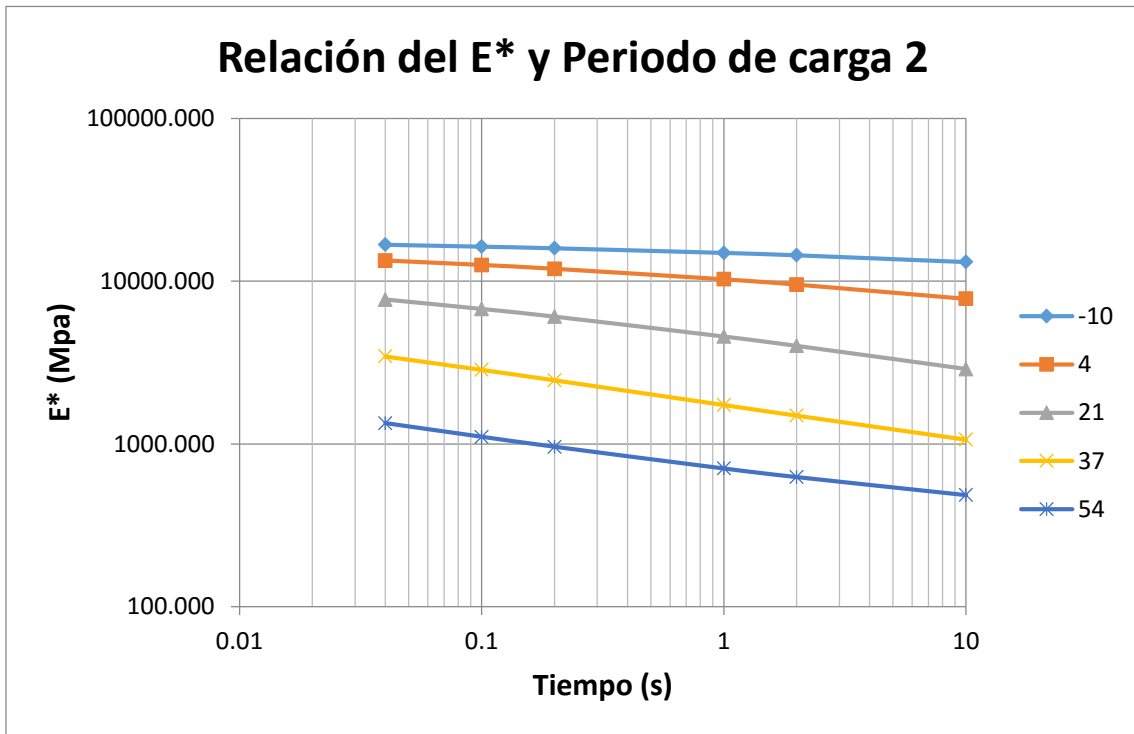
### Relación del E\* y Frecuencia de carga 1



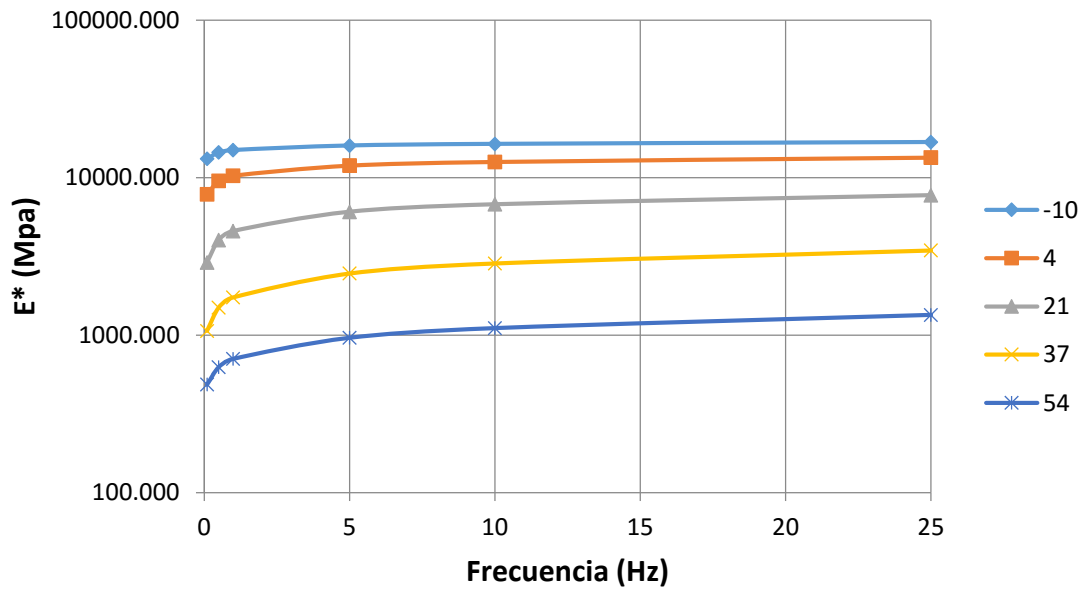
### Construcción de curva maestra en función de la frecuencia 1



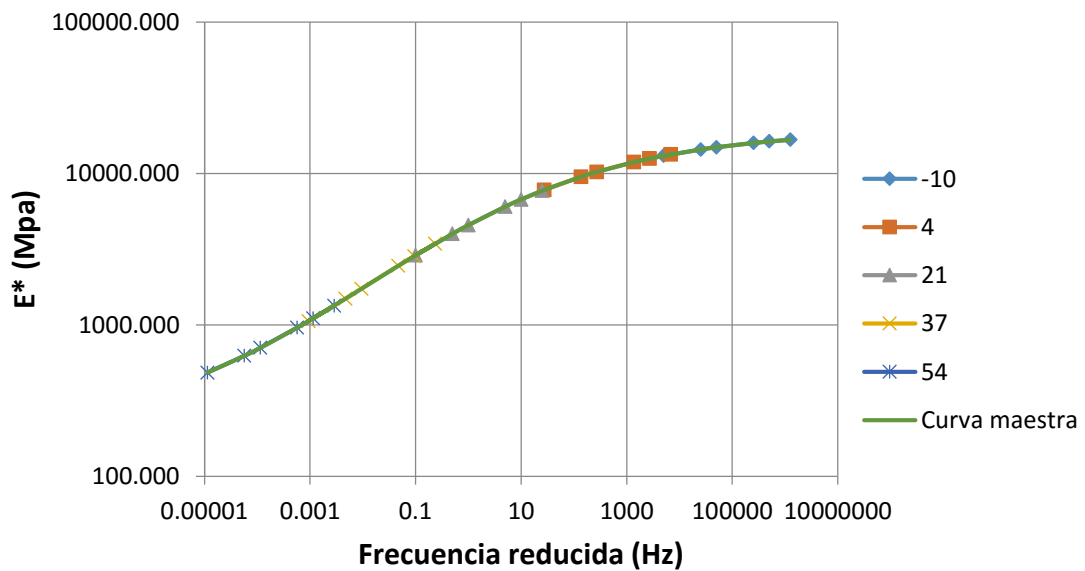
- Núcleo 2



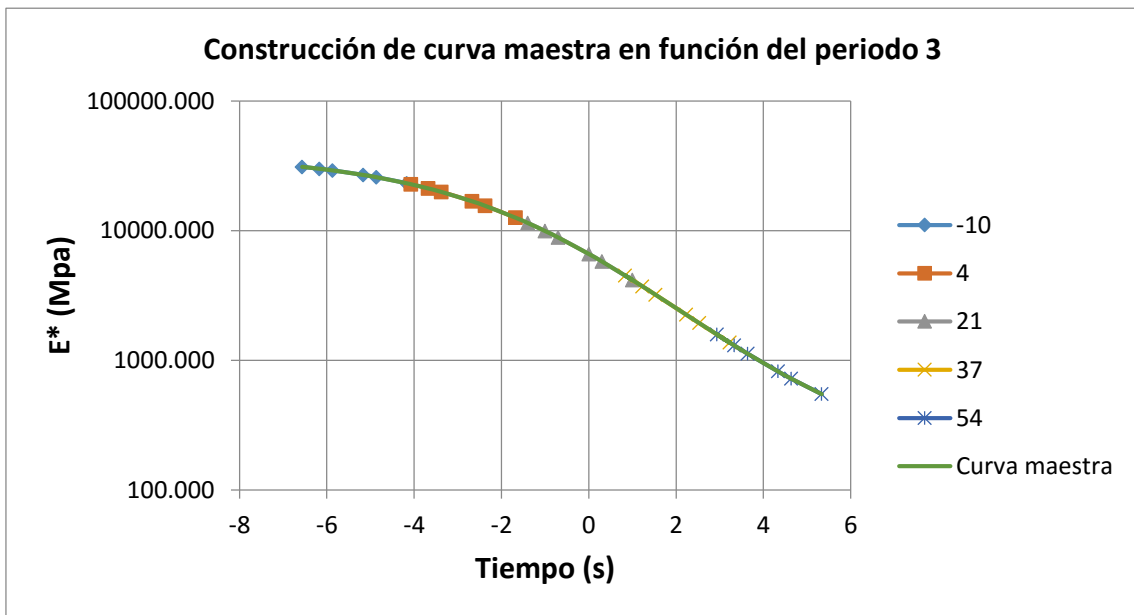
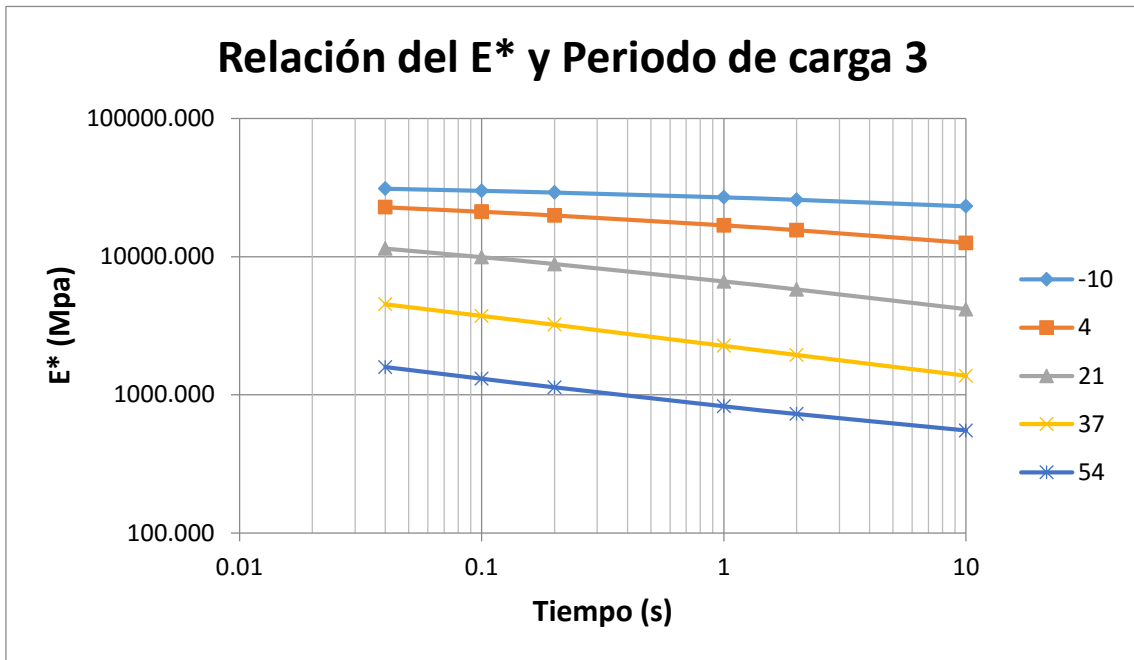
## Relación del E\* y Frecuencia de carga 2



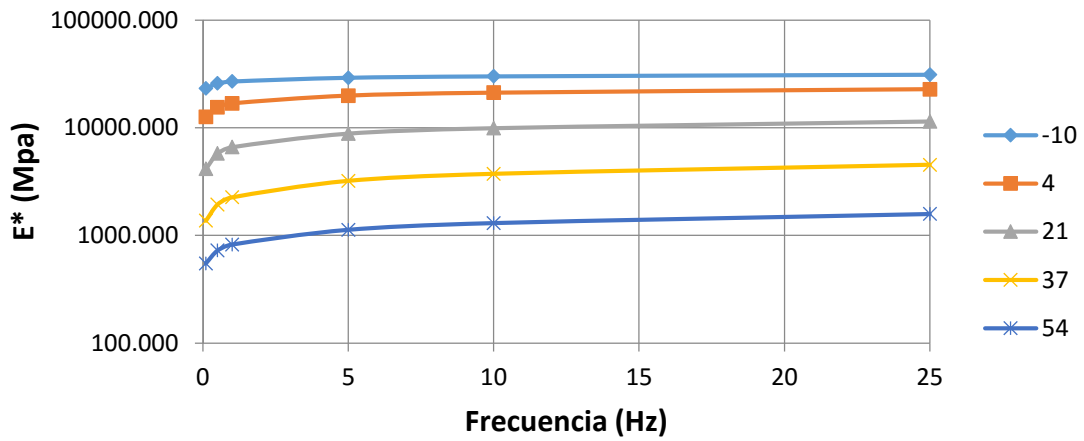
## Construcción de curva maestra en función de la frecuencia 2



- Núcleo 3



### Relación del E\* y Frecuencia de carga 3



### Construcción de curva maestra en función de la frecuencia 3

