

IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR EL MÓDULO
DINÁMICO DEL CONCRETO ASFÁLTICO EN PROBETAS DE TAMAÑO REDUCIDO

1

Implementación del método de prueba para determinar el módulo dinámico del concreto asfáltico
en probetas de tamaño reducido

Erica Juliana Cendales López y Daniela Alejandra Gómez Jaimes

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Eduardo Alberto Castañeda Pinzón

Docente escuela ingeniería civil UIS

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de ingeniería Civil

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo a nuestros padres por ser nuestro soporte en todo, apoyarnos en este proceso largo y siempre animarnos con lindas palabras, las cuales son nuestro motor para seguir adelante ante cualquier dificultad y frustración.

Agradecimientos

Agradecemos principalmente a nuestros padres y familia, por su amor incondicional, apoyo constante y por enseñarnos el valor del esfuerzo y perseverancia, los cuales fueron motivo de inspiración durante todo este proceso.

A nuestros docentes de Escuela de Ingeniería Civil quienes han sido la base para nuestra vida profesional, especialmente a nuestro director de tesis Eduardo Castaneda y a la ingeniera Cristina por su invaluable orientación, paciencia y sabiduría, que fueron fundamentales para la realización de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander por brindarnos todas las herramientas y el espacio para desarrollar este proyecto de manera segura y al personal de laboratorio quienes con su dedicación y conocimiento estuvieron siempre instruyéndonos en cada paso.

Tabla de contenido

- Introducción 14

- 1. Objetivos 16
 - 1.1 Objetivo General..... 16

 - 1.2 Objetivos Específicos 16

- 2. Marco teórico 17
 - 2.1. Rigidez de materiales en ingeniería de pavimentos 17
 - 2.1.1. Modulo resiliente 18

 - 2.1.2 Modulo complejo 18
 - 2.1.2.1 Módulo de almacenamiento 20

 - 2.1.2.2. Módulo de pérdida 21

 - 2.1.2.3. Angulo de fase 21

 - 2.1.3 Modulo dinámico 22

 - 2.1.4. Normas y métodos de ensayo de modulo dinámico..... 23
 - 2.1.4.1. AASHTO T 342: Método para determinar el módulo dinámico de mezclas

IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR EL MÓDULO
DINÁMICO DEL CONCRETO ASFÁLTICO EN PROBETAS DE TAMAÑO REDUCIDO

- asfálticas..... 23
- 2.1.4.2. AASHTO TP 132: Método Estándar de Ensayo para Determinar el Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas Usando Especímenes Pequeños en el Probador de Desempeño de Mezclas Asfálticas..... 24
- 2.2 Principio de superposición tiempo- temperatura 25
- 3. Equipo disponible DMA (Dynamic Mechanical Analyzer) 25
 - 3.1. Metravib DMA..... 26
 - 3.2 Selección de las condiciones de ensayo con el equipo DMA+1000..... 27
 - 3.2.1. Selección de las características geométricas de las probetas 28
 - 3.2.2. Selección de niveles de carga y de desplazamiento..... 29
 - 3.2.3. Selección de temperatura y frecuencia 32
- 4. Proceso de preparación y ensayo de muestras 33
 - 4.1 Elaboración de la probeta de concreto asfáltico 33
 - 4.2 Preparación de las muestras para la extracción de los núcleos 38
 - 4.3 Inicialización del DMA para ensayos de módulo dinámico 43
- 5. Resultados 50

IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR EL MÓDULO
DINÁMICO DEL CONCRETO ASFÁLTICO EN PROBETAS DE TAMAÑO REDUCIDO 6

5.1 Resultados de modulo complejo con probetas no adheridas al portamuestras	51
5.2 Resultados de modulo complejo con probetas adheridas al portamuestras	57
6. Análisis de resultados	62
7. Conclusiones	72
8. Recomendaciones	73
Referencias Bibliográficas.....	76
Apéndices.....	78

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Valores de la deformación unitaria.....</i>	24
Tabla 2. <i>Características del equipo DMA.....</i>	29
Tabla 3. <i>Clasificación de la rigidez según el DMA.....</i>	30
Tabla 4. <i>Valores de desplazamiento dinámico, fuerza estática y deformación unitaria dados por las normas.....</i>	32
Tabla 5. <i>Temperaturas y frecuencias recomendadas para la prueba</i>	32
Tabla 6. <i>Temperaturas y frecuencias usadas</i>	33
Tabla 7. <i>Cantidades y porcentajes de agregados y asfalto para mezclar.....</i>	34
Tabla 8. <i>Resumen valores de diseño.....</i>	35
Tabla 9. <i>E', E'', E^* y ángulo de fase de la mezcla 1 sin adherir al portamuestras.....</i>	51
Tabla 10. <i>E', E'', E^* y ángulo de fase de la mezcla 2 sin adherir al portamuestras.....</i>	52
Tabla 11. <i>Datos de frecuencia reducida para y modulo dinámico calculado para la mezcla 1 sin adherir al portamuestras</i>	54
Tabla 12. <i>Datos de frecuencia reducida y modulo dinámico calculado de la mezcla 2 sin adherir al portamuestras</i>	55
Tabla 13. <i>Parámetros de ajuste de curva maestra para mezcla 1 sin adherir al portamuestras.</i>	56
Tabla 14. <i>Parámetros de ajuste de curva maestra para mezcla 2 sin adherir al portamuestras.</i>	56
Tabla 15. <i>E', E'', E^* y ángulo de fase de la mezcla 1 adherida al portamuestras.....</i>	57
Tabla 16. <i>E', E'', E^* y ángulo de fase de la mezcla 2 adherida al portamuestras.....</i>	58

IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR EL MÓDULO
DINÁMICO DEL CONCRETO ASFÁLTICO EN PROBETAS DE TAMAÑO REDUCIDO 8

Tabla 17. Datos de frecuencia reducida y modulo dinámico calculado de la mezcla 1 adherida al portamuestras 59

Tabla 18. Datos de frecuencia reducida y modulo dinámico calculado de la mezcla 2 adheridas al portamuestras 60

Tabla 19. Parámetros de ajuste de curva maestra para mezcla 1 adheridas al portamuestras .. 61

Tabla 20. Parámetros de ajuste de curva maestra para mezcla 2 adheridas al portamuestras .. 61

Tabla A.1. Temperaturas de Ensayo y Frecuencias de Carga Recomendadas..... 82

Tabla A.2. Angulo de fase esperado..... 84

Tabla A.3. Modulo dinamico estimadi 84

Tabla B.1. Caso 1 85

Tabla B.2. Caso 2 86

Tabla B.3. Caso 3 87

Lista de Figuras

<i>Figura 1. Modulo Complejo</i>	19
<i>Figura 2. Maquina Metravib DMA+1000.</i>	26
<i>Figura 3. Dimensiones de la probeta inicial y la probeta planteada</i>	29
<i>Figura 4. Dominio de rigidez medible</i>	31
<i>Figura 5. Tamices utilizados</i>	36
<i>Figura 6. Clasificación de los agregados</i>	36
<i>Figura 7. Compactador giratorio</i>	37
<i>Figura 8. Probetas de concreto asfaltico</i>	38
<i>Figura 9. Inmersión de las probetas en nitrógeno liquido</i>	39
<i>Figura 10. Fracturación por inmersión de más de 1 hora</i>	40
<i>Figura 11. Extracción de núcleos</i>	41
<i>Figura 12. Perfilación de las caras</i>	42
<i>Figura 13. Núcleos extraídos</i>	43
<i>Figura 14. Equipo DMA</i>	44
<i>Figura 15. Selección de la geometría del espécimen y nombramiento</i>	45
<i>Figura 16. Configuración de ensayo: desplazamiento dinámico, frecuencia y fuerza estática.</i>	46
<i>Figura 17. Temperaturas de ensayo</i>	47

<i>Figura 18. Tanque del equipo DMA.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 19. Ubicación del espécimen.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 20. Pantalla principal del software antes de mostrar los resultados de ensayo.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 21. Resultados de modulo dinámico para la mezcla 1 sin adherir la probeta al portamuestras</i>	<i>62</i>
<i>Figura 22. Resultados de modulo dinámico para la mezcla 1 con probeta adherida al portamuestras</i>	<i>62</i>
<i>Figura 23. Resultados de modulo dinámico para la mezcla 2 sin adherir al portamuestras</i>	<i>63</i>
<i>Figura 24. Resultados de modulo dinámico para la mezcla 2 adherida al portamuestras</i>	<i>63</i>
<i>Figura 25. Resultados ángulo de fase de la mezcla 1 sin adherir al portamuestras.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 26. Resultados ángulo de fase de la mezcla 1 adherida al portamuestras</i>	<i>66</i>
<i>Figura 27. Resultados ángulo de fase de la mezcla 2 sin adherir al portamuestras.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 28. Resultados ángulo de fase de la mezcla 2 sin adherir al portamuestras.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 29. Resultados curva maestra de la mezcla 1 sin adherir al portamuestras.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 30. Resultados curva maestra de la mezcla 1 adherida al portamuestras.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 31. Resultados curva maestra de la mezcla 2 sin adherir al portamuestras.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 32. Resultados curva maestra de la mezcla 2 adherida al portamuestras.....</i>	<i>70</i>

Listas de Apéndices

Apéndice A: Determinación del Módulo Dinámico en Mezclas Asfálticas Utilizando Probetas Pequeñas en el Equipo de Análisis Mecánico Dinámico (DMA)	78
Apéndice B: Resultados obtenidos con otras variables a temperatura ambiente.....	85

Resumen

Título: Implementación del método de prueba para determinar el módulo dinámico del concreto asfáltico en probetas de tamaño reducido**

Autor(es): Erica Juliana Cendales López, Daniela Alejandra Gómez Jaimes^{††}

Palabras Clave: pavimento flexible, diseño de pavimentos, materiales granulares, ensayos de laboratorio

Descripción: El presente estudio tiene como objetivo analizar el módulo dinámico en probetas de concreto asfáltico, evaluando la influencia de la temperatura y la frecuencia sobre el comportamiento mecánico de las estructuras de pavimento flexible. Para ello, se emplea la norma AASHTO TP132, que describe el procedimiento para medir el módulo dinámico en mezclas asfálticas utilizando probetas de tamaño reducido. Esta metodología está diseñada para mezclas densas con tamaño de agregado nominal máximo de hasta 19 mm; en este caso, se utilizan probetas elaboradas con mezcla asfáltica densa en caliente de gradación continua, tipo MDC-10, habitual en capas de rodadura para vías de bajo tráfico.

Los ensayos se realizan en los laboratorios de la Universidad Industrial de Santander, que disponen del equipo DMA+1000 de Metravib. Este dispositivo permite caracterizar propiedades mecánicas en función de la temperatura y la frecuencia, y cuenta con un software especializado para modelar el comportamiento de los pavimentos.

A partir de los datos obtenidos se construye una curva maestra mediante el principio de superposición tiempo-temperatura, empleando los valores de módulo dinámico y las frecuencias de ensayo. Este análisis permite evaluar la viabilidad técnica y económica del uso de probetas de tamaño reducido para caracterización de mezclas asfálticas en el DMA, así como proponer un prototipo de norma que respalde el uso de este equipo en estudios de pavimentos, determinando su viabilidad y eficiencia para una mezcla MDC-10.

** Trabajo de grado.

^{††} Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Pregrado. Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzón Docente De La Universidad Industrial de Santander

Abstract

Title: Implementation of the Test Method to Determine the Dynamic Modulus of Asphalt
Concrete in Small Specimens ‡‡

Author(s): Erica Juliana Cendales López, Daniela Alejandra Gómez Jaimes §§

Key Words: flexible pavement, pavement design, granular materials, laboratory testing

Description: The present study aims to analyze the dynamic modulus in asphalt concrete specimens, evaluating the influence of temperature and frequency on the mechanical behavior of flexible pavement structures. For this purpose, the AASHTO TP132 standard is applied, which describes the procedure for measuring the dynamic modulus of asphalt mixtures using small-size specimens. This methodology is designed for dense-graded mixtures with a nominal maximum aggregate size of up to 19 mm; in this case, specimens were prepared with hot-mix dense-graded asphalt concrete, type MDC-10, commonly used for surface courses in low-traffic roads.

The tests are conducted at the laboratories of the Universidad Industrial de Santander, equipped with the Metravib DMA+1000 device. This equipment allows for the characterization of mechanical properties as a function of temperature and frequency and includes specialized software for modeling pavement behavior.

From the data obtained, a master curve is constructed using the time–temperature superposition principle, based on the dynamic modulus values and test frequencies. This analysis makes it possible to assess the technical and economic feasibility of using small-size specimens for the characterization of asphalt mixtures in the DMA, as well as to propose a draft standard supporting the use of this equipment in pavement studies, determining its viability and efficiency for an MDC-10 mixture.

‡‡ Degree Work

§§ Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzon

Introducción

La caracterización fisicomecánica de los materiales para la construcción de las estructuras de pavimentos es fundamental para asegurar un adecuado desempeño estructural y funcional a lo largo del tiempo. El parámetro más relevante para esta caracterización es la rigidez, ya que permite entender la respuesta del material ante cargas repetidas, su capacidad de deformación y su resistencia al deterioro. Uno de los métodos más utilizados para evaluar esta propiedad es la determinación del módulo dinámico, el cual refleja la relación entre esfuerzo y deformación bajo condiciones dinámicas y es ampliamente empleado en métodos mecanicistas y mecanicistas-empíricos de diseño de pavimentos.

En ese contexto, el módulo dinámico se convierte en una propiedad mecánica esencial para evaluar el desempeño de mezclas asfálticas. Este parámetro permite establecer cómo responde la mezcla ante distintas frecuencias de carga, simulando el paso de vehículos a diferentes velocidades y condiciones de temperatura. La determinación de este módulo se ha estandarizado en diversas normas técnicas, como la AASHTO TP132, que plantea una metodología específica para evaluar el módulo dinámico en probetas de tamaño reducido. Esta alternativa resulta especialmente útil, ya que permite obtener mayor cantidad de especímenes de ensayo con menor cantidad de material.

La Universidad Industrial de Santander cuenta con el equipo DMA de Metravib, que permite realizar ensayos similares. Este equipo puede aplicar cargas cíclicas con diferentes frecuencias y operar bajo un amplio rango de temperaturas, pero debido a su configuración, está diseñado para trabajar exclusivamente con probetas pequeñas. Esta característica representa una oportunidad para aprovechar al máximo el equipo, explorando su potencial dentro de la

Este trabajo de grado se enfoca en la implementación del ensayo de módulo dinámico empleando probetas reducidas de mezcla asfáltica MDC-10 evaluando la validez de los resultados obtenidos al compararlos con valores de referencia para mezclas ensayadas en condiciones convencionales. Se busca así no solo validar el uso del DMA para este tipo de pruebas, sino también contribuir al desarrollo de metodologías alternativas viables para la caracterización mecánica de materiales utilizados en pavimentos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General.

Implementar un procedimiento experimental que permita la medición del módulo dinámico en probetas de concreto asfáltico de tamaño reducido, evaluando su viabilidad y comparabilidad frente a las metodologías tradicionales empleadas con probetas de dimensiones estándar.

1.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de esta investigación consisten en definir el tamaño adecuado de las probetas que serán sometidas a ensayo, establecer un protocolo detallado para la fabricación de la mezcla asfáltica, su compactación y la extracción de núcleos que funcionen como probetas de laboratorio.

Con base en probetas de tamaño reducido, se busca determinar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas bajo cargas cíclicas variando frecuencia y temperatura, evaluando su respuesta viscoelástica.

Como resultado se redacta una primera aproximación a un modelo de norma de ensayo para que con mayor número de pruebas y comprobaciones se ajuste progresivamente para contar con una alternativa para medir la rigidez del concreto asfáltico a través del módulo complejo y dinámico.

2. Marco teórico

2.1. Rigidez de materiales en ingeniería de pavimentos

La rigidez es una propiedad mecánica fundamental que describe la capacidad de un material para resistir la deformación bajo la acción de cargas externas. En el ámbito de los pavimentos, la rigidez de una mezcla asfáltica se relaciona directamente con su capacidad para soportar cargas repetitivas sin sufrir deformaciones excesivas o fallas prematuras. Esta propiedad se cuantifica a través del módulo dinámico, también conocido como módulo complejo, el cual representa la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación unitaria resultante en condiciones de carga cíclica.

El módulo de rigidez se define como la relación entre el esfuerzo cortante τ aplicado y la deformación cortante γ resultante:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

En el caso de materiales viscoelásticos, como las mezclas asfálticas, el módulo de rigidez varía con las condiciones de temperatura y la frecuencia de las cargas a las que está expuesto.

El módulo de rigidez permite caracterizar la capacidad de un material para resistir esfuerzos cortantes sin deformarse excesivamente, también es clave en el diseño de pavimentos asfálticos, ya que ayuda a predecir su respuesta ante cargas repetidas del tráfico, se usa en ensayos dinámicos para evaluar el desempeño de las mezclas asfálticas en distintas condiciones ambientales y de carga, además su valor influye en el diseño estructural de carreteras, ya que pavimentos con un módulo de rigidez alto presentan menor deformación y mayor durabilidad. (AASHTO T315)

2.1.1. Modulo resiliente

En el pasado se utilizó el ensayo de modulo resiliente para medir la rigidez de las mezclas asfálticas. El módulo resiliente (MR) es un parámetro mecánico clave que caracteriza la rigidez de una mezcla asfáltica cuando está sometida a cargas repetidas, como las generadas por el paso continuo de vehículos. Este módulo se define como la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación axial elástica o recuperable que experimenta la muestra durante la fase de descarga en ensayos con varios ciclos de carga:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r}$$

Donde:

- σ_d : Es el esfuerzo desviador aplicado (diferencia entre el esfuerzo axial y el confinamiento).
- ε_r : Es la deformación axial recuperable.

Su determinación se lleva a cabo mediante ensayos de carga repetida en laboratorio, bajo normas técnicas como AASHTO T-378. El resultado ha sido utilizado como insumo en el diseño de pavimentos.

2.1.2 Modulo complejo

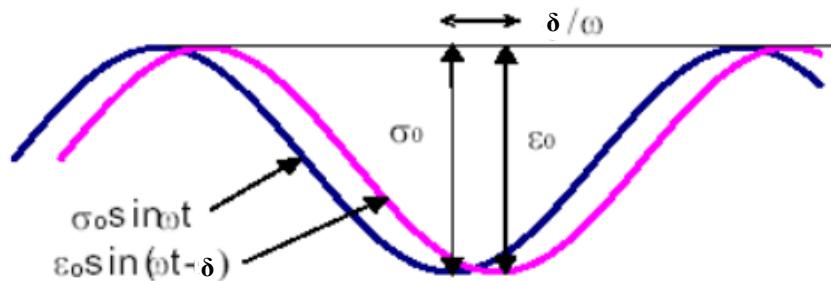
Es un concepto utilizado en la mecánica de materiales y la ingeniería civil para describir las propiedades viscoelásticas de materiales como los polímeros y los concretos asfálticos. Este

término se refiere a la relación entre la tensión y la deformación en un material cuando se somete a una carga oscilante, y se expresa generalmente en términos de componentes que representan la parte elástica (almacenamiento de energía) y la parte viscosa (disipación de energía).

En la figura 1 se muestra la respuesta de un material viscoelástico como la mezcla asfáltica en caliente, bajo carga sinusoidal (Gómez López, Flores Flores, & Delgado Alamilla, 2017)

Figura 1.

Modulo Complejo



Nota. En la figura se puede observar el comportamiento de un material viscoelástico sometido a carga cíclica.

El módulo complejo es fundamental en la caracterización del comportamiento de los materiales bajo cargas dinámicas, permitiendo predecir su rendimiento bajo condiciones de carga reales. Por ejemplo, en el caso de pavimentos asfálticos, un módulo complejo adecuado es indicativo de una mezcla capaz de resistir deformaciones permanentes y mantener su integridad estructural a lo largo del tiempo. (Bonaquist, R, 2009).

El módulo de rigidez complejo es un número complejo que consta de dos partes; la parte real, la cual representa la rigidez (parte elástica) y la imaginaria que representa el amortiguamiento interno de los materiales (parte viscosa).

$$E^* = E' + iE''$$

Donde:

E' es el módulo de almacenamiento (parte elástica).

E'' es el módulo de pérdida (parte viscosa).

La rigidez se define como la relación entre el esfuerzo sinusoidal y la amplitud de la deformación sinusoidal. como sigue:

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 \text{ Seno}(wt)}{\varepsilon_0 \text{ Seno}(wt-\delta)}$$

2.1.2.1 Módulo de almacenamiento

El módulo de almacenamiento (E' en tensión/compresión) es una medida de la capacidad de un material viscoelástico para almacenar energía elástica durante una carga cíclica. Se considera la parte elástica del módulo complejo y representa la rigidez del material en respuesta a una carga aplicada periódicamente.

Este parámetro indica cuánta energía recupera el material después de ser deformado, lo que es crucial para entender su comportamiento bajo cargas repetidas. En mezclas asfálticas, valores altos de E' indican un material menos propenso a deformaciones permanentes, también se utiliza en ensayos de fatiga y fluencia para evaluar la vida útil de los pavimentos permitiendo seleccionar ligantes asfálticos adecuados para distintas condiciones climáticas y de tráfico. (ASTM D7175). Matemáticamente, es la parte real del módulo complejo

2.1.2.2. Módulo de pérdida

El módulo de pérdida (E'' en tensión/compresión) mide la energía disipada en forma de calor debido a la fricción interna y la fluencia del material cuando está sometido a una carga oscilatoria. Representa la parte viscosa del módulo complejo. Matemáticamente, es la parte imaginaria del módulo complejo:

Un material con un alto módulo de pérdida tiene un comportamiento más viscoso, lo que significa que absorbe más energía y genera más disipación térmica. (ASTM D7175)

2.1.2.3. Angulo de fase

El ángulo de fase (δ) es un parámetro que describe la relación entre la energía almacenada y la energía disipada en un material viscoelástico cuando se somete a una carga oscilatoria. Se define como el desfase entre el esfuerzo aplicado y la respuesta en deformación del material. (ASTM D7175).

Matemáticamente, el ángulo de fase se expresa como:

$$\tan(\delta) = \frac{E''}{E'}$$

Donde:

E' (Módulo de almacenamiento): Representa la energía elástica almacenada en cada ciclo de carga.

E'' (Módulo de pérdida): Representa la energía disipada en forma de calor debido a la fricción interna del material.

El valor del ángulo de fase (δ) es indicativo del comportamiento viscoelástico del material:

- Si $\delta = 0^\circ \rightarrow$ Comportamiento totalmente elástico (sin disipación de energía).
- Si $\delta = 90^\circ \rightarrow$ Comportamiento totalmente viscoso (flujo puro).
- Si $0^\circ < \delta < 90^\circ \rightarrow$ Comportamiento viscoelástico, típico de materiales como los ligantes asfálticos y las mezclas asfálticas.

2.1.3 Modulo dinámico

En la teoría visco-elástica, al valor absoluto del módulo complejo $|E^*|$ se le ha llamado módulo dinámico.

Los valores del módulo dinámico se han empleado tanto para el diseño de las mezclas asfálticas para pavimento, como para el diseño del espesor de la capa de pavimento asfáltico. (Leiva, 2004).

$$E \text{ dinámico} = |E^*| = \left| \frac{\sigma_0 \text{ Seno}(wt)}{\varepsilon_0 \text{ Seno}(wt-\delta)} \right| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$$

Donde:

σ_0 es el valor máximo del esfuerzo sinusoidal.

ε_0 es el valor máximo de la deformación unitaria sinusoidal.

2.1.4. Normas y métodos de ensayo de modulo dinámico

Existen diversas normas que abordan el módulo dinámico y los métodos de ensayo asociados, las cuales han sido tomadas como referencia en el desarrollo del presente proyecto. Entre estas se destacan las siguientes:

2.1.4.1. AASHTO T 342: Método para determinar el módulo dinámico de mezclas asfálticas

Establece el procedimiento para preparar y ensayar especímenes de mezcla asfáltica en caliente con el fin de determinar su módulo dinámico y el ángulo de fase en un rango de temperaturas y frecuencias de carga. La norma es aplicable a especímenes de laboratorio de mezclas con un tamaño máximo nominal del agregado de hasta 37.5 mm (1.48 pulgadas). Se realizan ensayos a temperaturas de -10°C, 4.4°C, 21.1°C, 37.8°C y 54.4°C, y a frecuencias de 0.1 Hz, 0.5 Hz, 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz y 25 Hz, niveles de esfuerzo de hasta 2800 kPa (400 psi) y deformaciones en el intervalo de 50 a 75 $\mu\epsilon$.

Para la preparación del espécimen se compactan especímenes cilíndricos de dimensiones estándar, generalmente de 100 mm de diámetro y 150 mm de altura, siguiendo procedimientos específicos para garantizar la uniformidad y representatividad de la muestra. (AASHTO T 342-22)

2.1.4.2. AASHTO TP 132: Método Estándar de Ensayo para Determinar el Módulo

**Dinámico de Mezclas Asfálticas Usando Especímenes Pequeños en el Probador
de Desempeño de Mezclas Asfálticas**

Es un método de prueba estándar que establece un procedimiento para medir el módulo dinámico de mezclas asfálticas utilizando especímenes de dimensiones reducidas.

La norma se aplica a mezclas densamente graduadas con tamaños máximos nominales de agregado de hasta 19.0 mm (0.75 pulgadas). Los especímenes son cilindros de 38 mm de diámetro por 110 mm de altura, obtenidos mediante compactación en el compactador giratorio Superpave o extraídos de núcleos de campo. Los ensayos se realizan a diversas temperaturas y frecuencias de carga para simular condiciones reales de servicio, temperaturas entre 4 a 35 grados y frecuencias entre 0.1 a 10 Hz. (AASHTO TP 132); y además se trabaja con valores de deformación entre 50 a 75 $\mu\epsilon$.

Tabla 1.

Valores de la deformación unitaria.

Estadística de Calidad de Datos	Limite
Deriva de deformación	En la dirección de la carga aplicada o hasta un 100 % en la dirección opuesta a la carga aplicada
Deformación pico a pico	50 a 75 microdeformaciones
Error estándar de la carga	10 %
Error estándar de la deformación	10 %
Uniformidad de la deformación	30 %
Uniformidad del ángulo de fase	3°

Nota. Se muestran los valores de deformación unitaria, obtenida de la norma AASHTO TP 132 (pág 9).

2.2 Principio de superposición tiempo- temperatura

El principio de superposición tiempo-temperatura es un concepto fundamental en la ingeniería de materiales, especialmente en el estudio del comportamiento de materiales poliméricos como el asfalto. Este principio establece que el efecto del tiempo y la temperatura en el comportamiento de un material se puede predecir o modelar combinando los efectos individuales de tiempo y temperatura de manera proporcional.

Los módulos elásticos de los polímeros amorfos típicos aumentan con la velocidad de carga, pero disminuyen cuando aumenta la temperatura. (Gómez López, Flores Flores, & Delgado Alamilla, 2017)

En el contexto de los pavimentos asfálticos, el principio de superposición tiempo-temperatura se utiliza para predecir cómo el módulo elástico (rigidez) y la viscosidad del asfalto cambian con el tiempo y la temperatura. Esta predicción es esencial para comprender el comportamiento del pavimento bajo diferentes condiciones climáticas y de tráfico a lo largo de su vida útil.

3. Equipo disponible DMA (Dynamic Mechanical Analyzer)

Los instrumentos de la serie DMA son máquinas de ensayo dinámicas basadas en un concepto innovador de bastidor de ensayo de una sola pieza de alta rigidez. Están dedicados al análisis preciso de las propiedades viscoelásticas de los materiales más avanzados.

3.1. Metravib DMA

El equipo disponible forma parte de la serie DMA+ de Metravib, que incluye los modelos DMA+300, DMA+1000 y DMA+2000, diferenciados principalmente por su capacidad de fuerza dinámica máxima: 300 N, 1000 N y 2000 N respectivamente. (Metravib Material Testing, s.f)

Figura 2

Maquina Metravib DMA+1000.



Nota. En la figura se observa el equipo DMA +1000, sus siglas significan Dynamic Mechanical Analysis que en español traduce análisis mecánico dinámico

El equipo DMA+1000, utilizado para la caracterización dinámica de materiales, ofrece una alta precisión en la medición de propiedades mecánicas gracias a su diseño y componentes avanzados. Su estructura está desacoplada de las vibraciones secundarias, lo cual evita interferencias que puedan afectar la medición. Además, el sistema realiza correcciones automáticas

durante los ensayos para mejorar la exactitud en la determinación de la rigidez de las probetas. La medición de fuerza se realiza mediante un sensor piezoeléctrico de alta sensibilidad y, en frecuencias menores a 0.6 Hz, se controla directamente a través de la corriente de la bobina del excitador, lo cual permite aplicar fuerzas dinámicas muy pequeñas con gran precisión. En cuanto al desplazamiento, se emplea un transductor capacitivo para frecuencias bajas y un acelerómetro para frecuencias mayores, asegurando una medición precisa en todo el rango operativo. El equipo también cuenta con un sistema de selección automática del método de medición más adecuado según las condiciones del ensayo, lo que elimina la necesidad de ajustes manuales. Gracias a estas características, el DMA permite realizar ensayos dinámicos en un amplio rango de frecuencias (desde 1E-5 Hz hasta 1000 Hz) sin pérdida de exactitud, siendo especialmente útil para analizar materiales con baja rigidez o tamaños reducidos.

La precisión en la aplicación de la carga es aproximadamente $0.1 \text{ N} \pm 1\%$ de la carga aplicada y la precisión en la medición de desplazamientos puede ser de hasta $0.1 \mu\text{m}$ (micrómetros) típicamente $\pm 1 \mu\text{m}$ o mejor, dependiendo de la calibración y sensores usados

Esto permite medir desplazamientos extremadamente pequeños, como los que generan las deformaciones de $50\text{--}75 \mu\epsilon$ en probetas pequeñas.

3.2 Selección de las condiciones de ensayo con el equipo DMA+1000.

Para seleccionar las condiciones de ensayo se tuvieron en cuenta varios factores, los cuales se muestran a continuación:

3.2.1. Selección de las características geométricas de las probetas

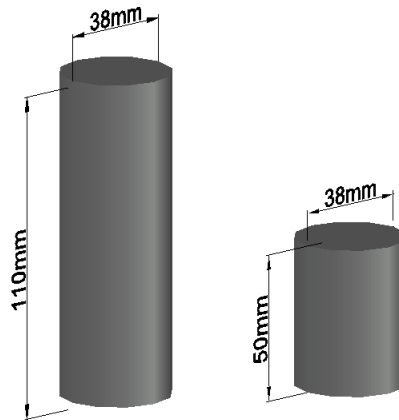
La norma AASHTO TP-132 establece que las probetas de mezcla asfáltica deben tener un diámetro de 38 mm (1.5 in) y una altura de 110 mm (4.33 in), utilizando agregados con un tamaño máximo nominal de 19.0 mm (0.75 in). Sin embargo, la máquina DMA de Metravib tiene una capacidad máxima de ensayo para especímenes de hasta 60 mm de altura sin tener en cuenta los platos, lo que hace necesario ajustar las dimensiones de la probeta lo que podría comprometer la representatividad de los resultados.

Con el fin de garantizar la uniformidad en la aplicación de cargas y minimizar los efectos de flexión, se ha decidido modificar la altura de la probeta manteniendo el diámetro especificado en la norma AASHTO TP-132 (1.5 in). Esta decisión responde a la facilidad de extracción de núcleos en campo, dado que las brocas de 1.5 in son de uso común en la obtención de muestras de rocas.

Para optimizar la evaluación de las propiedades mecánicas del material y asegurar que la falla ocurra predominantemente por compresión, se ha establecido una nueva altura de 50 mm (2 in) la cual fue la altura máxima permitida por el equipo DMA debido a sus dimensiones. Esta relación altura-diámetro garantiza que el núcleo sea lo suficientemente alto para contener una cantidad representativa de material sin generar efectos significativos de esbeltez que podrían afectar la precisión del ensayo.

Figura 3

Dimensiones de la probeta inicial y la probeta planteada



Nota. En la figura se observan las dimensiones de la probeta establecida por la norma AASHTO TP 132 y las definidas finalmente para el ensayo.

3.2.2. Selección de niveles de carga y de desplazamiento

El DMA de Metravib es un analizador mecánico dinámico de alta capacidad para caracterizar las propiedades mecánicas y viscoelásticas de diversos materiales.

Sus especificaciones clave incluyen:

Tabla 2.

Características del equipo DMA

Elemento	máximo	mínimo
Fuerza dinámica [N]	1000	1E-01
Fuerza estática [N]	±500	±250
Frecuencia [Hz]	1000	0,00001
Temperatura [°C]	500	-150
Desplazamiento [mm]	0,006	5E-08

Nota. Especificaciones de los valores máximos y mínimos de desplazamiento dinámico, carga

El ámbito en el que puede trabajar el equipo DMA está en del orden de las siguientes rigideces 20000 N/m hasta 3E+09 N/m, aplicando correcciones para garantizar precisión, especialmente en materiales más rígidos.

Estas correcciones dependen según el tipo de muestra:

- Para muestras con baja rigidez una corrección del 0.1%, quiere decir que no influye significativamente.
- Para muestras con rigidez media se aplica una corrección del 13.04 %
- Y para muestras con alta rigidez una corrección de 99.4% lo que muestra que el efecto del sistema en la medición es importante y debe corregirse.

Lo dicho anteriormente se puede observar en la siguiente tabla

Tabla 3.

Clasificación de la rigidez según el DMA

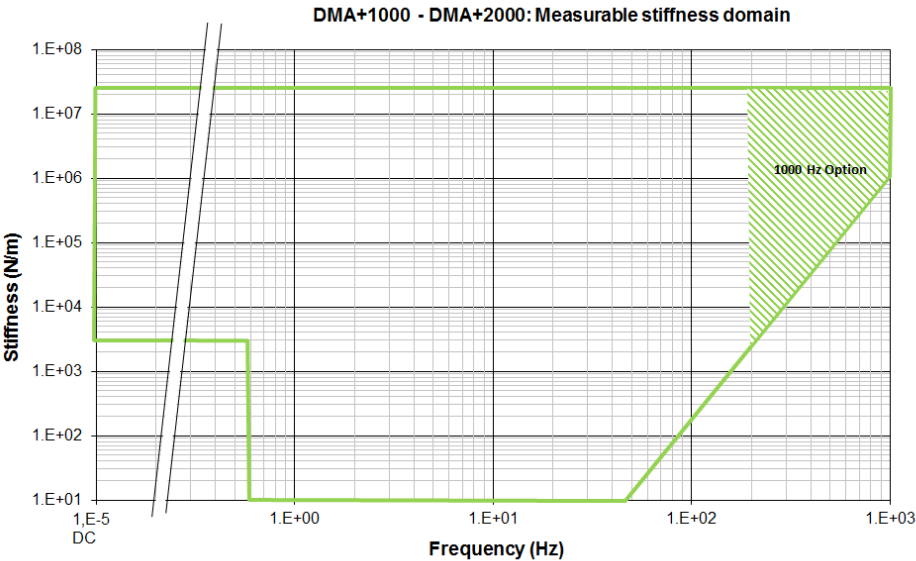
Tipo de rigidez	Valor aproximado de rigidez	Corrección aplicada	Comentario
Baja rigidez	$K_s \approx 20.000 \text{ N/m}$	$\sim 0.1\%$ (despreciable)	Ideal para el equipo. Correcciones mínimas.
Media rigidez	$K_s \approx 3E6 \text{ N/m}$	$\sim 13\%$	Aun en rango aceptable. Corrección moderada.
Alta rigidez	$K_s \approx 3E9 \text{ N/m}$	~ 99.3	Corrección muy alta. Puede salirse del rango optimo.

Nota. La tabla muestra la corrección que se debe aplicar a la muestra dependiendo de la rigidez

El gráfico muestra el dominio de rigidez medible teniendo en cuenta el rango de rigidez que el equipo DMA puede medir de forma confiable en función de la frecuencia de carga. El área sombreada o enmarcada indica el dominio operativo: los pares frecuencia–rigidez en los que el equipo puede obtener datos válidos.

Figura 4

Dominio de rigidez medible



Nota. La grafica muestra el dominio de rigidez del material a ensayar en el que el equipo DMA puede hacer mediciones correctas.

Con base en las normas AASHTO TP 132 y T 342 se definen los parámetros de fuerza estática y desplazamiento dinámico, ver tabla 4

Tabla 4.

Valores de desplazamiento dinámico, fuerza estática y deformación unitaria dados por las normas

Norma	AASHTO TP 132		AASHTO T 342	
Elemento	máximo	mínimo	máximo	mínimo
Fuerza estática (N)	500	120	500	100
Deformación unitaria ($\mu\epsilon$)	75	50	75	50

Nota. Valores máximos y mínimos establecidos por la norma AASHTO TP 132 para probetas de tamaño reducido y la norma AASHTO T 432 para probetas de tamaño estándar.

Se definió un valor de deformación unitaria que sea inferior a 50 microstrain para asegurar que la prueba se haga en el rango viscoelástico lineal. Es decir, se fijó como desplazamiento máximo de 0.0000025 m (2.5 micrómetros).

3.2.3. Selección de temperatura y frecuencia

La norma AASHTO TP 132 recomienda usar las siguientes temperaturas y cargas de frecuencias, ver tabla 5.

Tabla 5.

Temperaturas y frecuencias recomendadas para la prueba

PG 58-XX and Softer			PG 64-XX and Stiffer		
Temperature, °C	Temperature, °F	Loading Frequencies, Hz	Temperature, °C	Temperature, °F	Loading Frequencies, Hz
4	39	10, 1, 0.1	4	39	10, 1, 0.1
20	68	10, 1, 0.1	20	68	10, 1, 0.1
35	95	10, 1, 0.1	40	104	10, 1, 0.1

Nota. Valores de temperatura y frecuencias dados por la norma AASHTO TP 132

Sin embargo, con la intención de facilitar la gráfica de las curvas maestras se decidió agregar más temperaturas y frecuencias a la prueba para así de esta manera tener más valores y poder graficar y observar de mejor manera la tendencia de la curva, las temperaturas y frecuencias que se van a usar están en la siguiente tabla, ver tabla 6.

Tabla 6.

Temperaturas y frecuencias usadas

Temperaturas	Frecuencias
°C	Hz
4	15, 10, 5, 1, 0.1
10	15, 10, 5, 1, 0.1
25	15, 10, 5, 1, 0.1
40	15, 10, 5, 1, 0.1

Nota. En la tabla podemos observar los valores de frecuencia y temperaturas establecidos para llevar a cabo el ensayo.

4. Proceso de preparación y ensayo de muestras

Para fabricar las probetas de ensayo, inicialmente se compactaron muestras cilíndricas de mezcla asfáltica de diámetro 100 mm y altura 63.5 mm; empleando un compactador de cizallamiento giratorio. Posteriormente, empleando brocas diamantadas, de cada cilindro se extrajeron varios núcleos de diámetro 38 mm para someter a ensayo de módulo complejo.

4.1 Elaboración de la probeta de concreto asfáltico

Debido al tamaño de la probeta que se puede ensayar en el equipo Metravib, se considera que la mezcla asfáltica a ensayar no debería contener partículas de agregado superiores a una tercera parte del diámetro. Las mezclas asfálticas tradicionalmente empleadas en el medio

colombiano tienen tamaños máximos de agregado de 25mm, 19 mm y 10mm. Para elaborar probetas se seleccionó el material conocido como MDC10 (Mezcla Densa en Caliente de tamaño máximo 9.5 mm). La elaboración de las probetas se ajustó a los criterios dados por la Especificación según Artículo 450 del Instituto Nacional de Vías de Colombia.

Para fabricar cuerpos de prueba se seleccionaron dos mezclas del tipo MDC10 que dos empresas constructoras ofrecen como material para la construcción de pavimentos y que cuentan con sus procesos de formulación de diseño Marshall. Las mezclas en adelante se denominarán mezcla 1 y mezcla 2.

A continuación, se muestran las granulometrías y las cantidades de agregado que fueron utilizadas para fabricar cuerpos de prueba, ver tabla 7.

Tabla 7.

Cantidades y porcentajes de agregados y asfalto para mezclar

TAMIZ	Mezcla 1		Mezcla 2	
	%	Peso (gr)	%	Peso (gr)
1" - 3/4"	0,00	0,0	0,00	0,00
3/4" - 1/2"	0,00	0,0	0,00	0,00
1/2" - 3/8"	0,00	0,0	0,00	0,00
3/8" - N4	23,89	286,7	17,98	215,80
N4 - N10	22,09	265,1	23,27	279,30
N10 - N40	25,17	302,1	31,48	377,80
N40- N80	10,35	124,2	11,01	132,10
N80 - N200	5,94	71,3	4,57	54,80
PASA 200	7,26	87,1	6,19	74,30
ASFALTO	5,30	63,6	5,50	66,00
TOTAL	100,00	1200	100,00	1200

Nota. Esta tabla describe los tamices utilizados, las cantidades de agregado retenido en cada uno y la cantidad de asfalto para la fabricación de las probetas.

A continuación, se ilustra sobre los valores de las diferentes variables y criterios estipulados en la norma INVIAS 450 para el diseño Marshall, ver tabla 8.

Tabla 8.

Resumen valores de diseño

MEZCLA	ESP INV 450	MEZCLA 1	MEZCLA 2
Numero de golpes	75	75	75
Vacíos de aire (% va)	4,0 a 6,0	5,6	5,2
vacíos en los agregados minerales (% VAM)	>16	17,3	17,63
Vacíos llenos de asfalto (%VFA)	65 a 75	67,9	70
Flujo (mm)	2,0 a 3,5	3,36	3,28
R. Estabilidad/Flujo	3,0 a 6,0	4,11	4,86
R. Llenante/Ligante	0,8 a 1,2	1,07	1,13
Temperatura mezclada (°C)	145 a 155	144-150	152
Temperatura de compactación (°C)	135 a 145	135-138	143

Nota. Especificaciones dadas por la norma INVIAS 450 para el diseño Marshall de probetas de concreto asfáltico.

El asfalto y los agregados utilizados fueron proporcionado por cada empresa constructora. En ambos casos el agregado mineral procede de la fuente de explotación del río Chicamocha, en el sitio conocido como Pescadero.

Una vez con los agregados pétreos (grueso, fino y llenante mineral) para uso granulométrico MDC-10 se procede a tamizar cada muestra utilizando los tamices 3/8, N4, N10, N40, N80 y N200 como se muestra en la figura 5

Figura 5.

Tamices utilizados



Nota. Tamices utilizados obtenidos en los laboratorios de la Universidad Industrial de Santander.

Luego teniendo en cuenta la dosificación mostrada en la Tabla 7, se clasifica y pesa cada elemento de acuerdo con lo necesario para la fabricación de las probetas de concreto asfáltico, ver figura 6.

Figura 6.

Clasificación de los agregados



Nota. En la figura se puede observar cada tamaño de agregado separado y pesado.

Una vez calentados los agregados y el asfalto, se hace la mezcla con las proporciones establecidas. Posteriormente se compactan empleando el compactador giratorio, a las temperaturas dadas en la tabla 8, se fabrican las probetas de 102 mm (4 in) de diámetro y 63.5 mm (2 1/2 in) de altura ya que estas dimensiones son las establecidas para las dosificaciones de la tabla 7.

Figura 7.

Compactador giratorio.



Nota. La imagen muestra el compactador giratorio y el molde utilizado para la fabricación de las probetas.

Después de la compactación, se mantienen las probetas a temperatura ambiente y una vez que haya estabilizado su temperatura y aumentado su consistencia, se retira cuidadosamente la base, dejándolas reposar en un lugar de almacenamiento en condiciones estables, sin exposición a la luz solar directa ni humedad excesiva por un periodo mínimo de 24 h, este tiempo permite que las probetas alcancen una mayor estabilidad dimensional.

Figura 8.

Probetas de concreto asfáltico



Nota. En esta imagen se observa la probeta obtenida del compactador giratorio

4.2 Preparación de las muestras para la extracción de los núcleos

Inicialmente se reduce la temperatura de las muestras compactadas manteniéndolas en un recipiente de temperatura controlada a 5°C, durante al menos 24 horas. Posteriormente y sin permitir un aumento de temperatura de las muestras, se introducen en nitrógeno líquido (ver figura 9) para que el choque térmico no sea tan brusco evitando el riesgo de fisura térmica.

Figura 9.

Inmersión de las probetas en nitrógeno líquido



Nota. En esta imagen se ve el momento en el que se sacan las probetas de asfalto del nitrógeno líquido.

Las probetas de mezcla asfáltica se sumergen en nitrógeno líquido durante un período mínimo de 20 minutos, asegurando que alcancen la temperatura necesaria para una congelación completa. Sin embargo, el tiempo de inmersión no debe superar los 40 minutos, ya que una exposición prolongada podría provocar endurecimiento excesivo, lo que incrementa el riesgo de fractura por cristalización de partículas, formación de grietas térmicas y desprendimiento del agregado, como se ilustra en la figura 10.

Figura 10.

Fracturación por inmersión de más de 1 hora



Nota. En esta imagen se ve lo que puede suceder cuando se somete una probeta de asfalto a temperaturas extremadamente bajas por tiempo prolongado.

Una vez alcanzado el estado térmico requerido, se procede a la extracción de los núcleos de cada muestra de asfalto, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma API RP 40, inciso 3.5, referente al muestreo y preparación de núcleos. Para este procedimiento, se emplea una prensa taladradora equipada con brocas de núcleo de diamante, diseñadas para perforar muestras cilíndricas con alta precisión. Además, se utilizan bombas de fluidos para suministrar nitrógeno líquido directamente a la zona de corte, con el fin de refrigerar la broca y evitar el sobrecalentamiento causado por la fricción durante la perforación, ver figura 11.

Es fundamental seguir estrictamente los procedimientos indicados en la norma API RP 40 para garantizar la calidad y representatividad de los núcleos extraídos. En particular, se debe

asegurar que la perforación se realice de manera recta y controlada, evitando la aplicación excesiva de fuerza, ya que esto podría provocar una flexión de la broca y, en consecuencia, una deformación del núcleo. Finalmente, durante todo el proceso, se deben utilizar los implementos de protección personal (EPP) adecuados para minimizar riesgos asociados al manejo de nitrógeno líquido y equipos de perforación.

Figura 11.

Extracción de núcleos



Nota. En esta imagen se observa el equipo utilizado para la extracción de núcleos antes de perforar la muestra de concreto asfáltico que se encuentra en la Universidad Industrial de Santander sede Guatiguará.

Una vez recortados los núcleos a la longitud requerida, se procede a garantizar el

paralelismo de sus extremos utilizando una sierra con hoja de diamante. Este proceso es fundamental para obtener muestras con geometría uniforme, asegurando que los núcleos presenten una forma cilíndrica regular y caras perpendiculares al eje de la muestra para obtener precisión en los resultados de los ensayos mecánicos (ver figura 12).

Figura 12.

Perfilación de las caras



Nota. En esta imagen se muestra el equipo utilizado para perfilar las caras de los núcleos la cual se encuentra ubicado en sede de Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander.

Para preservar la integridad estructural de los núcleos extraídos, estos se envuelven con teflón, lo que permite mantener confinadas las partículas mientras recuperan la temperatura ambiente. Posteriormente, cada núcleo es marcado e identificado, garantizando un adecuado control de las muestras durante el análisis (ver figura 13). Como paso final, se realizó un lijado

superficial en los extremos de los núcleos para eliminar irregularidades y asegurar que las caras queden completamente lisas y uniformes.

Figura 13.

Núcleos extraídos



Nota. En la imagen se ve uno de los núcleos extraídos.

4.3 Inicialización del DMA para ensayos de módulo dinámico

Los ensayos de modulo dinámico se llevan a cabo utilizando un equipo DMA de Metravib el cual permite caracterizar propiedades viscoelásticas de materiales. Este equipo puede ofrecer resultados altamente precisos, controlando temperatura y frecuencia de carga.

Figura 14.

Equipo DMA



Nota. En esta imagen observamos el equipo DMA utilizado para el ensayo de modulo dinámico el cual se encuentra en la Universidad Industrial de Santander sede principal.

Para llevar a cabo los ensayos de modulo dinámico se verifica que todos los elementos de la maquina estén funcionando correctamente, esto se mira en el menú de seguridad del sistema. Luego para realizar un ensayo de rigidez a diferentes temperaturas y frecuencias con probetas cilíndricas de tamaño reducido sometidos a esfuerzos de compresión como es en nuestro caso seleccionamos la opción ‘Stabilized’.

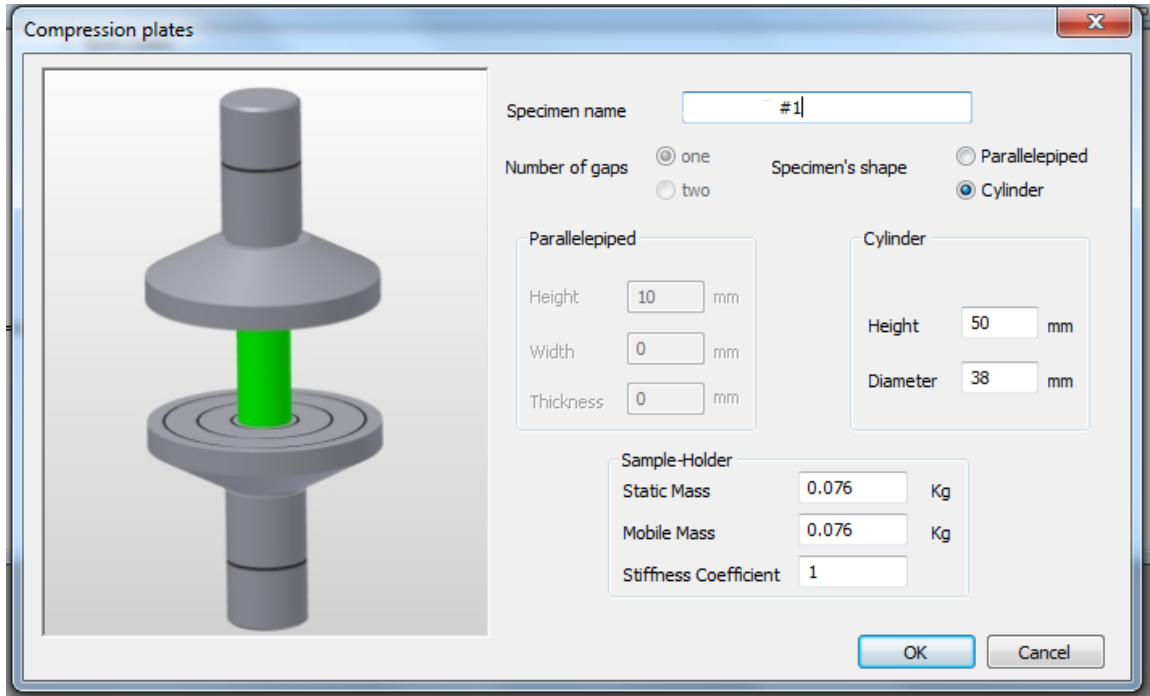
Luego se procede a nombrar al espécimen dependiendo del material con el que este hecho y el número de muestra al que corresponde, además de colocar las dimensiones del cilindro, como

IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR EL MÓDULO DINÁMICO DEL CONCRETO ASFÁLTICO EN PROBETAS DE TAMAÑO REDUCIDO se puede ver en la siguiente figura 15.

45

Figura 15.

Selección de la geometría del espécimen y nombramiento.



Nota. En la imagen se observa la interfaz principal del software, donde es posible configurar los parámetros geométricos de la probeta y asignar la identificación correspondiente a la muestra.

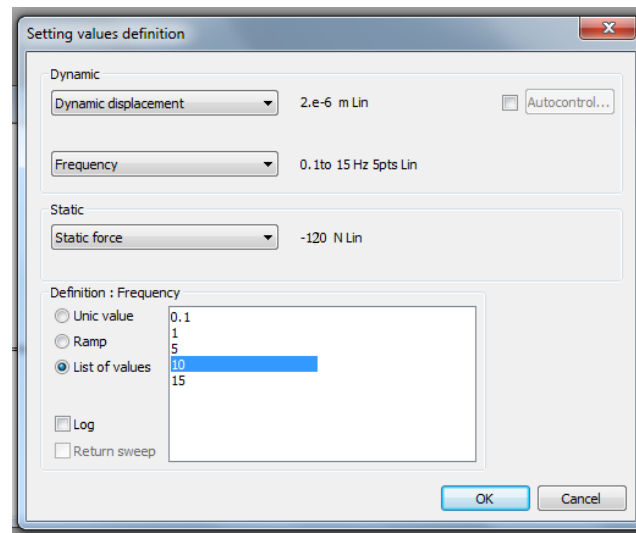
Luego de acuerdo con la norma AASHTO TP 132 y las características del equipo DMA, se utilizan los parámetros definimos de fuerza estática, frecuencia y desplazamiento dinámico.

Estos valores son necesarios para llevar a cabo el ensayo y llenar estos datos yendo a la opción "Test, Setting values definition", elegir de la primera lista: "Dynamic displacement", en "Definition: Dynamic" seleccionar "Unic value" y digitar en el cuadro de texto el valor establecido (0.0025 mm), para definir el tipo de carga estática del ensayo ir a la opción "Static force" ya que

se va a mantener una fuerza constante durante el ensayo para mantener el cilindro fijo y que no se vaya a caer por la vibración de la maquina a la hora de empezar con el ensayo, seleccionar “Unic value” y digitar en el cuadro de texto el valor establecido en Newton (-120 N) y por último en la opción “ Frecuency” se coloca la lista de valores desde la frecuencia de inicio (0.1Hz) hasta la frecuencia final (15 Hz) colocando los puntos intermedios que se establecieron.

Figura 16.

Configuración de ensayo: desplazamiento dinámico, frecuencia y fuerza estática.



Nota. En esta imagen se observa la interfaz del software Dynatest para establecer los valores de definición de la frecuencia, desplazamiento dinámico y fuerza estática.

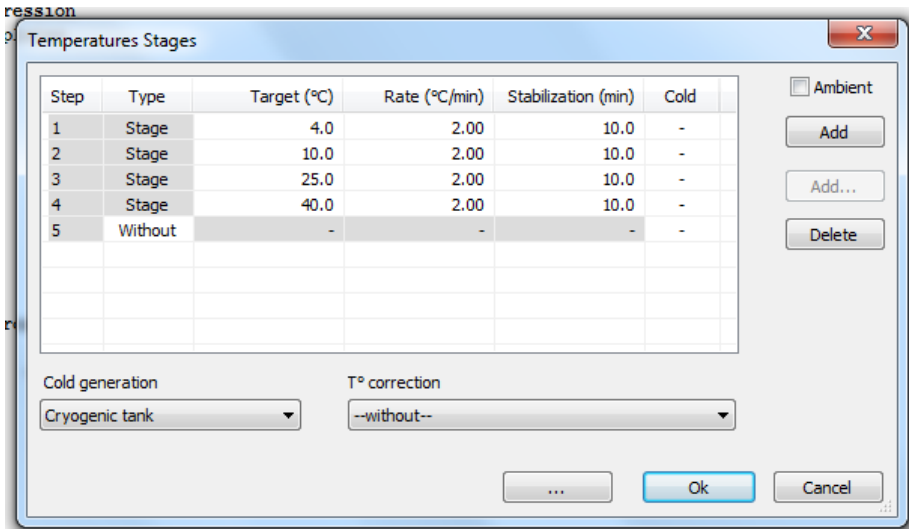
Luego, en la opción “Test, Temperature” del software, se ingresan las temperaturas de ensayo establecidas según la Tabla 5. Se configura una tasa de cambio de temperatura de 2 °C por minuto y un tiempo de estabilización de 10 minutos para asegurar que la muestra alcance uniformemente la nueva temperatura antes de continuar con el ensayo.

Previamente, las muestras deben ser acondicionadas durante al menos una hora en un horno

o refrigerador, según la temperatura objetivo del ensayo. Este procedimiento garantiza que la temperatura se establezca en todo el volumen de la muestra, y no solo en su superficie. Este tiempo de acondicionamiento está establecido por la norma AASHTO TP132, y es fundamental para obtener resultados representativos y confiables.

Figura 17.

Temperaturas de ensayo.



Nota. En la imagen se observan los rangos de temperatura establecidos para llevar a cabo el ensayo de modulo dinámico.

Para las temperaturas inferiores a la temperatura ambiente utilizamos nitrógeno líquido, este se almacena en el cilindro del equipo Metravib, una vez todo esté debidamente conectado y se haya liberado la presión del tanque, se abre la válvula de aire comprimido para que este empiece a entrar al cilindro de almacenamiento y el nitrógeno empiece a subir por la presión, esto se puede evidenciar ya que la conexión se congela como se muestra en la siguiente imagen, ver figura 18.

Figura 18.

Tanque del equipo DMA

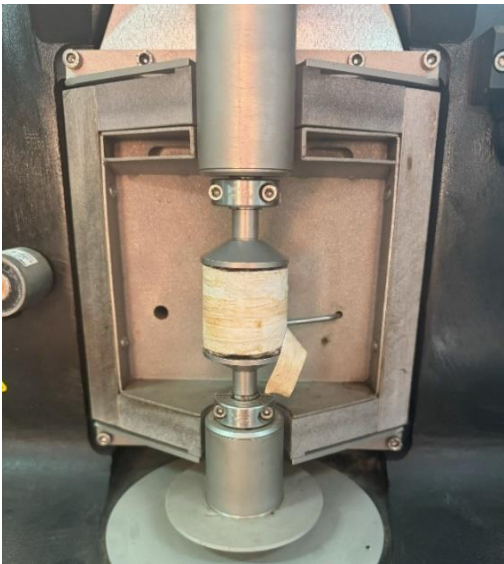


Nota. En esta imagen se ve como la conexión del equipo se congela debido a que el nitrógeno líquido.

Establecidos todos los parámetros necesarios para utilizar el equipo DMA ubicamos los núcleos extraídos en medio de los platos y bajamos el plato superior hasta tocar la probeta, de manera que quede estable y centrada, como se puede ver en la figura 19.

Figura 19.

Ubicación del espécimen

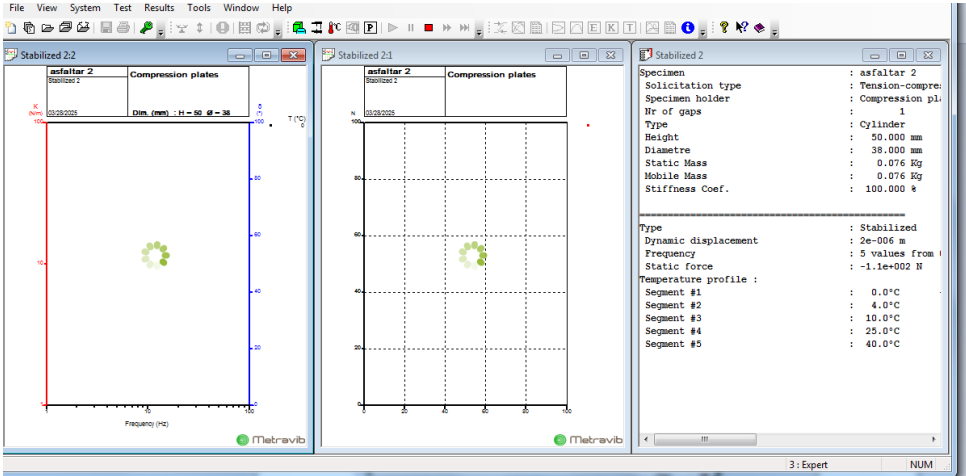


Nota. En esta imagen se observa la forma de ubicar las probetas en el DMA.

Se cierra la cámara del DMA y para empezar la prueba se selecciona “start current test” y aparecerá una gráfica indicando que el ensayo se está llevando a cabo, ver figura 20

Figura 20.

Pantalla principal del software antes de mostrar los resultados de ensayo



Nota. En esta imagen se observa la pantalla principal del software después de empezar el test, en la parte derecha están todos los parámetros establecidos para realizar el ensayo de módulo dinámico y en la parte izquierda aparecerán las gráficas cuando el test se complete.

5. Resultados

En pruebas preliminares donde las probetas fueron sometidas a carga axial variando frecuencia y temperatura, los valores de rigidez medidos fueron muy inferiores a los que se obtienen en pruebas con probetas de mayor tamaño, por lo que se decidió medir la rigidez en pruebas de compresión empleando dos variantes en la fijación de la probeta. En las dos variantes el ensayo es de compresión uniformemente repartida sobre las caras superior e inferior de las probetas y en la primera variante, la probeta no se adhiere fuertemente al portamuestras mientras que en la segunda se utiliza una resina para adherir la probeta al portamuestras para impedir algún desplazamiento de la probeta durante la prueba.

Durante la ejecución de las pruebas de laboratorio, se determinaron los valores del módulo de rigidez (K), ya que es necesario verificar que estos se encuentren dentro del rango aceptado por el equipo para garantizar resultados satisfactorios (ver figura 5). Además, se midió el ángulo de fase (δ), el módulo dinámico ($|E^*|$), el módulo de almacenamiento (E') y el módulo de pérdida (E'').

Estos parámetros están directamente relacionados con el módulo dinámico complejo y permiten caracterizar de manera integral el comportamiento viscoelástico de las mezclas asfálticas evaluadas. El ensayo se inició a temperatura ambiente y posteriormente se repitió para cada una de las temperaturas definidas en el presente estudio tanto para las muestras adheridas al

5.1 Resultados de modulo complejo con probetas no adheridas al portamuestras

Para facilitar la visualización de los datos dados por el DMA se colocaron de manera organizada en las tablas 9 y 10.

Tabla 9.

E', E'', |E| y ángulo de fase de la mezcla 1 sin adherir al portamuestras*

Mezcla #1 sin adherir					
Temperatura [c°]	Frecuencias [HZ]	Parte elástica E' [Pa]	Parte viscosa E'' [Pa]	Modulo dinámico E* [MPa]	Angulo de fase
4	0,1	297386000	64439800	304,288	12,23
	1	492656000	95436400	501,815	10,96
	5	590935000	103510000	599,932	9,94
	10	646934000	107825000	655,858	9,46
	15	669038000	109409000	677,925	9,29
10	0,1	291513000	79487000	302,156	15,25
	1	460868000	110943000	474,033	13,54
	5	578133000	128800000	592,307	12,56
	10	623541000	134304000	637,841	12,16
	15	651361000	137463000	665,708	11,92
25	0,1	284408000	72823900	293,583	14,36
	1	429283000	104800000	441,890	13,72
	5	544684000	130845000	560,180	13,51
	10	592105000	140106000	608,455	13,31
	15	623346000	145062000	640,003	13,10
40	0,1	304175000	114138000	324,884	20,57
	1	469519000	165345000	497,782	19,40
	5	524727000	180711000	554,973	19,00
	10	537269000	185073000	568,252	19,01
	15	558581000	187984000	589,365	18,60

Nota. En esta tabla están todos los datos de módulo de almacenamiento y módulo de pérdida de

la mezcla 1 obtenidos en el ensayo a diferentes frecuencias y temperaturas, además del módulo dinámico y ángulo de fase.

Tabla 10.

E', E'', |E| y ángulo de fase de la mezcla 2 sin adherir al portamuestras*

Mezcla #2 sin adherir					
Temperatura [c°]	Frecuencias [HZ]	Parte elástica E' [Pa]	Parte viscosa E'' [Pa]	Modulo dinámico E* [MPa]	Angulo de fase
4	0,1	548096000	107723000	558,582	11,12
	1	689657000	120760000	700,150	9,93
	5	795392000	124146000	805,022	8,87
	10	828052000	123810000	837,257	8,50
	15	846227000	123110000	855,135	8,28
10	0,1	349720000	79330200	358,605	12,78
	1	447860000	86905900	456,214	10,98
	5	537600000	90024500	545,085	9,51
	10	567886000	99544400	576,545	9,94
	15	586144000	99068100	594,457	9,59
25	0,1	266078000	65537400	274,030	13,84
	1	358172000	70229400	364,992	11,09
	5	439365000	74458500	445,630	9,62
	10	473706000	80045000	480,421	9,59
	15	495942000	82883000	502,820	9,49
40	0,1	138139000	40739900	144,021	16,43
	1	245109000	49870700	250,131	11,50
	5	290874000	50106600	295,158	9,77
	10	305601000	52193500	310,026	9,69
	15	314075000	55006500	318,855	9,93

Nota. En esta tabla están todos los datos de módulo de almacenamiento y módulo de pérdida de la mezcla 2 obtenidos en el ensayo a diferentes frecuencias y temperaturas, además del módulo dinámico y ángulo de fase

Estos datos se obtuvieron de la norma entre el módulo de almacenamiento E' y módulo de pérdida E''

$$|E^*| = \sqrt{E'^2 + E''^2}$$

Como paso final, se procedió al cálculo de la curva maestra del módulo dinámico ($|E^*|$). Para ello, se seleccionó una temperatura de referencia de 25 °C (temperatura ambiente) y se determinaron los factores de desplazamiento (α_T) utilizando la ecuación de Williams-Landel-Ferry (WLF).

$$\log(\alpha_T) = -\frac{c_1 * (T - T_r)}{c_2 + (T - T_r)}$$

Estos factores de desplazamiento permitieron transformar las frecuencias experimentales en frecuencia reducida, lo que posibilita la construcción de la curva maestra mediante la aplicación del principio de superposición tiempo-temperatura (TTSP).

$$f_r = f * \alpha_T$$

Además de utilizar el modelo sigmoïdal para predecir el módulo dinámico en función de la frecuencia reducida y la temperatura.

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + \exp(\beta + \gamma \log f_r)}$$

Tabla 11.

Datos de frecuencia reducida para y modulo dinámico calculado para la mezcla 1 sin adherir al portamuestras

Mezcla #1 sin adherir								
Temperatura [c°]	Frecuencias [HZ]	E* [Mpa]	log (at)	at	fr	log(fr)	log(E*)	E* calculado [Mpa]
4	0,1	304,288	0,25	1,79	0,18	-0,75	2,55	351,46
4	1	501,815	0,25	1,79	1,79	0,25	2,68	479,88
4	5	599,932	0,25	1,79	8,96	0,95	2,78	597,24
4	10	655,858	0,25	1,79	17,92	1,25	2,82	656,43
4	15	677,925	0,25	1,79	26,87	1,43	2,84	693,79
10	0,1	302,156	0,18	1,52	0,15	-0,82	2,54	343,65
10	1	474,033	0,18	1,52	1,52	0,18	2,67	469,15
10	5	592,307	0,18	1,52	7,58	0,88	2,77	583,83
10	10	637,841	0,18	1,52	15,16	1,18	2,81	641,66
10	15	665,708	0,18	1,52	22,75	1,36	2,83	678,17
25	0,1	293,583	0,00	1,00	0,10	-1,00	2,51	324,90
25	1	441,890	0,00	1,00	1,00	0,00	2,65	443,41
25	5	560,180	0,00	1,00	5,00	0,70	2,74	551,67
25	10	608,455	0,00	1,00	10,00	1,00	2,78	606,26
25	15	640,003	0,00	1,00	15,00	1,18	2,81	640,71
40	0,1	324,884	-0,18	0,66	0,07	-1,18	2,49	307,24
40	1	497,782	-0,18	0,66	0,66	-0,18	2,62	419,16
40	5	554,973	-0,18	0,66	3,30	0,52	2,72	521,38
40	10	568,252	-0,18	0,66	6,60	0,82	2,76	572,91
40	15	589,365	-0,18	0,66	9,90	1,00	2,78	605,44

Nota. La tabla muestra todos los datos de modulo dinámico hallado anteriormente, el factor de desplazamiento α_T necesario para calcular la frecuencia reducida y el módulo dinámico calculado utilizando el modelo sigmoïdal para la muestra 1.

Tabla 12.

Datos de frecuencia reducida y modulo dinámico calculado de la mezcla 2 sin adherir al portamuestras

Mezcla #2 sin adherir								
Temperatura [c°]	Frecuencias [HZ]	E* [Mpa]	log (at)	at	fr	log(fr)	log(E*)	E* calculado [Mpa]
4	0,1	558,582	2,58	382,48	38,25	1,58	2,70	502,47
4	1	700,150	2,58	382,48	382,48	2,58	2,80	629,93
4	5	805,022	2,58	382,48	1912,39	3,28	2,87	738,27
4	10	837,257	2,58	382,48	3824,78	3,58	2,90	790,64
4	15	855,135	2,58	382,48	5737,17	3,76	2,92	823,02
10	0,1	358,605	1,84	69,49	6,95	0,84	2,63	425,33
10	1	456,214	1,84	69,49	69,49	1,84	2,73	532,75
10	5	545,085	1,84	69,49	347,43	2,54	2,80	624,00
10	10	576,545	1,84	69,49	694,86	2,84	2,82	668,08
10	15	594,457	1,84	69,49	1042,30	3,02	2,84	695,33
25	0,1	274,030	0,00	1,00	0,10	-1,00	2,45	281,79
25	1	364,992	0,00	1,00	1,00	0,00	2,55	352,20
25	5	445,630	0,00	1,00	5,00	0,70	2,61	411,90
25	10	480,421	0,00	1,00	10,00	1,00	2,64	440,71
25	15	502,820	0,00	1,00	15,00	1,18	2,66	458,51
40	0,1	144,021	-1,83	0,01	0,00	-2,83	2,27	188,01
40	1	250,131	-1,83	0,01	0,01	-1,83	2,37	234,48
40	5	295,158	-1,83	0,01	0,07	-1,13	2,44	273,82
40	10	310,026	-1,83	0,01	0,15	-0,83	2,47	292,79
40	15	318,855	-1,83	0,01	0,22	-0,65	2,48	304,50

Nota. La tabla muestra todos los datos de modulo dinámico hallado anteriormente, el factor de desplazamiento α_T necesario para calcular la frecuencia reducida y el módulo dinámico calculado utilizando el modelo sigmoïdal para la mezcla 2.

Se calculan luego los parámetros de ajuste que controlan la forma de la curva sigmoïdal para la frecuencia reducida y para el módulo dinámico calculado. Variando cada parámetro hasta lograr el valor más cercano al módulo dinámico obtenido en el laboratorio.

Tabla 13.

Parámetros de ajuste de curva maestra para mezcla 1 sin adherir al portamuestras.

Mezcla #1 sin adherir	
Parámetros de ajuste	
c1	176,683
c2	14673,434
α	141,534
β	1,842
γ	-0,008
δ	-16,719

Nota. La tabla muestra los parámetros de ajuste para la ecuación de Williams-Landel-Ferry y el modelo sigmoidal para la mezcla 1.

Tabla 14.

Parámetros de ajuste de curva maestra para mezcla 2 sin adherir al portamuestras

Mezcla #2 sin adherir	
Parámetros de ajuste	
c1	482,081
c2	3940,954
α	211,567
β	2,441
γ	-0,006
δ	-14,407

Nota. La tabla muestra los parámetros de ajuste para la mezcla 2, empleando la ecuación de Williams-Landel-Ferry y el modelo sigmoidal.

5.2 Resultados de modulo complejo con probetas adheridas al portamuestras

De igual manera como se midieron valores de módulo dinámico y ángulo de fase para probetas adheridas al portamuestras, como se muestra en las siguientes tablas.

Tabla 15

E', E'', |E| y ángulo de fase de la mezcla 1 adherida al portamuestras*

Mezcla #1 adherida					
TEMPERATURA [c°]	FRECUENCIAS [HZ]	Parte elástica E' [Pa]	Parte viscosa E'' [Pa]	Modulo dinámico E* [MPa]	ANGULO DE FASE
4	0,1	507904750,0	205765250,0	548,002	22,05
	1	854270533,3	376519066,7	933,566	23,79
	5	1240815333,3	580121266,7	1369,731	25,06
	10	1423001333,3	673637066,7	1574,395	25,33
	15	1542789333,3	736537000,0	1709,586	25,52
10	0,1	472733312,5	170241187,5	502,453	19,81
	1	679494066,7	286629866,7	737,475	22,87
	5	968073000,0	455435066,7	1069,853	25,19
	10	1113769333,3	545105133,3	1240,009	26,08
	15	1215132000,0	608523533,3	1358,987	26,60
25	0,1	369101000,0	147599062,5	397,519	21,80
	1	577447666,7	260013133,3	633,287	24,24
	5	861548266,7	403589133,3	951,394	25,10
	10	1009616000,0	473883266,7	1115,298	25,14
	15	1110198666,7	522002333,3	1226,796	25,18
40	0,1	454175000,0	134138000,0	473,569	16,45
	1	669519000,0	175345000,0	692,099	14,68
	5	844727000,0	200711000,0	868,245	13,37
	10	907269000,0	205073000,0	930,157	12,74
	15	948581000,0	207984000,0	971,114	12,37

Nota. En esta tabla están todos los datos de módulo de almacenamiento y módulo de pérdida de la mezcla 1 la cual fue adherida al portamuestras obtenidos en el ensayo a diferentes frecuencias y temperaturas, además del módulo dinámico y ángulo de fase.

Tabla 16

E', E'', |E| y ángulo de fase de la mezcla 2 adherida al portamuestras*

Mezcla #2 adherida					
TEMPERATURA [c°]	FRECUENCIAS [HZ]	Parte elástica E' [Pa]	Parte viscosa E'' [Pa]	Modulo dinámico E* [MPa]	ANGULO DE FASE
4	0,1	613113375,0	276029125,0	672,384	24,24
	1	957605066,7	537930800,0	1098,352	29,32
	5	1511670000,0	974556800,0	1798,585	32,81
	10	1605466000,0	1004995333,3	1894,079	32,05
	15	1697423333,3	1060360000,0	2001,402	31,99
10	0,1	677991000,0	129839900,8	690,312	10,84
	1	890744000,0	207175000,0	914,520	13,09
	5	1300680000,0	472336000,0	1383,788	19,96
	10	1592940000,0	580831000,0	1695,530	20,03
	15	1746190000,0	690114000,0	1877,615	21,56
25	0,1	574864230,8	202557923,1	609,507	19,41
	1	814390000,0	345159615,4	884,515	22,97
	5	1165686923,1	581367769,2	1302,618	26,51
	10	1353040000,0	716563538,5	1531,072	27,91
	15	1381829230,8	792578615,4	1592,995	29,84
40	0,1	224288900,0	72425710,0	235,693	17,90
	1	326315000,0	158722777,8	362,870	25,94
	5	489554000,0	300812888,9	574,588	31,57
	10	592787000,0	394452222,2	712,032	33,64
	15	669381111,1	464680777,8	814,862	34,77

Nota. En esta tabla están todos los datos de módulo de almacenamiento y módulo de pérdida de la mezcla 2 la cual fue adherida al portamuestras obtenidos en el ensayo a diferentes frecuencias y temperaturas, además del módulo dinámico y ángulo de fase.

Se procedió al cálculo de la curva maestra del módulo dinámico ($|E^*|$). Para ello, se seleccionó una temperatura de referencia de 25 °C (temperatura ambiente) y se determinaron los factores de desplazamiento (αT) utilizando la ecuación de Williams-Landel-Ferry (WLF).

Estos factores de desplazamiento permitieron transformar las frecuencias experimentales en frecuencia reducida, lo que posibilita la construcción de la curva maestra mediante la aplicación del principio de superposición tiempo-temperatura (TTSP).

Tabla 17.

Datos de frecuencia reducida y modulo dinámico calculado de la mezcla 1 adherida al portamuestras

Mezcla #1 adherida								
Temperatura [c°]	Frecuencias [HZ]	E* [Mpa]	log (at)	at	fr	log(fr)	log(E*)	E* calculado [Mpa]
4	0,1	548,002	0,57	3,74	0,37	-0,43	2,75	568,83
4	1	933,566	0,57	3,74	3,74	0,57	2,96	911,87
4	5	1369,731	0,57	3,74	18,71	1,27	3,10	1271,39
4	10	1574,395	0,57	3,74	37,42	1,57	3,17	1468,00
4	15	1709,586	0,57	3,74	56,12	1,75	3,20	1597,10
10	0,1	502,453	0,41	2,56	0,26	-0,59	2,72	526,68
10	1	737,475	0,41	2,56	2,56	0,41	2,93	843,71
10	5	1069,853	0,41	2,56	12,82	1,11	3,07	1175,78
10	10	1240,009	0,41	2,56	25,65	1,41	3,13	1357,32
10	15	1358,987	0,41	2,56	38,47	1,59	3,17	1476,50
25	0,1	397,519	0,00	1,00	0,10	-1,00	2,64	434,88
25	1	633,287	0,00	1,00	1,00	0,00	2,84	695,44
25	5	951,394	0,00	1,00	5,00	0,70	2,99	967,98
25	10	1115,298	0,00	1,00	10,00	1,00	3,05	1116,85
25	15	1226,796	0,00	1,00	15,00	1,18	3,08	1214,55
40	0,1	473,569	-0,41	0,39	0,04	-1,41	2,56	359,57
40	1	692,099	-0,41	0,39	0,39	-0,41	2,76	574,02
40	5	868,245	-0,41	0,39	1,96	0,29	2,90	798,02
40	10	930,157	-0,41	0,39	3,91	0,59	2,96	920,26
40	15	971,114	-0,41	0,39	5,87	0,77	3,00	1000,46

Nota. La tabla muestra todos los datos de modulo dinámico hallado anteriormente, el factor de desplazamiento α_T necesario para calcular la frecuencia reducida y el módulo dinámico calculado utilizando el modelo sigmoideal de Witczak para la mezcla 1 adherida al portamuestras.

Tabla 18.

Datos de frecuencia reducida y modulo dinámico calculado de la mezcla 2 adheridas al portamuestras

Mezcla #2 adherida								
Temperatura [c°]	Frecuencias [HZ]	E* [Mpa]	log (at)	at	fr	log(fr)	log(E*)	E* calculado [Mpa]
4	0,1	672,384	0,89	7,75	0,77	-0,11	2,85	705,13
4	1	1098,352	0,89	7,75	7,75	0,89	3,07	1169,68
4	5	1798,585	0,89	7,75	38,73	1,59	3,22	1671,30
4	10	1894,079	0,89	7,75	77,46	1,89	3,29	1950,53
4	15	2001,402	0,89	7,75	116,19	2,07	3,33	2135,49
10	0,1	690,312	0,63	4,31	0,43	-0,37	2,79	620,38
10	1	914,520	0,63	4,31	4,31	0,63	3,01	1027,73
10	5	1383,788	0,63	4,31	21,55	1,33	3,17	1467,10
10	10	1695,530	0,63	4,31	43,09	1,63	3,23	1711,51
10	15	1877,615	0,63	4,31	64,64	1,81	3,27	1873,36
25	0,1	609,507	0,00	1,00	0,10	-1,00	2,65	451,61
25	1	884,515	0,00	1,00	1,00	0,00	2,87	745,66
25	5	1302,618	0,00	1,00	5,00	0,70	3,03	1061,96
25	10	1531,072	0,00	1,00	10,00	1,00	3,09	1237,63
25	15	1592,995	0,00	1,00	15,00	1,18	3,13	1353,86
40	0,1	235,693	-0,63	0,23	0,02	-1,63	2,52	329,95
40	1	362,870	-0,63	0,23	0,23	-0,63	2,73	543,00
40	5	574,588	-0,63	0,23	1,17	0,07	2,89	771,55
40	10	712,032	-0,63	0,23	2,34	0,37	2,95	898,28
40	15	814,862	-0,63	0,23	3,51	0,54	2,99	982,07

Nota. La tabla muestra todos los datos de modulo dinámico hallado anteriormente, el factor de desplazamiento α_T necesario para calcular la frecuencia reducida y el módulo dinámico calculado utilizando el modelo sigmoideal para la mezcla 2 adherida al portamuestras.

Se ajustaron los parámetros que controlan la forma de la curva sigmoideal para la frecuencia reducida y para el módulo dinámico calculado. Variando cada parámetro hasta lograr el valor más cercano al módulo dinámico obtenido en el laboratorio.

Tabla 19.

Parámetros de ajuste de curva maestra para mezcla 1 adheridas al portamuestras.

Mezcla # 1 adherida	
Parámetros de ajuste	
c1	8,00
c2	8589,74
α	135,58
β	1,81
γ	-0,01
δ	-16,19

Nota. La tabla muestra los parámetros de ajuste dados por solver para la ecuación de Williams-Landel-Ferry y el modelo sigmoidal para la mezcla 1 adherida al portamuestras.

Tabla 20.

Parámetros de ajuste mezcla 1 sin adherir al portamuestras.

Mezcla #2 adherida	
Parámetros de ajuste	
c1	254,656
c2	6036,065
α	207,506
β	2,297
γ	-0,013
δ	-16,084

Nota. La tabla muestra los parámetros de ajuste de la ecuación de Williams-Landel-Ferry y el modelo sigmoidal para la mezcla 2 adherida al portamuestras.

6. Análisis de resultados

En las siguientes figuras se observa la variación de módulos dinámicos obtenidos en el DMA variando las frecuencias y las temperaturas para la mezcla 1 y la mezcla 2 tanto para muestras adheridas como no adheridas al portamuestras.

Figura 21.

Resultados de modulo dinámico para la mezcla 1 sin adherir la probeta al portamuestras

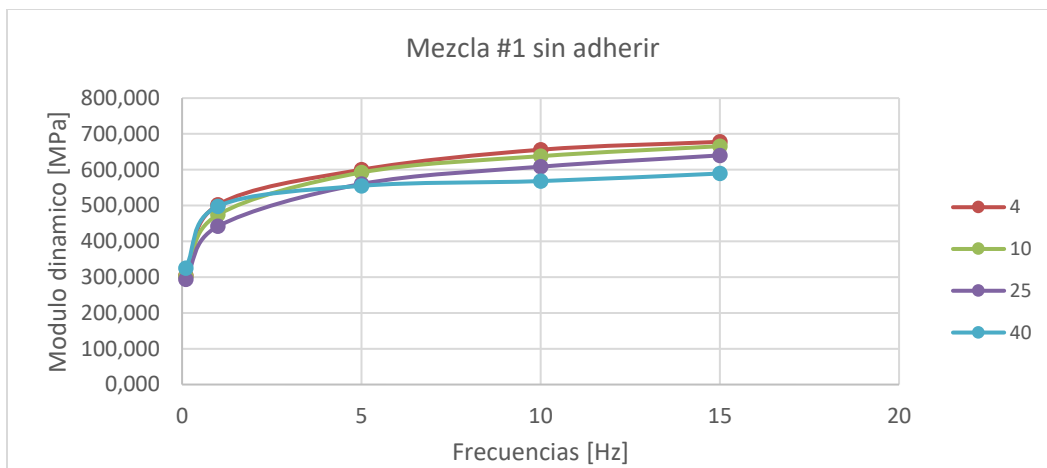
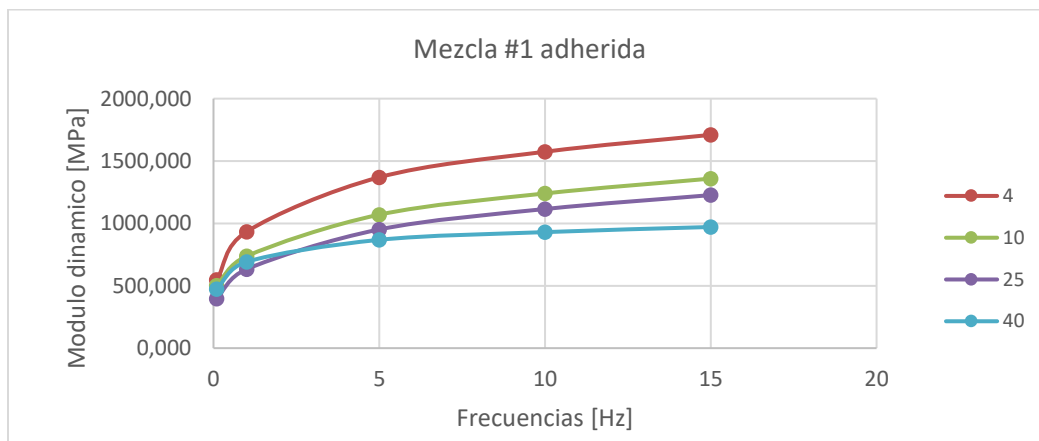


Figura 22.

Resultados de modulo dinámico para la mezcla 1 con probeta adherida al portamuestras



Nota. En estas imágenes se observa la tendencia del módulo dinámico de la mezcla 1 a diferentes temperaturas estando adherida y sin adherir al portamuestras.

Y en las figuras 23 y 24 se encuentran las gráficas para la mezcla 2.

Figura 23.

Resultados de modulo dinámico para la mezcla 2 sin adherir al portamuestras

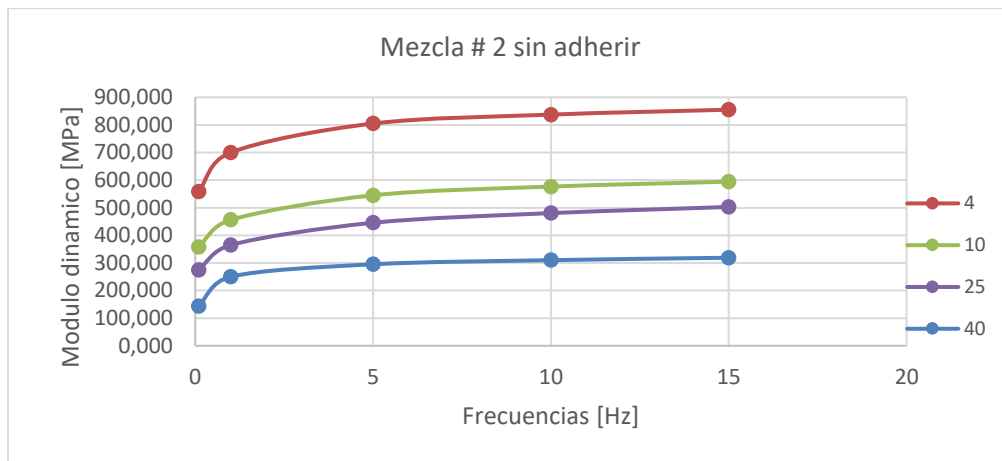
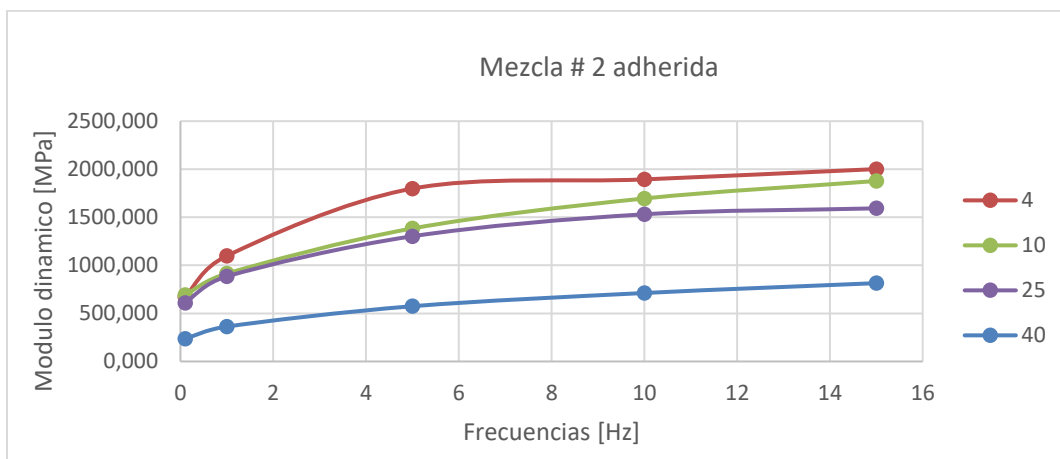


Figura 24.

Resultados de modulo dinámico para la mezcla 2 adherida al portamuestras



Nota. En estas imágenes se observa la tendencia del módulo dinámico de la mezcla 2 a diferentes temperaturas estando la muestra adherida y sin adherir al portamuestras.

Las Figuras 21, 22, 23 y 24 presentan los resultados obtenidos del módulo dinámico $|E^*|$ para las diferentes muestras evaluadas. En dichas gráficas se observa un comportamiento congruente con lo que se espera de un concreto asfáltico. El módulo dinámico disminuye a bajas frecuencias y a mayores temperaturas por la influencia del ligante asfáltico que se reblandece a medida que aumenta la temperatura y por el comportamiento viscoso que a elevadas temperaturas es más relevante en detrimento del comportamiento elástico. Esta pérdida de rigidez sugiere una mayor susceptibilidad al ahuellamiento bajo cargas repetidas. Por el contrario, a altas frecuencias y bajas temperaturas, el módulo dinámico aumenta significativamente, reflejando un comportamiento más elástico y resistente a la deformación, característico de materiales más rígidos.

Si bien la variación del módulo de rigidez obtenido es coherente, los valores medidos de módulo dinámico están por debajo de lo reportado para mezclas de concreto asfáltico ensayadas con probetas convencionales. Por ejemplo, según datos de referencia, una mezcla MDC-10 puede alcanzar módulos del orden de 7000 MPa a 4 °C y frecuencia de 1 Hz, y alrededor de 500 MPa a 40 °C con la misma frecuencia. Los valores máximos medidos en las pruebas con probetas de tamaño reducido fueron del orden de 2000 MPa.

Los valores medidos con probetas adheridas son superiores a los obtenidos con probetas no adheridas al portamuestras. Podría explicarse este resultado por una mayor uniformidad en la repartición de las cargas sobre las caras de las probetas, al mejorar la planicidad de las superficies de contacto entre el actuador que aplica la carga y las superficies de las caras del cuerpo de prueba. Es evidente, que la resina que adhiere la probeta al portamuestras, permite corregir algunos defectos en el paralelismo y en la uniformidad de las superficies de probetas; tal como lo hace el “refrentado” con azufre en las pruebas de cilindros de concreto hidráulico. Sin embargo, por las dimensiones reducidas de las probetas, los defectos en la confección de las mismas pueden incidir fuertemente en los resultados de los ensayos.

Al comparar el desempeño de las mezclas, se evidencia que la mezcla 2 presenta valores de módulo dinámico mayores que la mezcla 1, tanto en las muestras adheridas como en las no adheridas al portamuestras. Esto sugiere que la mezcla 2 posee una mayor rigidez estructural. Esta diferencia puede atribuirse a varios factores, como variaciones en el diseño de la mezcla, tipo y calidad o gradación de los agregados. Otra posible causa de las diferencias puede ser que el núcleo extraído para la mezcla 2 haya presentado una mayor concentración de material pétreo, lo que incrementa la rigidez del espécimen y, por tanto, los valores de módulo dinámico registrados. No obstante, es importante considerar que las muestras ensayadas corresponden únicamente a una porción de una probeta de tamaño convencional, por lo que los resultados podrían no representar completamente el comportamiento del material original.

Adicionalmente, el equipo permite medir el ángulo de desfase entre la curva sinusoidal de los esfuerzos aplicados y la curva sinusoidal de las deformaciones medidas.

$$\tan^{-1} \delta = E''/E'$$

En las siguientes figuras se indican los valores de ángulos de fase medidos.

Figura 25.

Resultados ángulo de fase de la mezcla 1 sin adherir al portamuestras.

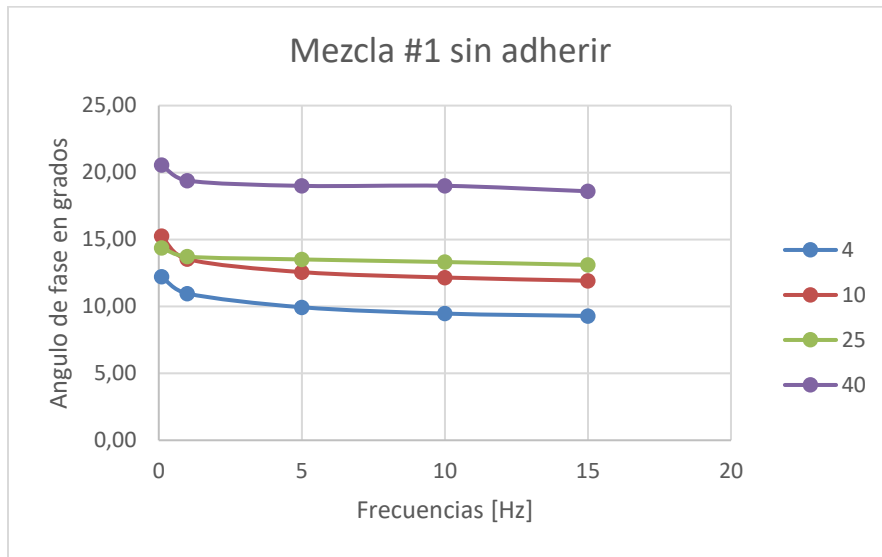
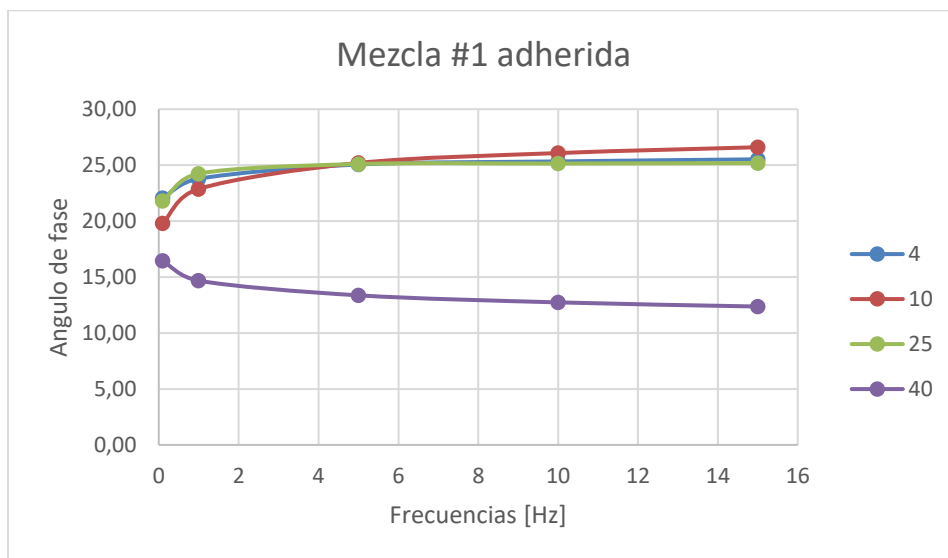


Figura 26

Resultados ángulo de fase de la mezcla 1 adherida al portamuestras



Nota. En las imágenes se puede ver la tendencia de ángulo de fase variando la frecuencia de la mezcla 1 para cada temperatura establecida, tanto para probetas adheridas y no adheridas al portamuestras.

Figura 27.

Resultados ángulo de fase de la mezcla 2 sin adherir al portamuestras.

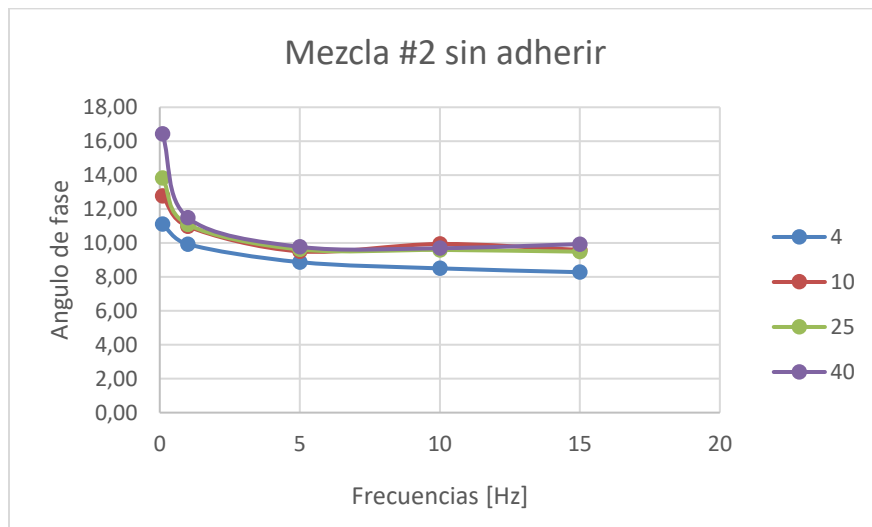
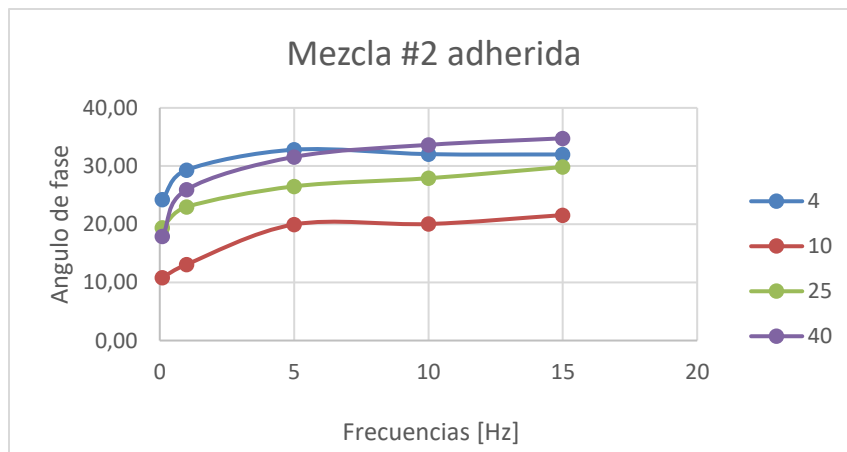


Figura 28.

Resultados ángulo de fase de la mezcla 2 sin adherir al portamuestras.



Nota. En la imagen se puede ver la tendencia de ángulo de fase variando la frecuencia de la mezcla

2 para cada temperatura establecida, tanto para probetas adheridas y no adheridas al portamuestras.

Las Figuras 25 a 28 ilustran la evolución del ángulo de fase (δ) para ambas mezclas bajo barridos de frecuencia (0,1 – 15 Hz) y temperatura (4 °C – 40 °C). En materiales viscoelásticos, valores de δ próximos a 0° describen un comportamiento esencialmente elástico, mientras que valores cercanos a 90° corresponden a un flujo viscoso puro; en mezclas asfálticas densas en caliente el rango típico se sitúa entre 0° y 40°, intervalo en los que se encuentran los resultados obtenidos.

Para las probetas sin adherir a los platos portamuestras (Figuras 25 y 27) las mezclas 1 y 2 reproducen la tendencia esperada, ángulo de fase disminuye al aumentar la frecuencia y crece al aumentar la temperatura. Por el contrario, en las probetas que se ensayaron adheridas a los platos de carga (Figuras 26 y 28), la variación del ángulo de fase no es concordante con lo esperado lo que podría sugerir ruido experimental de las señales que interrumpe la continuidad de la tendencia teórica. En el caso de probetas adheridas, ninguna de las curvas respeta la pauta normativa de que el ángulo de fase debe reducirse con la frecuencia y aumentar ordenadamente con la temperatura, por el contrario, la mayoría incrementa su ángulo de fase al subir la frecuencia y muestra poca coherencia térmica. Solo la curva de la Mezcla 1 a 40 °C conserva la pendiente correctiva, aunque sus valores absolutos de δ son los más bajos de la serie, contradiciendo la expectativa de que a mayor temperatura el desfase sea mayor.

A continuación, se presenta la curva maestra de la mezcla 1 y mezcla 2 calculada con los datos obtenidos anteriormente.

Figura 29.

Resultados curva maestra de la mezcla 1 sin adherir al portamuestras.

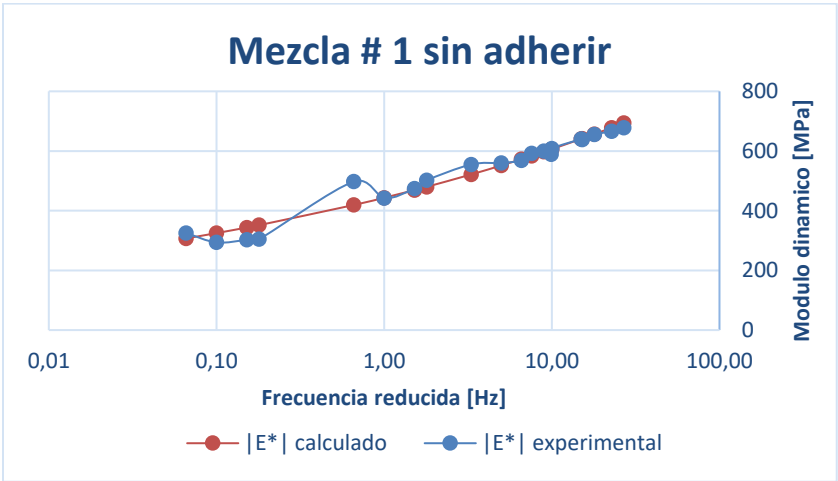
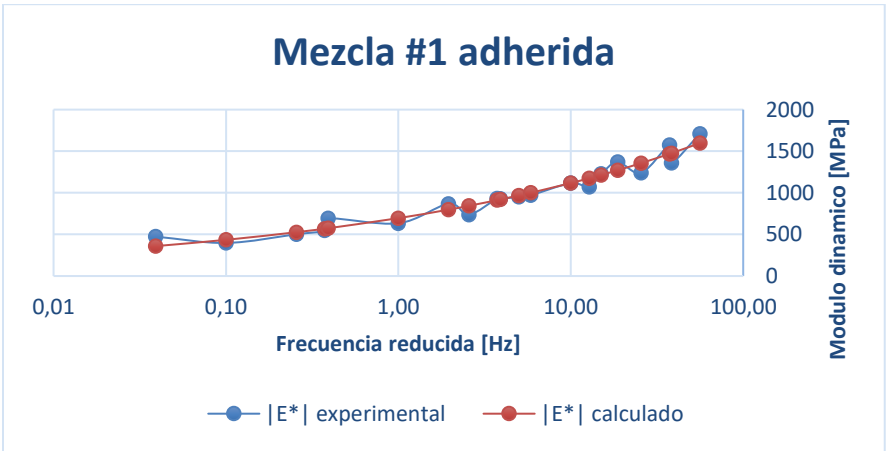


Figura 30.

Resultados curva maestra de la mezcla 1 adherida al portamuestras.



Nota. En estas imágenes se ve la curva maestra obtenida utilizando la frecuencia reducida y el módulo dinámico calculado y la curva maestra utilizando el módulo dinámico sin corregir para la mezcla 1 adherida y sin adherir al portamuestras.

Figura 31.

Resultados curva maestra de la mezcla 2 sin adherir al portamuestras.

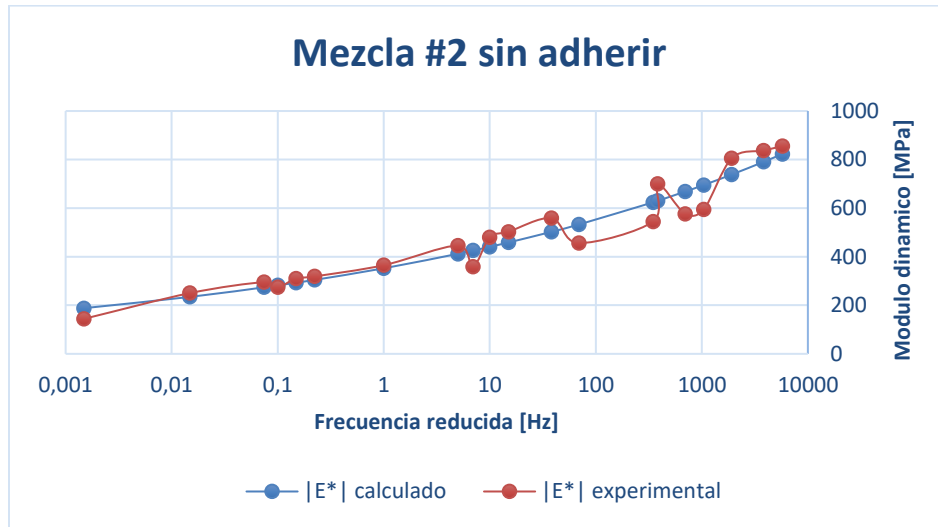
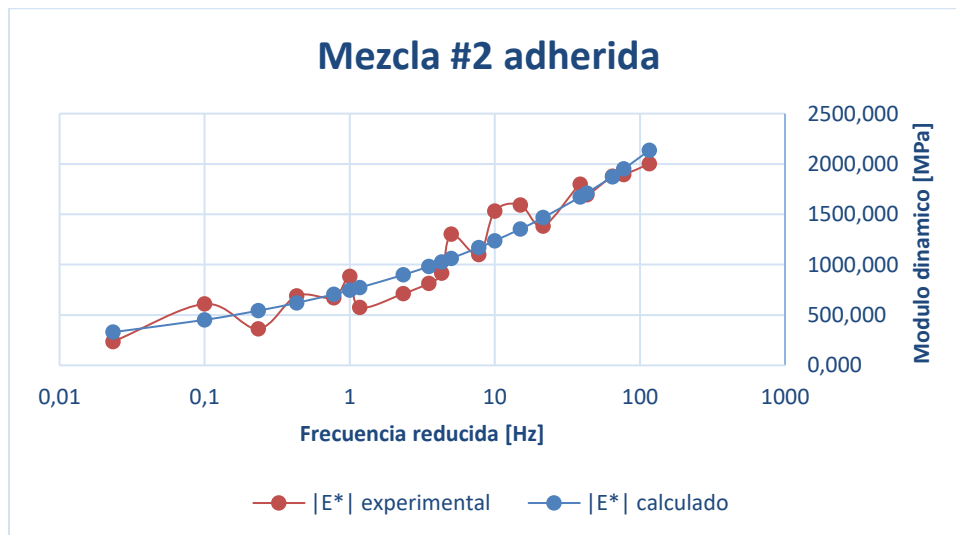


Figura 32.

Resultados curva maestra de la mezcla 2 adherida al portamuestras.



Nota. En estas imágenes se ve la curva maestra obtenida utilizando la frecuencia reducida y el módulo dinámico calculado y la curva maestra utilizando el módulo dinámico sin corregir para la mezcla 2 adheridas y sin adherir al portamuestras.

Finalmente, se analiza la curva maestra del módulo dinámico la cual es la representación unificada del comportamiento de la mezcla asfáltica las cuales se observan en la figura 29, 30, 31 y la figura 32, los resultados muestran una tendencia creciente del módulo dinámico conforme aumenta la frecuencia reducida. Específicamente, a bajas frecuencias, que representan condiciones de altas temperaturas, la mezcla presenta menor rigidez debido a la mayor susceptibilidad térmica del ligante asfáltico. En este escenario, el módulo dinámico se encuentra en intervalos de aproximadamente 324 MPa para la mezcla de la mezcla 1 y alrededor de 250 MPa para la mezcla de la mezcla 2 en la condición de muestras no adheridas a los platos del equipo, mientras que para las muestras adheridas para la mezcla 1 y 2 están en un valor aproximado de 350 MPa.

Por otro lado, a altas frecuencias, que equivalen a bajas temperaturas, el módulo dinámico aumenta significativamente, indicando una mayor rigidez de la mezcla asfáltica. En estas condiciones, el módulo dinámico alcanza valores cercanos a 700 MPa en la mezcla 1 y un poco más de 800 MPa en la mezcla 2 para las muestras no adheridas a los platos, y para las muestras que se ensayaron adheridas al portamuestras dan resultados de aproximadamente 1600 MPa para la mezcla 1 y 2000 MPa para la mezcla 2. Los resultados difieren significativamente con resultados típicos de las mezclas asfálticas ensayadas en probetas de tamaño convencional (100 mm de diámetro y 150 mm de altura).

Todo esto sugiere que la confección de las probetas o las limitaciones propias del tamaño de la muestra influyen fuertemente en la implementación del ensayo con el equipo DMA.

Se requiere probar con una mayor cantidad de variantes en la confección de las probetas y en la definición de las características de los componentes de las mezclas que permitan utilizar de

manera confiable el equipo DMA en la caracterización de la rigidez viscoelástica de mezclas agregado-ligante asfáltico.

7. Conclusiones

Se ensayaron probetas de tamaño reducido de dos mezclas de concreto asfáltico de tamaño máximo 9.5 mm, en un equipo DMA y se establecieron protocolos para la fabricación de las probetas y para la realización de los ensayos. Comparados los resultados de las mediciones con los valores tradicionales de rigidez de concreto asfáltico, estos no se encuentran dentro de los rangos típicos obtenidos con probetas de tamaño tradicional.

los resultados no permiten concluir que sea posible utilizar el equipo DMA para la caracterización acertada de la rigidez de muestras de concreto asfáltico. En algunos ensayos la tendencia de las rigideces medidas no fue la que se esperaba y la variación del módulo con temperatura y frecuencia de ensayo fue errática.

Se probaron muestras en dos condiciones de adherencia de la probeta con los elementos que aplican la carga. En los dos casos los resultados variaron sensiblemente. La razón de estas diferencias podría ser el resultado de variaciones en la homogeneidad de la aplicación de los esfuerzos sobre las probetas.

Además, se concluye que los valores obtenidos no son consistentes con lo esperado en un ensayo de módulo dinámico para probetas de tamaño convencional. No obstante, es importante considerar que pueden existir ciertas variaciones con respecto a los valores típicos de módulo dinámico debido a factores como una posible falta de planicidad en las caras del núcleo, una

distribución no homogénea del agregado en la probeta o la influencia del tipo de material utilizado (MDC10) en comparación con otros materiales más comunes en los ensayos estándar. En términos generales, no se puede concluir con este ensayo si se pueden ensayar probetas tipo MDC 10 en este equipo.

A pesar de que los resultados experimentales obtenidos en esta investigación no cumplieron completamente con los criterios de confiabilidad esperados para caracterizar el módulo dinámico en probetas de tamaño reducido, se logró avanzar en la estructuración de una primera versión tentativa de una norma de ensayo. Este documento preliminar recoge los aspectos metodológicos desarrollados durante el trabajo y constituye un punto de partida valioso para futuras investigaciones. Con base en esta propuesta, se espera que posteriores estudios, con un mayor número de pruebas, ajustes técnicos y validaciones, permitan consolidar una alternativa robusta y práctica para la medición de la rigidez del concreto asfáltico mediante el módulo complejo y dinámico, especialmente en contextos donde el uso de probetas reducidas represente una ventaja técnica o logística.

8. Recomendaciones

A partir de la experiencia adquirida en este estudio, se recomienda implantar un programa sistemático de calibración del equipo DMA+1000 antes de cada campaña de ensayos. Una verificación periódica de sus sensores de fuerza y desplazamiento, así como de los controles de temperatura y frecuencia, garantizará la precisión y la trazabilidad de los datos obtenidos en investigaciones futuras.

Se sugiere continuar las pruebas, poniendo mayor énfasis en la confección correcta de las

probetas que permitan asegurar el paralelismo y la planicidad de las caras de las probetas.

Una vez que se haya logrado el objetivo de contar con un protocolo de confección correcta de probetas, conviene también ampliar la investigación a mezclas asfálticas adicionales utilizando probetas de tamaño reducido para contrastar sus resultados con los de ensayos convencionales en cilindros de 100 mm de diámetro, ampliamente empleados en caracterización mecánica. Esta comparación permitirá establecer en qué medida las probetas pequeñas representan con fidelidad el comportamiento del material y si constituyen una alternativa práctica en laboratorios con limitaciones de material o de equipamiento.

En esa línea, resulta pertinente explorar dos vías complementarias: (i) emplear mezclas con tamaño máximo nominal de 19 mm manteniendo las dimensiones actuales de las probetas, y (ii) disminuir el diámetro del espécimen manteniendo una mezcla MDC-10. En ambos casos será indispensable evaluar el efecto de la granulometría sobre la homogeneidad interna y la respuesta mecánica, así como controlar de forma estricta la planicidad y las posibles irregularidades superficiales para minimizar sesgos en la medición.

Asimismo, se aconseja incorporar mezclas asfálticas modificadas y convencionales de distinta rigidez, a fin de validar y afinar los protocolos definidos con el DMA. La diversificación de materiales reforzará la solidez de los criterios de aplicabilidad del método y favorecerá la eventual estandarización del uso de probetas pequeñas en la caracterización del módulo dinámico.

Por último, es fundamental considerar la rigidez del material antes de programar cada ensayo. Mezclas extremadamente rígidas o muy blandas pueden situarse fuera del rango operativo óptimo del equipo o de la sensibilidad de los transductores, lo que comprometería la confiabilidad

IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR EL MÓDULO
DINÁMICO DEL CONCRETO ASFÁLTICO EN PROBETAS DE TAMAÑO REDUCIDO

75

de los resultados. Se sugiere, por tanto, realizar una evaluación preliminar de la rigidez para ajustar los parámetros de ensayo o, en caso necesario, seleccionar un método alternativo más adecuado a las características del material estudiado.

Referencias Bibliográficas

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2022). *AASHTO T 315-22: Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer*
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2022). *T 342-22: Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2023). *AASHTO TP 123: Determining the Dynamic Modulus for Asphalt Mixtures Using Small Specimens in the Asphalt Mixture Performance Tester*.
- American Petroleum Institute. (1998). *Recommended Practices for Core Analysis (API RP 40, 2nd ed.)*. API Publishing Services.
- ASTM International. (2023). *ASTM D7175-23: Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer*
- Bahia, H. U., & Zeng, X. (2001). "Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures." *Transportation Research Record*. DOI: 10.3141/1757-02.
- Bonaquist, R. (2009). "Characterization of Hot Mix Asphalt Using Dynamic Modulus and Flow Number." *National Asphalt Pavement Association*.
- Delgado , H., Flores , M., & Gómez , J. (2018). *Universidad de Costa Rica*. Obtenido de

IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR EL MÓDULO
DINÁMICO DEL CONCRETO ASFÁLTICO EN PROBETAS DE TAMAÑO REDUCIDO

77

Propuesta de modificación de secuencia de ejecución del ensayo de módulo dinámico.:
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6546274.pdf>

Dynatest LATAM. (n.d.). *Software para gestión de pavimentos*. Obtenido de:

<https://www.dynatestlatam.com/software-for-pavement-management/>

Gómez López, J., Flores Flores, M., & Delgado Alamilla, H. (2017). *Propuesta de método de prueba de modulo dinámico en mezclas asfálticas para Mexico*. Obtenido de

<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt507.pdf>

Leiva, F. (septiembre de 2004). *LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES*. Obtenido de MODULO DINAMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS:

https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/425/MODULO_DINAMICO_MEZCLAS_ASFALTICAS.pdf?sequence=1

Metravib Material Testing, (s.f.). *High-force DMA series*. Obtenido de <https://www.metrovib-materialtesting.com/products/material-testing-solutions/high-force-dmaseries/>

Ministerio de Transporte. (2021). *Anuario Nacional de Transporte*. Bogotá: Gobierno de Colombia.

Huang, Y. H. (2004). "Pavement Analysis and Design." Prentice Hall.

MP Strumenti. (s.f.). *DMA+300, 1000, 2000 Dinámico Mecánico - Acoem Metravib*. Obtenido de https://www.mpstrumenti.eu/prodotto/dma-300-1000-2000-dinamico-meccanico-acoem-metrovib/?attachment_id=572&download_file=ajreii9sgyyeh

Apéndices

Apéndice A: Determinación del Módulo Dinámico en Mezclas Asfálticas Utilizando Probetas Pequeñas en el Equipo de Análisis Mecánico Dinámico (DMA)

1. ALCANCE

1.1. Esta norma describe los métodos de ensayo para medir el módulo dinámico de mezclas asfálticas utilizando el Equipo de Ensayo de Análisis Mecánico Dinámico (DMA, por sus siglas en inglés). Esta práctica está destinada a mezclas de gradación densa con tamaños máximos nominales de agregado de hasta 9.5 mm.

2. NORMAS DE REFERENCIA

2.1. Normas AASHTO:

- PP 99 – Preparación de especímenes cilíndricos pequeños para ensayos de desempeño utilizando el compactador giratorio o núcleos de campo.
- R 18 – Establecimiento e implementación de un sistema de gestión de calidad para laboratorios de ensayo de materiales de construcción.

3. TERMINOLOGÍA

3.1. Módulo dinámico, $|E|^*$ — Es el valor absoluto del módulo complejo, calculado dividiendo el esfuerzo pico a pico entre la deformación pico a pico para un material sometido a una carga sinusoidal.

3.2. Ángulo de fase, δ — Es el ángulo en grados entre una carga aplicada de forma sinusoidal y la deformación resultante, en un ensayo de control de esfuerzo.

3.3. Espécimen de ensayo — Un cilindro de 38 mm (1.50 pulgadas) de diámetro por 50 mm (2 pulgadas) de altura, extraído y cortado a partir de una muestra compactada en el compactador giratorio o un núcleo obtenido en campo.

4. RESUMEN DEL MÉTODO

4.1. Este método de ensayo describe el procedimiento para medir el módulo dinámico de mezclas asfálticas. Un espécimen de prueba, a una temperatura específica, es sometido a un esfuerzo compresivo sinusoidal controlado en diferentes frecuencias. Se miden los esfuerzos aplicados y las deformaciones axiales resultantes en función del tiempo, y estos datos se utilizan para calcular el módulo dinámico y el ángulo de fase.

5. IMPORTANCIA Y USO

5.1. El módulo dinámico es una propiedad relacionada con el desempeño que puede utilizarse para la evaluación de mezclas, el análisis mecanicista de pavimentos asfálticos y el diseño mecanicista–empírico de pavimentos.

6. EQUIPO

6.1. Equipo de Ensayo DMA — Este sistema permite aplicar cargas axiales en forma de ondas sinusoidales (haversinas) y registrar la respuesta en deformación de la muestra. Es compatible con probetas cilíndricas de 38 mm de diámetro y 50 mm de altura, aunque puede configurarse

6.2. Sistema de Control de Temperatura — El equipo debe tener una cámara térmica integrada que permite controlar la temperatura entre -150°C y 500°C , con una precisión de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$. Esto permite evaluar el comportamiento del material a diferentes condiciones de temperatura, esenciales para el análisis viscoelástico.

6.3. Control de Frecuencia y Carga — El equipo permitirá aplicar frecuencias desde 0.01 Hz hasta 25 Hz, dependiendo de la rigidez del material y las condiciones de ensayo. Los niveles de carga típicos aplicables van desde 5 N hasta 1000 N, con una resolución de fuerza de hasta 0.0001 N, lo que permite estudiar materiales con alta sensibilidad.

6.4. Sistema de Medición de Deformación — La medición de la deformación axial se realiza mediante transductores de desplazamiento con precisión submicrométrica. El desplazamiento mínimo detectable es del orden de 5×10^{-8} m (0.00000005 m), lo que garantiza exactitud en la medición del módulo dinámico incluso en materiales de alta rigidez.

6.5. Platinas de Carga — El sistema cuenta con platinas intercambiables diseñadas para asegurar una correcta distribución de la carga en probetas cilíndricas pequeñas. Estas platinas minimizan los efectos de fricción y aseguran una transferencia de carga uniforme.

6.6. Software de Control y Análisis — El equipo opera mediante el software, el cual permite programar barridos de frecuencia, registrar el ángulo de fase, opcionalmente el software pudiera calcular el módulo dinámico, el módulo complejo $|E^*|$ y representar las curvas de variación de la rigidez con temperatura y frecuencia.

7. PROCEDIMIENTO

7.1. Fabricación del espécimen de ensayo:

7.1.1. El ensayo se realizará sobre especímenes de 38 mm (1.50 pulg) de diámetro por 50 mm (2 pulg) de altura fabricados conforme al capítulo (4.1 Elaboración de la probeta de concreto asfáltico)

7.1.2. Preparar tres especímenes con un contenido de vacíos de aire objetivo entre 4 a 6%

8.2. Platos de carga

8.2.1. Para la realización del ensayo de módulo dinámico en el equipo DMA+1000 de Metravib, el plato de carga superior debe mantenerse libre para permitir el movimiento durante la aplicación de la carga sinusoidal, garantizando de esta forma una distribución uniforme del esfuerzo axial y evitando tensiones de flexión en los extremos del espécimen.

8.3. Procedimiento de ensayo:

8.3.1. Colocar el espécimen dentro de la cámara climática del DMA para monitorear las condiciones térmicas y determinar el momento adecuado para iniciar el ensayo.

8.3.2. Posicionar los platos de carga. Encender el DMA, configurar la temperatura de control deseada y permitir que la cámara alcance y mantenga condiciones estables durante un mínimo de 1 hora.

8.3.3. Asegurar que los especímenes alcancen la temperatura de ensayo especificada $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

8.3.4. Abrir la cámara de ensayo y registrar la hora exacta en la que se realiza esta acción.

8.3.5. Ensamblar el sistema de ensayo en el siguiente orden, de abajo hacia arriba:

- Plato de carga inferior,
- Espécimen centrado sobre el plato de carga inferior,
- Plato de carga superior, alineado concéntricamente con el plato inferior.

8.3.6. Cerrar la cámara de ensayo y permitir que la temperatura vuelva a estabilizarse hasta alcanzar el valor objetivo.

8.3.7. Permitir que el espécimen se estabilice térmicamente durante un periodo de tiempo superior al establecido en el subcapítulo 8.3.3.

8.3.9. Ingresar la información de identificación y control requerida en el software de ensayo de módulo dinámico. Las temperaturas de ensayo y las frecuencias de carga deben estar de acuerdo con la Tabla A.1.

Tabla A.1— Temperaturas de Ensayo y Frecuencias de Carga Recomendadas

Mezcla densa en caliente MDC-10		
Temperatura, °C	Temperatura, °F	Frecuencias Hz
4	39	15, 10, 5, 1, 0.1
10	50	15, 10, 5, 1, 0.1
25	77	15, 10, 5, 1, 0.1
40	104	15, 10, 5, 1, 0.1

8.3.10. Mide el módulo dinámico y el ángulo de fase de cada espécimen de prueba. Comienza las pruebas a la temperatura más baja y con la frecuencia más alta. Prueba todas las frecuencias en orden descendente antes de pasar a la siguiente temperatura más alta.

8.3.11. Sigue las instrucciones del software para iniciar el ensayo. Se generan los datos del ensayo del DMA en un archivo CSV cuando se complete la prueba y mostrará los datos del ensayo.

8.3.12. Una vez que se hayan recopilado datos aceptables, abre la cámara de prueba y retira el espécimen ensayado.

8.3.13. Repite los procedimientos descritos para los restantes especímenes de prueba.

8.4. Cálculos y Calidad de los Datos:

8.4.1. El cálculo del módulo dinámico, ángulo de fase se realizan con los datos de módulo de almacenamiento E' y módulo de pérdida E'' obtenidos con el software Dynatest.

8.4.2 Solo se deben aceptar los datos de prueba que cumplan con las estadísticas de calidad de datos indicadas en la Tabla 2 y 3. Los ensayos pueden repetirse un máximo de seis veces en el mismo espécimen para obtener datos que cumplan con dichas estadísticas. Desecha cualquier prueba que requiera más de seis repeticiones para obtener un resultado aceptable. Si los datos originales indican que se necesitarían más de seis repeticiones, se deberá ensayar un nuevo espécimen para todas las temperaturas y frecuencias.

Tabla A.2 – Angulo de fase esperado

Estado esperado	δ
Rígido / elástico (baja temp)	5° – 15°
Intermedio (temp medias)	15° – 35°
Muy viscoso (alta temp)	35° – 50°

Tabla A.3— Modulo dinámico estimado

Temperatura, °C	Frecuencia, Hz	Modulo dinámico estimado, MPa
4	10	6000 - 15000
25	1	2000 - 8000
40	0.1	500 - 2000

8.5. Reporte:

8.5.1. Para cada espécimen de prueba analizado, reportar lo siguiente:

8.5.1.1. Temperatura de la prueba,

8.5.1.2. Frecuencia de la prueba,

8.5.1.3. Módulo dinámico,

8.5.1.4. Ángulo de fase,

8.5.1.5 Adjuntar el informe de resumen de la prueba de módulo dinámico del DMA para cada espécimen de prueba.

9. PALABRAS CLAVE

9.1. DMA; módulo dinámico; ángulo de fase.

Apéndice B: Resultados obtenidos con otras variables a temperatura ambiente

Como parte del proceso de calibración previo a los ensayos formales, se plantearon y evaluaron diferentes combinaciones de parámetros operativos con el fin de establecer las condiciones más adecuadas para la medición del módulo dinámico. Esta etapa inicial permitió observar el comportamiento de las muestras bajo distintas configuraciones y, a partir del análisis comparativo, seleccionar aquellas variables que generaban resultados coherentes y repetibles. Las pruebas preliminares se realizaron utilizando probetas sin adherir a los platos del equipo y a temperatura ambiente, lo que facilitó una revisión más rápida de los efectos de frecuencia y configuración del ensayo sin la intervención de otros factores externos.

A continuación, se anexan los resultados obtenidos

Tabla B.1 – Caso 1

Mezcla	Frecuencias [Hz]	Parte elástica E' [Pa]	Parte viscosa E'' [Pa]	Módulo dinámico E* [Mpa]	Angulo de fase
#1	0,1	376695000	126886000	397,49	18,62
	1	482191000	217120000	528,82	24,24
	5	500758000	251736000	560,47	26,69
	10	610681000	354025000	705,88	30,10
	15	877461000	523667000	1021,84	30,83
#2	0,1	574864231	202557923	609,51	19,41
	1	814390000	345159615	884,51	22,97
	5	1165686923	581367769	1302,62	26,51
	10	1353040000	716563538	1531,07	27,91
	15	1481829231	812578615	1690,00	28,74

Nota: Resultados para una fuerza de 120 N y un desplazamiento dinámico de 0.0000025 m en la mezcla 1 y 2

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos bajo estas condiciones (fuerza de 120 N y desplazamiento dinámico de 0.0000025 m), se decidió no utilizar estos parámetros en los ensayos definitivos. La principal razón fue que el ángulo de fase presentó una tendencia anómala, incrementándose con la frecuencia en lugar de disminuir, como está establecido en el comportamiento típico de materiales viscoelásticos como las mezclas asfálticas.

Este comportamiento atípico podría atribuirse a que la fuerza aplicada no fue adecuada para inducir una deformación representativa del material. Una carga excesiva, combinada con un desplazamiento tan pequeño, puede generar una rigidez aparente elevada en la muestra, provocando que la respuesta esté dominada por ruidos mecánicos, efectos de borde o incluso por la resonancia del sistema de sujeción. Además, cuando la deformación inducida es demasiado baja, la señal medida puede acercarse al umbral de sensibilidad del equipo, comprometiendo la precisión del cálculo del ángulo de fase y otros parámetros dinámicos.

Tabla B.2 - Caso 2

Mezcla	Frecuencias [Hz]	Parte elástica E' [Pa]	Parte viscosa E'' [Pa]	Modulo dinámico E* [MPa]	Angulo de fase
#1	0,1	240267000	57880200	247,14	18,62
	1	372790000	81047900	381,50	24,24
	5	464225000	96211500	474,09	26,69
	10	500465000	101471000	510,65	30,10
	15	523905000	105075000	534,34	30,83
#2	0,1	209137000	43029100	213,52	11,63
	1	269041667	69213166,7	277,80	14,43
	5	343977667	92584500	356,22	15,06
	10	378659500	100124500	391,67	14,81
	15	400261000	103679833	413,47	14,52

Nota: Resultados para una fuerza de 50 N y una deformación unitaria de 30 microdeformaciones.

Estos parámetros también fueron descartados debido a condiciones similares a las observadas en configuraciones anteriores. En este caso, el ángulo de fase mostró nuevamente una tendencia errónea al aumentar con la frecuencia, lo cual contradice el comportamiento esperado de materiales viscoelásticos, donde típicamente el ángulo de fase disminuye a medida que aumenta la frecuencia, reflejando una respuesta más elástica.

Además, los valores obtenidos de módulo dinámico fueron muy bajos en comparación con los rangos comúnmente reportados para mezclas asfálticas tipo MDC-10. Esta discrepancia puede estar relacionada con una insuficiente transferencia de carga hacia la muestra, ya que una fuerza relativamente baja (50 N), combinada con una deformación pequeña, puede no generar una respuesta mecánica significativa en el material. En estos casos, el equipo puede estar registrando niveles de señal cercanos al ruido, afectando la confiabilidad de los resultados.

Tabla B.3 - Caso 3

Mezcla	Frecuencias [Hz]	Parte elástica E' [Pa]	Parte viscosa E'' [Pa]	Modulo dinámico E* [Mpa]	Angulo de fase
#1	0,1	188877000	102444800	214,871	28,475
	1	320529000	120690000	342,498	20,633
	5	400230000	145361000	425,810	19,961
	10	477638000	172111000	507,701	19,816
	15	551558000	191172000	583,749	19,117
#2	0,1	263248000	111833600	286,018	23,017
	1	327979000	111530300	346,423	18,781
	5	401408000	124086000	420,150	17,178
	10	434930000	125435000	452,657	16,088
	15	457774000	127206000	475,119	15,530

Nota: Resultados obtenidos con una deformación unitaria de 100 microdeformaciones y fuerza de 150 N.

Este caso resultó particular, ya que el ángulo de fase sí mostró una tendencia adecuada con respecto a la frecuencia, es decir, disminuyó progresivamente al aumentar la frecuencia, tal como se espera en el comportamiento típico de materiales viscoelásticos. Además, aunque los módulos dinámicos obtenidos bajo estas condiciones fueron ligeramente más bajos en comparación con los valores alcanzados con los parámetros finalmente establecidos en este proyecto, se consideró que el comportamiento general era aceptable y se procedió a realizar el ensayo completo utilizando esta configuración.

Sin embargo, los resultados obtenidos no fueron incluidos en la sección final de resultados del presente informe, ya que, al analizar los datos a diferentes temperaturas, se identificaron irregularidades en la evolución del ángulo de fase. Específicamente, se esperaba que el ángulo de fase aumentara con la temperatura, reflejando un comportamiento más viscoso, pero en este caso el orden y la separación de las curvas por temperatura no seguían una lógica coherente, y algunas curvas incluso se cruzaban o invertían con respecto a lo esperado.

Aunque a simple vista los valores de módulo dinámico parecían cercanos a los obtenidos con los parámetros seleccionados para este estudio, la inconsistencia del ángulo de fase con respecto a la temperatura y los valores relativamente bajos del módulo dinámico llevaron a descartar este conjunto de condiciones como base para la caracterización definitiva.