

Evaluación Mecánica Preliminar De Materiales Granulares Marginales Estabilizados Con
Emulsión Asfáltica Por Medio Del Ensayo De Análisis Mecánico Dinámico (DMA)

Jhon Carlos Hernández Flórez y Jordán Andrés Monroy Hernández

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Modalidad Trabajo de Investigación

Director

Alex Eduardo Alvarez Lugo, Ph.D.

Profesor Titular - Escuela de Ingeniería Civil

Codirector

Sergio Emmanuel Espitia Fajardo

Ingeniero Civil

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga

2026

Dedicatoria

En primer lugar, dedicamos este trabajo de grado a Dios, por guiarnos durante todo el proceso y concedernos la fortaleza y la constancia necesarias para culminar satisfactoriamente esta etapa de nuestra formación profesional.

Asimismo, extendemos nuestro más sincero agradecimiento a nuestras familias, por su apoyo permanente, comprensión y aliento incondicional, que fueron fundamentales para afrontar las exigencias del camino académico y mantenernos motivados.

De manera muy especial, expresamos nuestro reconocimiento al Ph.D. Alex E. Alvarez, por su guía académica, su disposición constante y sus valiosos aportes técnicos, decisivos para el desarrollo de la investigación y el cumplimiento de los objetivos propuestos.

Por último, dedicamos este logro a nosotros mismos, como reflejo del esfuerzo, la disciplina y la responsabilidad asumidos para alcanzar esta meta académica.

Agradecimientos

Este trabajo se desarrolló en el marco del proyecto de investigación VIE 4243 “Desarrollo de materiales granulares marginales (MGM) estabilizados empleando emulsiones asfálticas nano-modificadas (ENM) para vías terciarias”. Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander el apoyo brindado.

Tabla de Contenido

	Pag
Introducción	14
1. Objetivos	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2 Marco Referencial	17
2.1 Marco Teórico	17
2.1.1 Vías Terciarias	17
2.1.2 Material Granular Marginal (Mgm)	17
2.1.3 Ensayo De Compactación Estática.....	17
2.1.4 Curado	18
2.1.5 Equipo Metravib Dma+1000	18
2.1.6 Comportamiento Mecánico Dinámico De Materiales Estabilizados	18
2.1.7 Ensayo De Análisis Mecánico Dinámico (Dma)	19
2.2 Estado Del Arte.....	19
3. Metodología.....	24
3.1 Generalidades Del Proyecto	25

3.1.1 Revisión De Literatura	25
3.2 Etapa Preliminar	25
3. 2.1 Curva De Compactación.....	26
3.2.2 Diseño Y Elaboración Del Molde De Compactación Para Probetas De Ensayo Dma	26
3.3 Fase A: Preparación De Materiales Y Elaboración De Probetas Para Ensayo Dma ...	28
3.3.1 Materiales	28
3.3.1.1 Material Granular Marginal (Mgm) Y Caracterización Inicial.....	28
3.3.1.2 Emulsión Asfáltica	30
3.3.2 Diseño De Mezclas Estabilizadas Con Emulsión Asfáltica	30
3.3.3 Evaluación De Tipos De Mezclado.....	33
3.3.4 Desarrollo Del Espécimen De Ensayo	34
3.3.4.1 Granulometría Del Espécimen	34
3.3.4.2 Preparación Del Material Estabilizado	35
3.3.5 Compactación Y Curado De Probetas.....	35
3.3.5.1 Cálculo De Masa Y Dosificación Por Espécimen.....	35
3.3.5.2 Precompactación Y Compactación En Prensa Multiloader.....	37
3.3.5.3 Curado Del Espécimen	38
3.4.2 Definición De Parámetros Del Ensayo Dma	40
3.4 Ensayo De Análisis Mecánico Dinámico Dma	41
3.4.1 Ejecución Del Ensayo Dma	41

4. Resultados	42
4.1. Curva De Compactación	42
4.2 Fase A.....	43
4.2.1 Diseño De Mezcla	43
4.2.2 Evaluación Del Método De Mezclado	43
4.2.3 Compactación De Probetas.....	44
4.2.4 Curado De Probetas.....	45
4.3 Fase B.....	47
4.3.1 Definición De Parámetros Del Ensayo Dma	47
4.3.2 Diseño Y Elaboración De Hoja De Cálculo Para Tratamiento De Datos Y	
Resultados Del Ensayo Dma.....	49
4.4 Análisis De Resultados Del Ensayo Dma	49
5. Conclusiones.....	54
6. Recomendaciones	55
Referencias Bibliográficas	57
Apéndices	59

Lista de Tablas

	Pag
Tabla 1	29
<i>Granulometría propia</i>	29
Tabla 2	30
<i>Granulometría de Silvia caro</i>	30
Tabla 3	37
<i>Valores de análisis experimental</i>	37

Lista de Figuras

	Pag
Figura 1	24
Metodología general	24
Figura 2	27
Modelado 3D en el software Rhinoceros.....	27
Figura 3	28
Molde azul (6 cm de alto por 15 cm de largo) elaborado por impresión 3D, junto con el embolo.....	28
Figura 4	29
Curvas granulométricas.	29
Figura 5	33
Bandeja de mezcla de fracción solidos con emulsión asfáltica (8%) y agua.	33
Figura 6	34
Especímenes obtenidos mediante el método de mezclado tradicional (con figura azul).	
Especímenes obtenidos mediante el método de mezclado alternativo (con la figura naranja).	34
Figura 7	36
Recipientes para cada fracción de material.	36
Figura 8	38
Prensa Multiloader realizando el proceso de compactación.	38
Figura 9	39
Especímenes de ensayo no homogeneizados, posteriores al proceso de compactación y desmolde (a) 6%, (b) 8% y (c) 7%.....	39

Figura 10	42
Curva de compactación, material de la cantera de Samacá	42
Figura 11	43
Curva de compactación, material de la cantera de Medellín.	43
Figura 12	45
Especímenes de izquierda a derecha con 6%, 7%, 8% y 10% de emulsión asfáltica de la cantera de Samacá después del proceso de curado.	45
Figura 13	46
Tendencia de masa vs. tiempo, material de la cantera de Samacá.	46
Figura 14	47
Tendencia de masa vs tiempo, material de la cantera de Medellín.	47
Figura 15	48
Barrido de desplazamientos material de Samacá	48
Figura 16	48
Barrido de desplazamientos material de Medellín	48
Figura 17	50
Ángulo de fase vs. frecuencias del espécimen estabilizado con 8% de emulsión asfáltica de la cantera de Samacá, a temperatura ambiente (54 °C) y a 60 °C.	50
Figura 18	50
Ángulo de fase vs. frecuencias del espécimen estabilizado con 8% de emulsión asfáltica de la cantera de Medellín a temperatura ambiente, 54 °C y 60 °C.....	50
Figura 19	51

Módulo dinámico vs. frecuencias del espécimen estabilizado con 8% de emulsión asfáltica de la cantera de Samacá a temperatura ambiente, 54 °C y 60 °C.	51
Figura 20	52
Módulo dinámico vs. frecuencias del espécimen estabilizado con 8% de emulsión asfáltica de la cantera de Medellín a temperatura ambiente, 54 °C y 60 °C.	52

Lista de Apéndices

APENDICE A.PROTOCOLO PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO DE ANALISIS MECANICO DINAMICO DMA DE COMPRESIÓN SIMPLE MEDIANTE EL EQUIPO METRAVIB+100059

APENDICE B.PROTOCOLO DE COMPACTACION DE PROBETAS 1.2X2.4 (CM) POR MEDIO DE LA MAQUINA CONTROLS MULTILoader.....74

Resumen

Título: Evaluación Mecánica Preliminar De Materiales Granulares Marginales Estabilizados Con Emulsión Asfáltica Por Medio Del Ensayo De Análisis Mecánico Dinámico (DMA). ***

Autor: Jhon Carlos Hernández Flórez, Jordán Andrés Monroy Hernández **

Palabras Clave: Emulsión asfáltica, material granular marginal (MGM), protocolo de ensayo, análisis mecánico dinámico (DMA), rigidez, ángulo de fase, y módulo dinámico.

Descripción: El presente trabajo de investigación corresponde a un estudio experimental enfocado en la evaluación del desempeño mecánico de materiales granulares marginales (MGM) estabilizados con emulsión asfáltica, mediante la metodología de Análisis Mecánico Dinámico (DMA). La respuesta viscoelástica de los materiales se analizó mediante ensayos dinámicos de compresión axial, con el fin de evaluar su comportamiento frente a variaciones en el contenido de emulsión asfáltica y la temperatura de ensayo. Como consecuencia de las limitaciones dimensionales del equipo utilizado, se fabricaron especímenes cilíndricos de pequeño tamaño, con un diámetro de 12 mm y una altura de 24 mm. La investigación se desarrolló utilizando dos MGM procedentes de canteras diferentes, los cuales fueron caracterizados físicamente conforme a la normativa técnica vigente. Para la conformación de las probetas se consideraron contenidos de emulsión asfáltica del 6%, 7%, 8% y 10%, con el propósito de analizar la incidencia de este parámetro en el comportamiento mecánico y dinámico de las mezclas estabilizadas. Los ensayos de DMA se realizaron a diferentes valores de temperatura, representativos tanto de condiciones ambientales como de escenarios térmicos críticos; específicamente a temperatura ambiente (24.5 °C), 54 °C y 60 °C. Los resultados obtenidos permitieron evaluar la influencia del contenido de emulsión, la temperatura de ensayo y la procedencia del material granular en la rigidez y el comportamiento viscoelástico de los MGM estabilizados. A partir del análisis experimental se propone un procedimiento base para la evaluación del desempeño mecánico de MGM estabilizados con emulsión asfáltica mediante DMA, constituyendo un aporte técnico para el diseño y optimización de capas granulares en vías de bajo volumen de tránsito.

*Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Alex Eduardo Alvarez Lugo, Ph.D. Profesor Titular - Escuela de Ingeniería Civil. Codirector: Sergio Emmanuel Espitia Fajardo, Ingeniero civil.

Abstract

Title: Preliminary Mechanical Evaluation of Marginal Granular Materials Stabilized with Asphalt Emulsion Using Dynamic Mechanical Analysis (DMA)*

Author: Jhon Carlos Hernández Flórez, Jordán Andrés Monroy Hernández ††

Key Words: Asphalt emulsion, marginal granular material (MGM), testing protocol, dynamic mechanical analysis (DMA), stiffness, phase angle, dynamic modulus.

This research presents an experimental study evaluating the mechanical performance of marginal granular materials (MGM) stabilized with asphalt emulsion using Dynamic Mechanical Analysis (DMA). The viscoelastic response of the materials was analyzed through compression tests to evaluate their behavior under different asphalt emulsion contents and testing temperatures. Due to the testing equipment's dimensional limitations, small-scale cylindrical specimens with a diameter of 12 mm and a height of 24 mm were manufactured. The study was conducted using two MGM obtained from different quarries, which were physically characterized in accordance with current technical standards, presenting a plasticity index of 7%. Specimens were prepared with asphalt emulsion contents of 6%, 7%, 8%, and 10%, aiming to analyze the influence of this parameter on the mechanical and dynamic behavior of the stabilized mixtures. DMA tests were performed at different temperature levels, representing both ambient conditions and critical thermal scenarios, specifically at ambient temperature (24.5 °C), 54 °C, and 60 °C. The results allowed the evaluation of the influence of asphalt emulsion content, testing temperature, and granular material origin on the stiffness and viscoelastic behavior of the stabilized MGM. Based on the experimental analysis, a baseline procedure for the mechanical performance evaluation of MGM stabilized with asphalt emulsion using DMA is proposed, providing a technical contribution to the design and optimization of granular layers for low-volume roads.

* Degree Work

Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Civil Engineering. Advisor: Alex Eduardo Alvarez Lugo, Ph.D., Full Professor – School of Civil Engineering. Co-advisor: Sergio Emmanuel Espitia Fajardo, Civil Engineer.

Introducción

En Colombia, las vías rurales de bajo volumen de tránsito son fundamentales para la conectividad y el desarrollo económico de las regiones, especialmente en zonas apartadas. Sin embargo, debido a restricciones presupuestales y a la falta de materiales óptimos, es necesario recurrir a materiales locales que, en principio, presentan características granulométricas y plásticas inadecuadas para su uso como capas de subbase y base granular según las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) (INVIAS, 2022). Estos materiales, caracterizados con frecuencia por un alto contenido de finos y elevada plasticidad, suelen ser altamente susceptibles a la acción del agua y a las cargas repetidas del tránsito, lo que conduce a fallas prematuras como deformaciones permanentes y agrietamientos (Garnica et. al 2002).

El aprovechamiento de materiales granulares marginales (MGM) mediante técnicas de estabilización representa una oportunidad para reducir costos, minimizar el impacto ambiental de la extracción de nuevos materiales y aprovechar los recursos disponibles localmente (Martínez & Arroyo, 2023). Entre las técnicas de estabilización disponibles, el uso de emulsión asfáltica ha mostrado ser eficaz para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos, incrementando su cohesión interna y reduciendo la permeabilidad (Garnica et al., 2002).

No obstante, para garantizar un comportamiento adecuado de estos materiales estabilizados en condiciones reales de servicio, es necesario realizar evaluaciones mecánicas detalladas que simulen las sollicitaciones cíclicas del tránsito vehicular. En este ámbito, el Análisis Mecánico Dinámico (DMA; por su sigla en inglés a partir de Dynamic Mechanical Analysis) emerge como una herramienta innovadora y precisa para caracterizar el comportamiento viscoelástico de materiales granulares estabilizados con ligantes asfálticos (Caro & Caicedo et al, 2014).

En este contexto, el presente proyecto tiene como propósito evaluar el comportamiento mecánico de dos MGM provenientes de canteras con mineralogía diferente, estabilizados mediante emulsión asfáltica. Para ello, se utilizará el ensayo DMA como método de caracterización, con el fin de adelantar su análisis y con miras a su posible empleo futuro en estructuras de pavimento de bajo volumen de tránsito, y aportar al conocimiento existente sobre el aprovechamiento de MGM en la infraestructura vial colombiana.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento mecánico de MGM provenientes de dos canteras diferentes estabilizados con emulsión asfáltica, mediante el ensayo de DMA.

1.2 Objetivos Específicos

Mejorar el proceso de compactación y curado de los materiales granulares estabilizados para la elaboración de probetas aptas para el ensayo DMA.

Establecer los parámetros mecánicos de ensayo para determinar las propiedades dinámicas mediante el ensayo DMA de MGM estabilizados con emulsión asfáltica.

Desarrollar una hoja de cálculo en Excel que permita el procesamiento automatizado y la representación gráfica de los datos obtenidos en los ensayos DMA de los materiales estabilizados.

2 Marco referencial

2.1 Marco teórico

2.1.1 Vías Terciarias

Según el INVIAS, las vías terciarias (o vías de bajo volumen de tránsito) son las vías de acceso que conectan las cabeceras municipales con sus veredas, o las que comunican veredas entre sí, y cumplen un papel fundamental en la integración territorial y la movilidad rural. Estas vías facilitan el transporte de personas, bienes y servicios y contribuyen al desarrollo social y económico de las zonas rurales al permitir el acceso a mercados, educación, salud y demás servicios básicos (INVIAS, 2022).

2.1.2 Material granular marginal (MGM)

El MGM se entiende como un material que, aun siendo utilizable en obras viales, no cumple totalmente con los requisitos exigidos en las especificaciones de calidad para capas granulares de pavimentación (por ejemplo, por su granulometría, contenido de finos y/o plasticidad). Este tipo de material es común en proyectos de vías terciarias, donde la disponibilidad de recursos, la logística y los costos de transporte favorecen el uso de materiales locales y cercanos a la zona de intervención (canteras o fuentes próximas), aunque estos requieran mejoramiento o estabilización para asegurar un desempeño adecuado (Garnica et al., 2002).

2.1.3 Ensayo de Compactación Estática

La compactación estática es un procedimiento mediante el cual se incrementa la densidad de un material granular o estabilizado mediante la aplicación de una carga constante o gradual (comúnmente mediante una prensa hidráulica) sobre una muestra confinada. Este proceso busca reducir el volumen de vacíos, aumentar el contacto entre partículas y generar una estructura interna

más estable, lo que se traduce en una mejora del comportamiento mecánico del material, en particular en términos de rigidez y resistencia al esfuerzo cortante (INVIAS, 2022).

2.1.4 Curado

El curado corresponde al conjunto de condiciones controladas de tiempo, temperatura, y humedad mediante las cuales un material desarrolla y estabiliza sus propiedades finales, especialmente aquellas asociadas a su resistencia, rigidez y durabilidad. La finalidad del curado es permitir que se produzcan los mecanismos físico-químicos responsables de la ganancia de resistencia y rigidez del material, evitando pérdidas prematuras de desempeño por cambios bruscos de humedad o temperatura, o por manipulación antes de alcanzar un estado estable (Villacorta et al., 2013).

2.1.5 Equipo Metravib DMA+1000

DMA es el nombre de un instrumento diseñado para aplicar carga dinámica con magnitud y frecuencia controlada, a temperatura controlada, y medir su respuesta de deformación. Los instrumentos tipo DMA pueden utilizarse para caracterizar las propiedades mecánicas y/o térmicas de diversos materiales, incluyendo polímeros (Metravib Instrumental, 2023).

2.1.6 Comportamiento mecánico dinámico de materiales estabilizados

La caracterización del comportamiento mecánico de los materiales estabilizados no se limita a la evaluación de su resistencia ante carga monotónica, sino que también debe evaluarse su desempeño bajo cargas cíclicas o dinámicas, como las que impone el tráfico vehicular. Los suelos estabilizados con emulsión asfáltica presentan comportamiento viscoelástico, por lo que es fundamental estudiar propiedades reológicas como el módulo dinámico (E^* ; rigidez bajo carga axial dinámica), módulo de almacenamiento (E'), módulo de pérdida (E''), y el factor de disipación energética ($\tan \delta$)—donde δ es el ángulo de fase—en un rango de temperatura y de

frecuencia. Estas propiedades permiten comprender cómo responde el material ante esfuerzos repetitivos y fluctuantes, y son importantes para prever fenómenos como la fatiga, las deformaciones permanentes o la fisuración térmica (Caro et al., 2014).

2.1.7 Ensayo de Análisis Mecánico Dinámico (DMA)

El DMA es una técnica avanzada utilizada para caracterizar el comportamiento viscoelástico de materiales sometidos a cargas dinámicas. En el contexto de la ingeniería civil, y en particular en el campo de ingeniería de pavimentos, su aplicación ha aumentado para estudiar ligantes, mezclas asfálticas finas y, más recientemente, materiales granulares estabilizados. El ensayo consiste en aplicar una carga sinusoidal a una muestra a diferentes temperaturas y frecuencias, lo que permite obtener curvas de comportamiento dependientes del tiempo y de la temperatura. A través del DMA se determinan:

- 1-Módulo dinámico (E^*): rigidez del material.
- 2-Módulo de almacenamiento (E'): elasticidad del material.
- 3-Módulo de pérdida (E''): energía disipada por efectos viscosos.
- 4-Tan δ (E''/E'): relación entre el comportamiento viscoso y elástico.

Esta técnica permite comparar materiales desde un enfoque reológico, lo cual es fundamental para validar la efectividad de las estabilizaciones de suelos con emulsiones asfálticas y su idoneidad para usos estructurales en pavimentos frente a fenómenos como la fatiga del material y el daño por humedad. Adicionalmente, en los últimos años, la aplicación del DMA ha cobrado relevancia en la caracterización de mezclas asfálticas modificadas (Caro et al., 2014).

2.2 Estado del arte

En vías de bajo volumen de tránsito, el uso de materiales locales se reconoce como una alternativa costo-efectiva; sin embargo, su aplicación suele estar limitada por deficiencias

granulométricas y/o niveles de plasticidad que comprometen el desempeño estructural y dificultan el cumplimiento de las especificaciones para subbases y bases granulares. En Colombia, estos criterios de aceptación y control están definidos en las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del INVIAS (INVIAS, 2022).

Desde la ingeniería de pavimentos, se ha establecido que el aumento del contenido de finos y la plasticidad incrementan la susceptibilidad a la humedad y la probabilidad de pérdida de rigidez, favoreciendo mecanismos de deterioro como la deformación permanente, la reducción progresiva de la rigidez y la aparición prematura de fallas (Garnica et al., 2002).

En este contexto, los MGM han sido abordados por la literatura como un recurso aprovechable siempre que se implementen estrategias de estabilización y control de calidad orientadas al desempeño, con el doble propósito de reducir la extracción de nuevos agregados y mitigar los impactos asociados al transporte y la disposición de materiales (Martínez & Arroyo, 2023).

A nivel académico, se han reportado antecedentes recientes que evalúan MGM en escenarios de bajo volumen de tránsito, lo que aporta bases para el desarrollo de metodologías experimentales y para la continuidad de la investigación aplicada (Bautista & Cabrales, 2023; Martínez & Arroyo, 2023).

Entre las alternativas propuestas para mejorar MGM, la estabilización con emulsión asfáltica se reporta de forma consistente como una técnica eficaz para incrementar la cohesión, disminuir la susceptibilidad a la pérdida de desempeño por el efecto del agua y mejorar la respuesta mecánica bajo sollicitación de servicio. Las emulsiones asfálticas, definidas como dispersiones de asfalto en agua y estabilizadas por un agente emulsionante, permiten incorporar ligante a

temperaturas inferiores a las requeridas por el asfalto convencional, con potencial de reducción del consumo energético y de los impactos asociados al proceso (Rahman et al., 2017).

La evidencia experimental disponible indica que los beneficios mecánicos no dependen únicamente de la adición de emulsión, sino también del control de variables de diseño y fabricación que gobiernan la formación de la microestructura: contenido de emulsión, humedad de mezcla, granulometría, mineralogía, y condiciones de curado. En particular, se ha documentado que la interacción ligante–agregado y el endurecimiento del residuo asfáltico tras el curado pueden mejorar el desempeño de las capas estabilizadas, siempre que la dosificación y el control de la humedad y del curado se establezcan de forma rigurosa (Bennert et al., 2004; Rahman et al., 2017).

Esta perspectiva ha sido reforzada por revisiones recientes sobre bases estabilizadas con emulsión, donde se concluye que el diseño de mezcla es inherentemente multivariable y que el desempeño depende de optimizar simultáneamente el agua, la emulsión y, cuando aplica, los aditivos, además de controlar la construcción y el curado para garantizar propiedades mecánicas estables y reproducibles (Shafabakhsh et al., 2022).

En términos de mecanismo, la estabilización mediante emulsión requiere una distribución homogénea del ligante en el agregado, seguida de la rotura de la emulsión y la coalescencia del asfalto, procesos que ocurren de manera acoplada con la compactación y el curado. Para MGM, esta secuencia adquiere especial importancia, ya que la fracción fina puede modificar la demanda de agua, la absorción y la afinidad ligante–agregado, lo que incide en la homogeneidad del recubrimiento y en el desarrollo de la cohesión interna (Rahman et al., 2017).

En el marco normativo colombiano, INVIAS (2013) establece procedimientos de laboratorio para el diseño y control de mezclas con emulsión asfáltica, que incorporan la compactación y la evaluación en condiciones estandarizadas para comparar alternativas de

dosificación y verificar la calidad del material estabilizado. La relevancia del curado como variable estructural ha sido destacada desde contribuciones clásicas, en las que se evidencia que la tasa de curado condiciona la respuesta mecánica y el desempeño en servicio, lo que implica que la evaluación mecánica debe sustentarse en protocolos de acondicionamiento consistentes y comparables (Kandhal, 1968).

Desde el punto de vista de la caracterización mecánica, la evaluación de materiales estabilizados mediante emulsión no debe limitarse a parámetros de resistencia estática, dado que en servicio las capas de pavimento experimentan solicitaciones repetidas asociadas al tránsito y variaciones térmicas que modifican su rigidez y su capacidad de disipar energía. En este marco, el DMA se ha consolidado como una herramienta experimental para cuantificar la respuesta viscoelástica de materiales con ligantes asfálticos, mediante la aplicación de cargas oscilantes de baja amplitud y la medición de la relación esfuerzo–deformación en función de la frecuencia y la temperatura (Castelo Branco, 2009). A partir del DMA es posible obtener el módulo de almacenamiento (E'), asociado al componente elástico o capacidad de almacenamiento de energía; el módulo de pérdida (E''), vinculado a la disipación de energía; y el factor $\tan \delta$, que resume el balance entre disipación y almacenamiento y se asocia con sensibilidad a temperatura y potenciales mecanismos de daño dependientes de la viscoelasticidad (Castelo Branco, 2009).

En comparación con ensayos tradicionales de estabilidad o compresión bajo carga monotónica, el DMA ofrece mayor sensibilidad para identificar cambios sutiles en la microestructura de materiales estabilizados, ya sea por variaciones en el contenido de ligante, modificaciones en el contenido de finos o diferencias en el estado de curado. En particular, se ha propuesto una metodología específica para caracterizar materiales asfálticos no estándar mediante DMA, resaltando que el ensayo permite diferenciar comportamientos mecánicos asociados a

heterogeneidades del material y a las condiciones de fabricación, lo cual resulta pertinente cuando se analizan mezclas en frío o sistemas con agregados marginales (Caro et al., 2014). Complementariamente, la literatura que emplea parámetros dinámicos en bases estabilizadas con emulsión ha mostrado que propiedades como la rigidez y la fase dependen del nivel de curado y de la temperatura, por lo que los ensayos dinámicos permiten discriminar estados de maduración del material y comparar formulaciones de manera más representativa del servicio (Rahman et al., 2017).

En el caso de MGM estabilizados con emulsión, el potencial del DMA radica en su capacidad para capturar la transición desde un estado inicial de baja cohesión hacia un material con ligante residual consolidado, así como para evaluar la influencia de variables críticas (contenido de emulsión, humedad de mezclado, procedimiento de mezclado y curado) sobre la evolución de rigidez y disipación energética. No obstante, pese a los avances metodológicos en DMA para materiales asfálticos y a la evidencia sobre desempeño dinámico en bases tratadas con emulsión, la aplicación sistemática del DMA en MGM aún es limitada, especialmente en lo relacionado con protocolos reproducibles de preparación de probetas a escala reducida y con la comparación entre fuentes de material con mineralogías distintas (Caro et al., 2014; Rahman et al., 2017). Esta brecha justifica estudios preliminares orientados a validar procedimientos de fabricación y ensayo DMA en MGM estabilizados con emulsión, de modo que se disponga de indicadores viscoelásticos comparables y útiles para la evaluación del desempeño potencial en vías de bajo volumen de tránsito (Castelo Branco, 2009).

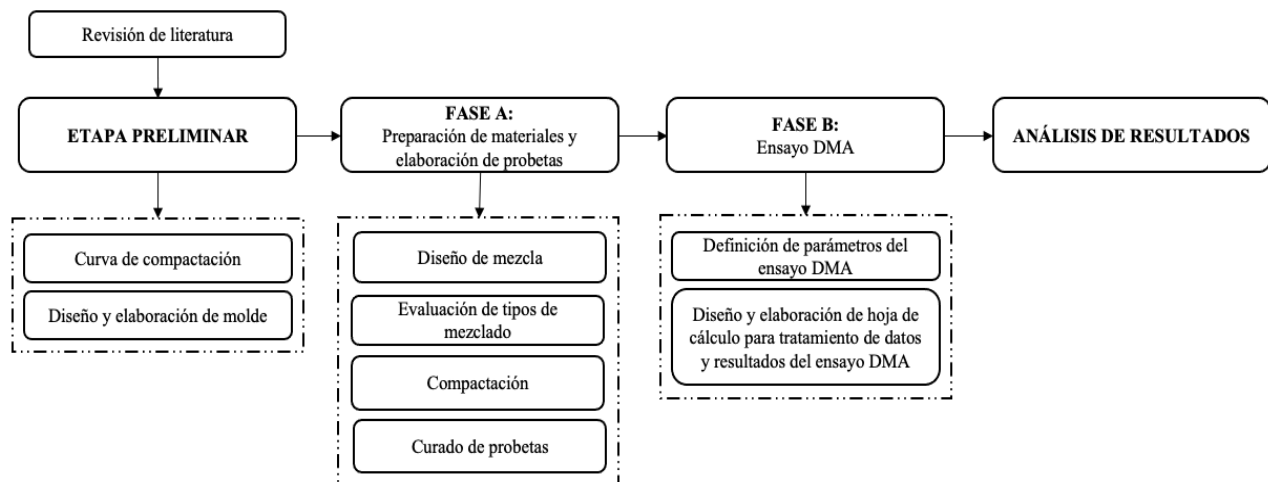
3. Metodología

La investigación corresponde a un estudio experimental de laboratorio orientado a evaluar el comportamiento mecánico de MGM estabilizados con emulsión asfáltica mediante caracterización viscoelástica. Se consideraron dos fuentes de material granular (provenientes de canteras con mineralogías diferentes) y se elaboraron especímenes con diferentes contenidos de emulsión, evaluando el efecto del procedimiento de mezclado y del curado sobre la respuesta mecánica medida mediante DMA.

Para el desarrollo experimental del proyecto, se siguió el proceso mostrado en la figura 1.

Figura 1.

Metodología general



3.1 Generalidades del proyecto

3.1.1 Revisión de literatura

Se realizó una revisión de la literatura orientada a identificar y consolidar antecedentes sobre: (i) la estabilización de materiales granulares con emulsión asfáltica, (ii) la influencia del curado y del proceso de mezclado en el desempeño mecánico, y (iii) la aplicación del ensayo de DMA para evaluar propiedades viscoelásticas (módulo dinámico, módulo de almacenamiento, módulo de pérdida, y $\tan \delta$). Esta revisión permitió definir la base conceptual del trabajo y orientar la selección de las variables experimentales.

3.2 Etapa preliminar

La etapa preliminar comprendió la planificación experimental y la preparación logística necesarias para garantizar la reproducibilidad en la fabricación de especímenes y en la ejecución de los ensayos. En esta fase se realizaron: (i) la selección y recolección de los dos MGM provenientes de canteras con mineralogía diferente; (ii) la verificación de disponibilidad y el almacenamiento de la emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento suministrada por Colbitumen S.A.S.; (iii) la definición de la granulometría objetivo y de los contenidos de emulsión a evaluar; (iv) la adecuación de equipos y herramientas para la mezcla y compactación; y (v) la programación del protocolo de curado y del ensayo DMA, incluyendo el acondicionamiento del equipo y la revisión del procedimiento de operación según el manual técnico.

Adicionalmente, se establecieron criterios de control de calidad para la preparación de especímenes: control de masas por especímenes y verificación dimensional. Esta etapa permitió ajustar el flujo de trabajo, minimizar la variabilidad entre especímenes y asegurar la consistencia de los tratamientos antes de iniciar la fase de ensayos.

3. 2.1 Curva de compactación

Con el fin de determinar la humedad óptima de compactación de los MGM, se construyeron curvas de compactación para los dos materiales evaluados; i.e., MGM Medellín y MGM Samacá. Para el material de Medellín se prepararon mezclas a diferentes contenidos de humedad (5, 7, 9, 11 y 13 %), y para cada porcentaje se elaboraron tres (3) especímenes. Para el material de Samacá se prepararon mezclas a 3, 5, 6, 7, 9 y 11 % de contenido de humedad, también con tres (3) especímenes por punto.

Posteriormente, se calculó el valor representativo de cada punto como el promedio de las tres repeticiones. Con los valores promedio se graficó la relación peso unitario seco Vs. contenido de humedad y se determinó la humedad óptima de compactación como el contenido de humedad correspondiente al máximo de la curva. A partir de este procedimiento, se obtuvo una humedad óptima de 9 % para el material de Medellín y una humedad óptima de 5.6 % para el material de Samacá. Estos valores se emplearon como referencia para el acondicionamiento de los materiales previo a la elaboración y compactación de los especímenes estabilizados.

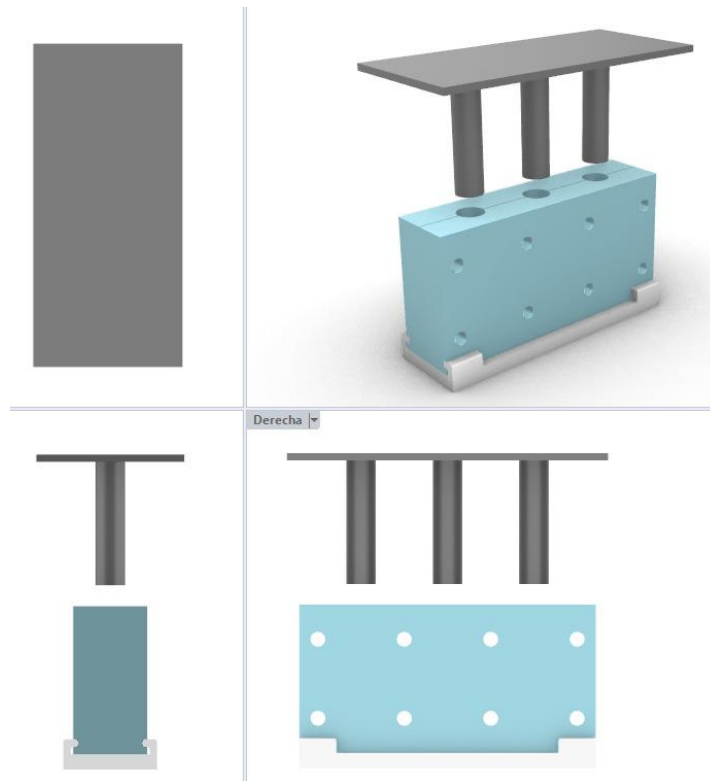
3.2.2 Diseño y elaboración del molde de compactación para probetas de ensayo DMA

El espécimen de ensayo tuvo una altura de 2.4 cm y un diámetro de 1.2 cm. Con base en estas dimensiones, se diseñó un molde en el software Rhinoceros (software CAD 3D) utilizado para impresión 3D. El molde diseñado tuvo dimensiones totales aproximadas de 6 cm de alto por 15 cm de largo y 3.8 cm de ancho, e incluyó tres cilindros, lo que permitió obtener tres especímenes mediante un solo proceso de compactación (ver Figura 2). Los moldes se fabricaron mediante impresión 3D en ácido poliláctico (PLA), (ver Figura 2), un

polímero biodegradable y termoplástico con resistencia adecuada frente a los esfuerzos generados durante la compactación estática y frente a cambios de temperatura.

Figura 2

Modelado 3D en el software Rhinoceros.



Nota: Parte de color azul, corresponde al molde; parte en color negro, corresponde al embolo; y la parte blanca, corresponde a la platina inferior de ajuste.

El diseño se realizó para facilitar el desmolde mediante tres émbolos que permitieron extraer los especímenes de forma uniforme y completa y minimizar posibles alteraciones en la estructura interna del material compactado (Ver figura 3).

Figura 3

Molde azul (6 cm de alto por 15 cm de largo) elaborado por impresión 3D, junto con el embolo.

**3.3 Fase A: Preparación de materiales y elaboración de probetas para ensayo DMA****3.3.1 Materiales****3.3.1.1 Material granular marginal (MGM) y caracterización inicial**

Los materiales empleados para la elaboración de las probetas se obtuvieron de la cantera La Libertad (Samacá, Boyacá) y de la cantera Santa Cecilia (Medellín, Antioquia). En la Figura 4 se presentan las curvas granulométricas determinadas para cada material y su comparación con la banda granulométrica de referencia para subbase granular tipo SBG-38, de acuerdo con las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. En dicha figura, LI corresponde al límite inferior de la banda granulométrica especificada para subbases granulares SBG-38, y LS corresponde al límite superior de dicha banda. Asimismo, en las Tablas 1 y 2 se muestra la distribución granulométrica de cada material (INVIAS, 2022).

Figura 4

Curvas granulométricas.

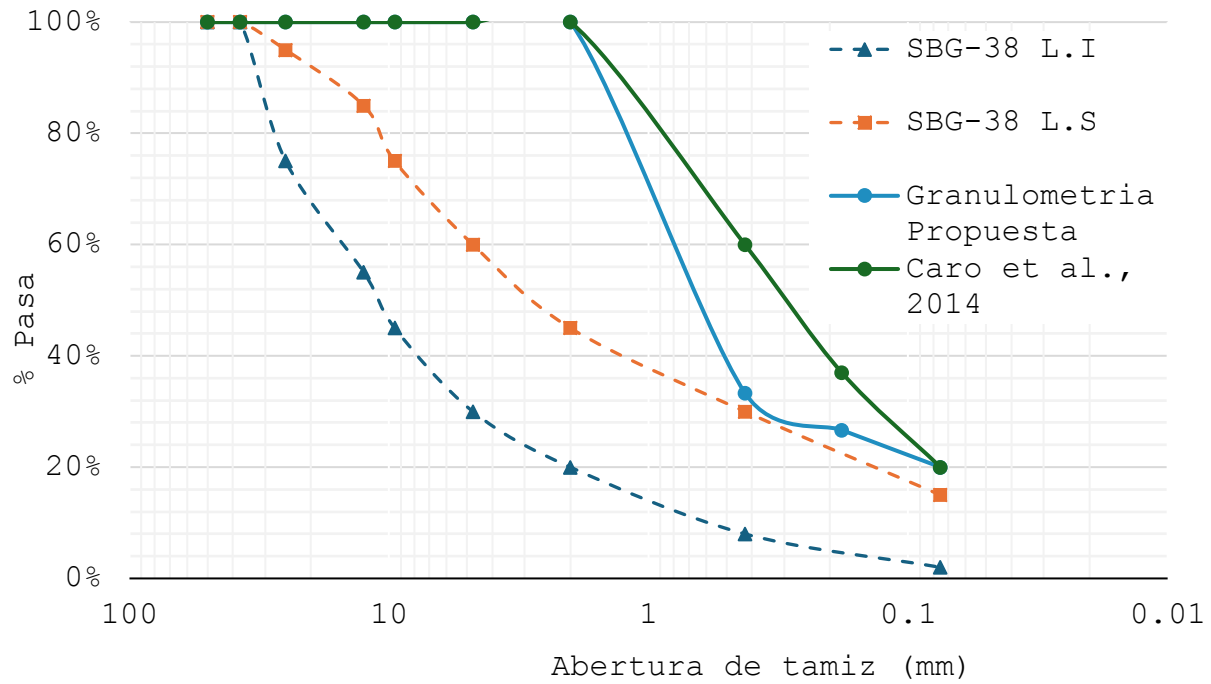


Tabla 1

Granulometría propuesta.

Granulometría propuesta			
Fuente	Tamiz	%Retenido	%Retenido
Arenas	N40		77.8%
	N80	80%	1.1%
	N200		1.1%
FONDO	P200	20%	20.0%

Tabla 2*Granulometría empleada por Caro et al., 2014.*

Granulometría empleada por Caro et al., 2014			
Fuente	Tamiz	%Retenido	%Retenido
	N40		40%
Arenas	N80	80%	23%
	N200		17%
FONDO	P200	20%	20%
Peso total			

3.3.1.2 Emulsión asfáltica

La empresa Colbitumen S.A.S. suministró la cantidad necesaria de emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento—emulsión comercial—, con una concentración 60/40; 60% de asfalto residual. La emulsión se almacenó en recipientes de un galón de capacidad dentro del Laboratorio de Caracterización de Materiales-LCM de la Universidad Industrial de Santander (UIS), en un lugar seco y oscuro. Adicionalmente, los recipientes se agitaron periódicamente para evitar la separación de fases y el rompimiento prematuro de la emulsión, garantizando condiciones uniformes durante la preparación de las mezclas con los MGM.

El contenido de emulsión se definió considerando rangos reportados en estudios previos para mejorar la cohesión y el desempeño mecánico frente a sollicitaciones repetidas (Bennert et al., 2004; Rahman et al., 2017).

3.3.2 Diseño de mezclas estabilizadas con emulsión asfáltica

Se seleccionaron cuatro porcentajes de emulsión asfáltica para el estudio. Para su definición, se consultaron ecuaciones aplicables a la estabilización de MGM, comparando los resultados del enfoque normativo (i.e., norma INV E-622-13 (INVIAS, 2013)) con ecuaciones

empíricas reportadas en la literatura Kezdi, 1979 formula general (ecuación 1), Kezki 1979 formula aplicada a finos (ecuación 2) y la fórmula de Vogt (ecuaciones 3 y 4).

$$P = 0.015a + 0.02b + 0.03c + 0.09d \text{ (ecuación 1)}$$

Donde:

P = Contenido de asfalto a añadir (%)

a = Suelo retenido en el tamiz n.10 (%)

b = Suelo pasante en el tamiz n.10 y retenido en el tamiz n.40 (%)

c = Suelo pasante en el tamiz n.40 y retenido en el tamiz n.200 (%)

d = Suelo pasante del tamiz n.200 (%)

$$P = 2.75 + 0.064d \text{ (ecuación 2)}$$

Donde:

P = Contenido de asfalto a añadir (%)

d = Suelo pasante del tamiz n.200 (%)

$$100\Sigma = 0.07P_4 + 0.14P_3 + 0.33P_2 + 0.81P_1 + 2.7S_3 + 9.15S_2 + 21.9S_1 + 135F$$

(ecuación 3)

Σ = superficie específica (m²/kg)

P_4 = Fracción entre los tamices de 50 y 25 mm (%)

P_3 = Fracción entre los tamices de 25 y 12.5 mm (%)

P_2 = Fracción entre los tamices de 12.5 y 4.76 mm (%)

P_1 = Fracción entre los tamices de 4.76 y 2.00 mm (%)

S_3 = Fracción entre los tamices de 2.00 y 0.42 mm (%)

S_2 =Fracción entre los tamices de 0.42 y 0.177 mm (%)

S_1 =Fracción entre los tamices de 0.177 y 0.075 mm (%)

F = Fracción pasante del tamiz 0.075 mm (%)

$$L = k(\Sigma)^{0.2} \text{ (ecuación 4)}$$

Donde:

L = Asfalto residual

Σ =superficie especifica (m²/kg)

k = Coeficiente de riqueza

Después de calcular el porcentaje de asfalto residual se debe calcular el porcentaje de emulsión asfáltica teniendo en cuenta la concentración de emulsión asfáltica, 60-40 en nuestro caso, con la ecuación 5.

$$\%EOT = \frac{L}{C} \text{ (ecuación 5)}$$

Donde:

%EOT= Porcentaje optimo teórico de emulsión asfáltica

%L= Porcentaje de asfalto residual

C= Concentración de la emulsión asfáltica

Dichos métodos arrojaron valores iguales o superiores al 5 %, por lo cual se seleccionaron contenidos por encima para el análisis experimental: 6 %, 7 %, 8 % y 10 % respecto al peso seco del material granular. Las mezclas se prepararon en el laboratorio bajo un procedimiento controlado que aseguró la distribución uniforme del ligante en el material granular.

3.3.3 Evaluación de tipos de mezclado

Se evaluaron dos procedimientos de mezcla con el objetivo de mejorar la homogeneidad en la distribución del ligante:

- Mezclado convencional: adición secuencial de agua, emulsión asfáltica y la fracción de sólidos.
- Mezclado alternativo por etapas: mezcla A con arenas (fracción pasa tamiz No. 40 –retenida en tamiz No. 200) y emulsión; mezcla B con fracción fina (pasa tamiz No. 200) y agua; y posterior integración de ambas mezclas hasta lograr homogeneidad antes de la compactación.

El procedimiento alternativo ha sido reportado con ventajas en la densidad aparente, la reducción de la porosidad, la mejora de la adhesión y la disminución de los tiempos de curado en mezclas asfálticas fabricadas con emulsión—mezclas en frío—(Xiao et al., 2018). En este trabajo se implementó el procedimiento alternativo para comparar su efecto frente al mezclado convencional en la estabilización de MGM mediante emulsión asfáltica.

Figura 5

Bandeja de mezcla de fracción sólidos con emulsión asfáltica (8%) y agua.



El proceso de homogeneización se dio por concluido cuando se observó una coloración uniforme en la totalidad del material, condición granular que evidenció una adecuada distribución de la emulsión en toda la mezcla.

Figura 6

*Especímenes obtenidos mediante el método de mezclado tradicional (con figura azul).
Especímenes obtenidos mediante el método de mezclado alternativo (con la figura naranja).*



Una vez obtenidos los especímenes correspondientes a cada método de mezclado, se evaluó su comportamiento mecánico mediante el ensayo de DMA. Se decidió adoptar el método de mezclado alternativo para la preparación de los especímenes, dado que este permitió una mejor homogeneización superficial a lo largo de todo el espécimen, lo cual facilita la reproducibilidad del proceso y la consistencia en la preparación de las muestras.

3.3.4 Desarrollo del espécimen de ensayo

3.3.4.1 Granulometría del espécimen

Se evaluaron diferentes dosificaciones con el propósito de definir una composición adecuada para la investigación como se indica en la sección 3.3.1.1. Se adoptó una granulometría utilizada en la línea de trabajo para especímenes pequeños, y se realizaron ajustes para garantizar la compatibilidad con los objetivos del estudio. La granulometría final adoptada se presentó en la Tabla 2. Para la clasificación granulométrica se emplearon los tamices No. 40, No. 80 y No. 200.

El material pasante del tamiz No. 200 se recolectó y se denominó “fondo de cantera”, debido a que correspondió al residuo fino generado durante el proceso de tamizado mecánico.

3.3.4.2 Preparación del material estabilizado

En una etapa inicial se evaluaron diferentes contenidos de emulsión con el fin de analizar el comportamiento del material granular estabilizado bajo distintas condiciones y validar el protocolo del ensayo DMA. La determinación de los contenidos de emulsión se realizó con base en el procedimiento normativo para el cálculo de la emulsión requerida tal como antes se discutió; el contenido de 6 % se adoptó como referencia inicial y se incluyeron contenidos superiores (7 %, 8 % y 10 %) para evaluar tendencias asociadas al incremento del ligante (INVIAS, 2013).

El material se mezcló en un recipiente de dimensiones adecuadas para evitar pérdidas. Una vez obtenidos los especímenes mediante ambos métodos de mezclado, se evaluó su comportamiento y se adoptó el método alternativo, dado que permitió una mejor homogeneización superficial y una mayor reproducibilidad del proceso de fabricación de especímenes.

3.3.5 Compactación y curado de probetas

3.3.5.1 Cálculo de masa y dosificación por espécimen

Teniendo el material correspondiente de las canteras provenientes de Samacá y Medellín, se dosificó en recipientes por fracciones, tal como se muestra en la Figura 7. La masa seleccionada se definió a partir de las dimensiones del espécimen (altura y diámetro) y de los parámetros obtenidos en la curva de compactación de cada material, específicamente la humedad óptima y la densidad seca máxima. Con base en estos parámetros, se determinó la masa requerida despejando la variable a partir de la ecuación 1.

Figura 7

Recipientes para cada fracción de material.



$$\text{Densidad} = \frac{\text{Masa (g)}}{\text{Volúmen (cm}^3\text{)}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Posteriormente, se estableció la dosificación de sólidos por fracciones granulométricas según la distribución porcentual de tamaños definida para fabricar los especímenes. Una vez determinada la combinación de fracciones, se incorporaron las cantidades correspondientes de agua y de emulsión asfáltica, obteniéndose la mezcla final utilizada para la elaboración de los especímenes. La masa total de la mezcla se calculó como la suma del peso del material seco y de los agentes líquidos adicionados, garantizando la coherencia con las condiciones de compactación establecidas.

El procedimiento descrito se fundamentó en los parámetros obtenidos para los materiales provenientes de las canteras de Medellín y Samacá, los cuales se presentan en la Tabla 3, asegurando la consistencia entre los valores empleados durante la fabricación de especímenes y los datos definidos en la fase experimental.

Tabla 3*Valores de análisis experimental*

Altura (cm)	2.4
Diámetro (cm)	1.2
Área (cm ²)	1.131
Vt (volumen total) (cm ³)	2.714
γ_d (peso unitario seco) (kN/m ³)	17
r_d (densidad unitaria seca) (g/cm ³)	1.7
%W (contenido de humedad Samacá) (%)	5.6
W _w (masa de agua) (g)	0.258
W _s (masa de sólidos) (g)	6.902
%W (contenido de humedad Medellín) (%)	9
W _w (masa de agua) (g)	0.534
W _t (masa total) (g)	7.87

Nota: Los valores presentados corresponden a la geometría del espécimen tipo petit (altura 2.4 cm y diámetro 1.2 cm) y a los parámetros utilizados para el cálculo de la masa y la dosificación de agua. Estos valores se refieren a 3 especímenes.

Posteriormente, el material seleccionado fue introducido en el molde mediante un embudo y se realizó una precompactación manual mediante golpes y vibraciones, con el objetivo de lograr una distribución homogénea del material en todo el molde. Una vez asegurada la uniformidad del espécimen, se procedió a compactarlo empleando una prensa de carga Controls Multiloader.

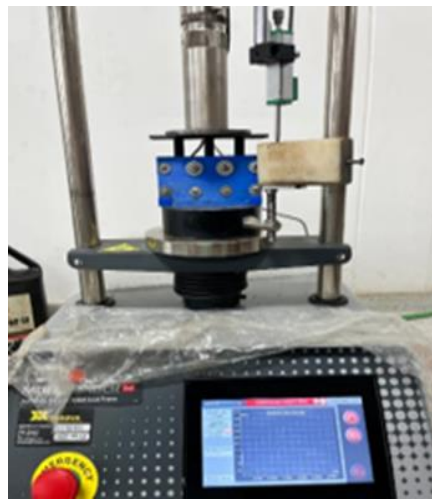
3.3.5.2 Precompactación y compactación en prensa Multiloader.

El material se introdujo en el molde mediante un embudo y se realizó una precompactación manual mediante golpes y vibraciones para asegurar una distribución homogénea en el interior del molde. Posteriormente, se realizó una compactación manual inicial utilizando un émbolo de 1.2 cm de diámetro, con el fin de acomodar el material y asegurar la transferencia directa de la carga al espécimen durante la compactación en prensa, evitando que la carga se transmitiera al molde.

La compactación final se realizó en la prensa MULTILOADER Automatic Universal Tester, ubicada en el laboratorio de Caracterización de Materiales-LCM de la UIS. Cada condición de mezcla se replicó al menos tres veces.

Figura 8

Prensa Multiloader realizando el proceso de compactación.

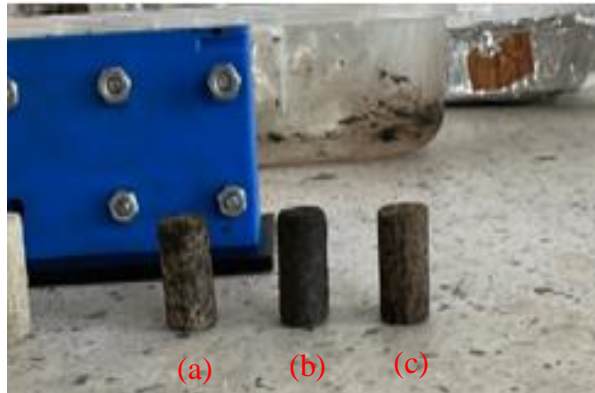


3.3.5.3 Curado del espécimen

Tras la compactación, las probetas se sometieron a un curado progresivo con el fin de asegurar el rompimiento de la emulsión y la ganancia de rigidez por la cohesión aportada por la matriz bituminosa. El protocolo de curado se fundamentó en una metodología de diseño de laboratorio para materiales granulares estabilizados mediante emulsión asfáltica (Villacorta et al., 2013).

Figura 9

Especímenes de ensayo no homogeneizados, posteriores al proceso de compactación y desmolde (a) 6%, (b) 8% y (c) 7%.



Con el fin de definir el tiempo y el método de curado del material evaluado, se realizó inicialmente una revisión bibliográfica de estudios previos. En particular, se tomó como referencia la metodología propuesta por Villacorta (Villacorta et al., 2013), en la cual se emplean procesos de curado a temperatura ambiente o ligeramente superiores, bajo condiciones controladas, sin sellado del espécimen.

En concordancia con dicha metodología, en la presente investigación no se utilizó vinipel ni ningún tipo de sellado. Los especímenes se dejaron al aire libre durante 24 horas, lo que permitió la evaporación inicial de humedad. Posteriormente, fueron trasladados a un horno a una temperatura constante de 40 °C, donde permanecieron durante 24 horas adicionales, registrando su masa cada 2 horas hasta que se evidenciara la estabilización de la masa, criterio adoptado para considerar finalizado el proceso de curado.

Este procedimiento permitió garantizar un curado controlado y reproducible, coherente con las condiciones reportadas por Villacorta (Villacorta et al., 2013), asegurando así la adecuada preparación de los especímenes para la realización de los ensayos correspondientes.

3.4.2 Definición de parámetros del ensayo DMA

Para el ajuste de parámetros del ensayo DMA se elaboró un número específico de especímenes para cada cantera, con el objetivo de establecer condiciones de ensayo adecuadas. Se realizaron ensayos exploratorios para determinar la fuerza y la frecuencia soportadas por los especímenes. Posteriormente, se efectuó un barrido de valores de desplazamiento vertical para definir el rango de este parámetro en el que el módulo dinámico se mantuviera aproximadamente constante, evitando variaciones significativas del módulo ante incrementos adicionales del valor de desplazamiento y garantizando ensayos en el régimen de deformaciones elásticas.

A partir del barrido de desplazamientos, se estableció un valor de $3 \cdot 10^{-6}$ m tanto para el material de Medellín como para el de Samacá, y una fuerza de compresión de 16 N. Estos valores garantizaron que las muestras no sufrieran daño tras el ensayo. La frecuencia de ensayo se estableció en el rango de 1 a 10 Hz con los siguientes valores: 1, 1.468, 2.154, 3.162, 4.642, 6.813, y 10 Hz. En relación con la temperatura, se seleccionaron tres condiciones: temperatura ambiente (24,5 °C), 54 °C, y 60 °C. Para cada condición de temperatura se estableció un tiempo de estabilización de las probetas de media hora, este tiempo se determinó realizando ensayos de estabilización que comprendían un tiempo de 10 minutos a una hora, lo mencionado anteriormente, se hizo para garantizar el equilibrio térmico entre la probeta y la cámara del equipo DMA. Las mediciones permitieron obtener el módulo dinámico (E^*), el módulo de almacenamiento (E'), el módulo de pérdida (E'') y ángulo de fase $\tan \delta$. El procedimiento se ejecutó conforme al manual de operación del equipo DMA (i.e., Metravib DMA+1000) (Metravib Instrumental, 2023).

3.4 Ensayo de Análisis Mecánico Dinámico DMA

3.4.1 Ejecución del ensayo DMA

Una vez obtenidos los especímenes, se realizó el ensayo de DMA para caracterizar su comportamiento y evaluar su desempeño mecánico. Para ello, se utilizó el equipo Metravib DMA+1000, ubicado en el Laboratorio de Caracterización de Materiales-LCM de la UIS. El equipo permite distintos tipos de carga; sin embargo, para este trabajo se empleó únicamente el montaje de carga axial de compresión, con el fin de asegurar la comparabilidad entre tratamientos y de acuerdo con las recomendaciones de la línea de trabajo.

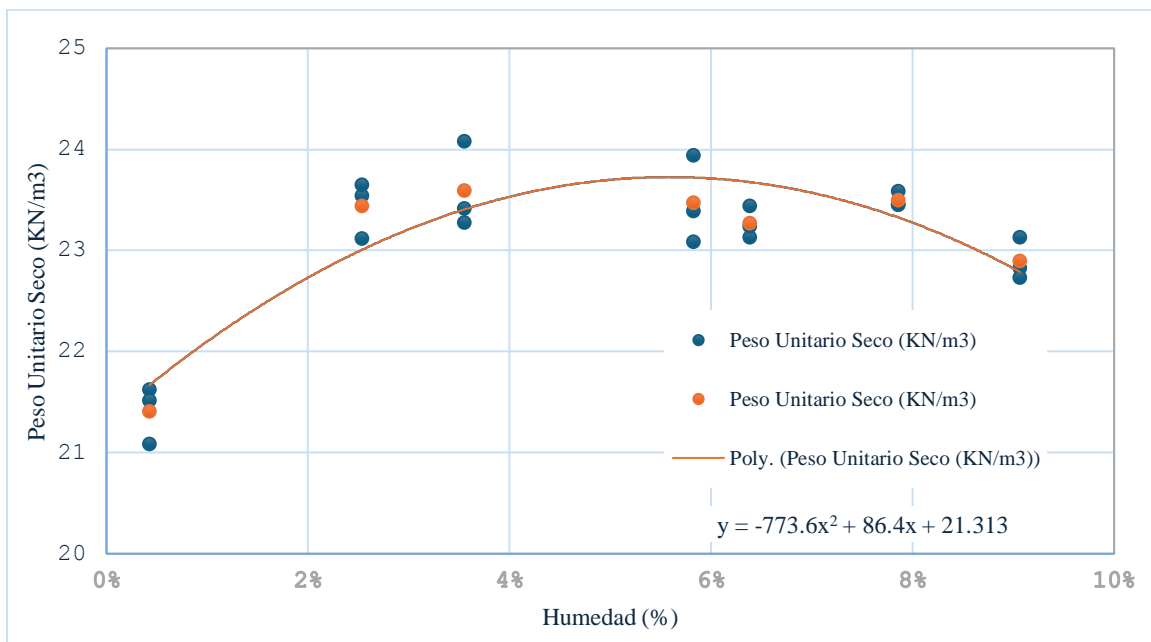
4. Resultados

4.1. Curva de compactación

Las curvas de compactación se determinaron para los MGM provenientes de las canteras de Samacá y Medellín. En el caso de la cantera de Samacá, la curva de compactación se elaboró a partir de diferentes contenidos de humedad, presentados en la Sección 3.2.1, considerando un peso unitario seco teórico de 17 kN/m³. Posteriormente, como se evidencia en la Figura 10, se obtuvo una densidad seca máxima de 23.7 kN/m³, correspondiente a una humedad óptima de compactación de 5.6 %.

Figura 10

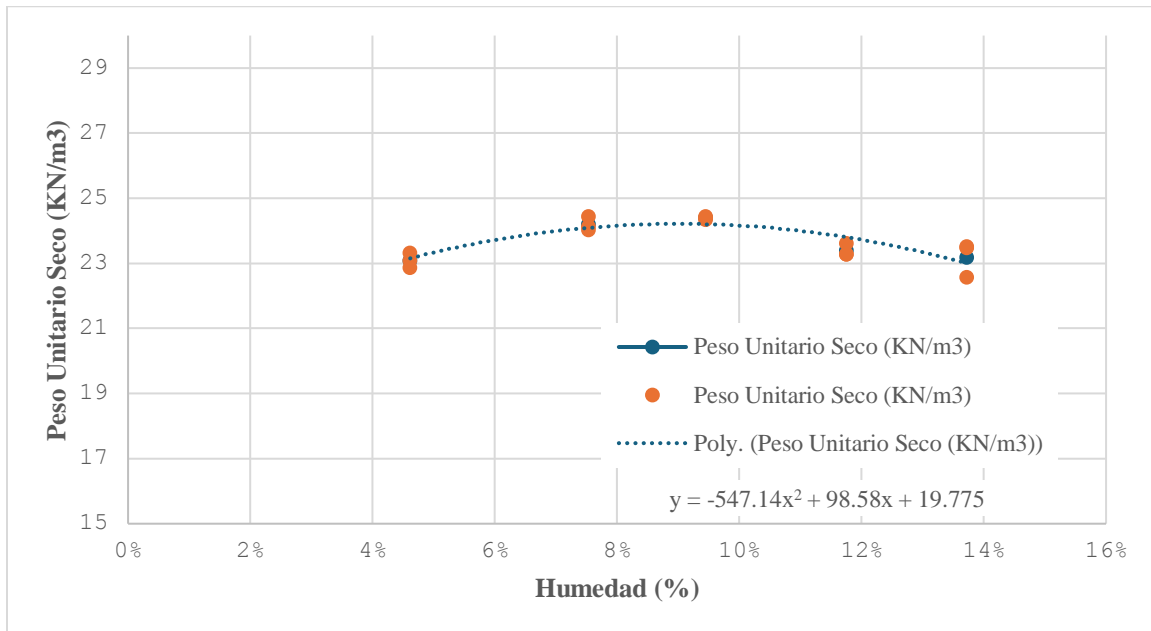
Curva de compactación, material de la cantera de Samacá



Para el material proveniente de la cantera de Medellín, se aplicó el mismo procedimiento para determinar la curva de compactación, obteniéndose una densidad seca máxima de 24.2 KN/m³ y una humedad óptima de compactación de 9%. Estos resultados se evidencian en la figura 11.

Figura 11

Curva de compactación, material de la cantera de Medellín.



4.2 Fase A

4.2.1 Diseño de mezcla

De acuerdo con el método de (Kezki, et al. 1979) (Menezes, 2011, pág. 33), se obtuvo que el contenido de emulsión óptimo teórico es del 5%; se decidió trabajar con contenidos de emulsión de varios puntos porcentuales por encima para el estudio, a fin de verificar el comportamiento de las probetas. Estos contenidos fueron del 6, 7, 8, y 10% respecto al peso seco del material. No se evaluaron contenidos inferiores al óptimo teórico, ya que los especímenes no soportaban la fuerza mínima que puede aplicar el equipo DMA (aproximadamente 12 N).

4.2.2 Evaluación del método de mezclado

La aplicación del método de mezclado alternativo por etapas permitió obtener probetas con una distribución del ligante visiblemente uniforme y una adecuada cohesión interna. La separación

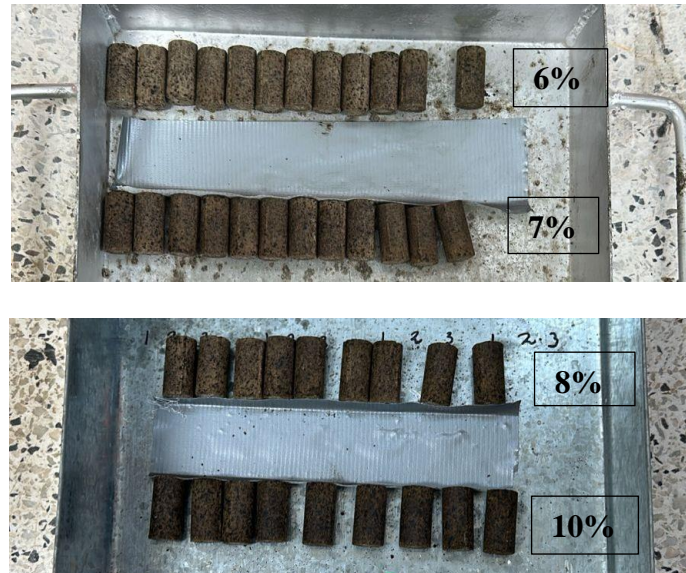
inicial de los agregados según su fracción granulométrica favoreció una mejor interacción entre la emulsión asfáltica y la fracción arenosa, mientras que la incorporación controlada del material fino pasante el tamiz No. 200 contribuyó a mejorar el relleno de vacíos y la estabilidad de la mezcla. Como resultado, las probetas presentaron una microestructura relativamente homogénea, sin evidencias de segregación, exudación del ligante ni desmoronamiento durante el desmolde y la manipulación previa a los ensayos DMA.

4.2.3 Compactación de probetas

La elaboración de los especímenes se llevó a cabo de manera satisfactoria, cumpliendo con el protocolo establecido y las especificaciones previamente definidas en el presente proyecto de investigación. Durante el proceso de fabricación de las probetas se evidenció—visualmente— una adecuada compactación y una cohesión uniforme del material, lo cual se reflejó en la correcta conformación de los especímenes al retirar el molde, sin fisuras, desprendimientos ni desmoronamientos, como se muestra en la figura 12.

Figura 12

Especímenes de izquierda a derecha con 6%, 7%, 8% y 10% de emulsión asfáltica de la cantera de Samacá después del proceso de curado.

**4.2.4 Curado de probetas**

De acuerdo a lo planteado en la sección 3.3.5.3, se realizó el curado de las probetas teniendo en cuenta el registro de la pérdida de masa de agua cada cierto tiempo, lo cual mostró resultados donde las probetas elaboradas con material de las canteras de Samacá y Medellín perdían la mayor cantidad de agua durante las primeras 24 horas a temperatura ambiente. Transcurrido este tiempo, la velocidad de pérdida de masa disminuyó cuando las muestras se sometieron a una temperatura de 40 °C en horno de convección forzada. En la Figura 15 se observa que, para los especímenes elaborados con material de la cantera de Samacá, el tiempo de estabilización varió en función del contenido de emulsión asfáltica. En particular, las probetas con un contenido de emulsión del 6 % alcanzaron la estabilización aproximadamente a las 31 horas, mientras que aquellas con 7 %, 8 % y 10 % de emulsión lo hicieron alrededor de las 30, 28 y 27 horas, respectivamente.

En la figura 16 se evidenció el mismo comportamiento para los especímenes de la cantera de Medellín, las probetas con un contenido de emulsión del 6 % alcanzaron la estabilización aproximadamente a las 43 horas, mientras que aquellas con 7 %, 8 % y 10 % de emulsión lo hicieron alrededor de las 42, 41 y 39 horas, respectivamente.

En las Figuras 13 y 14 se presentan las pendientes obtenidas para cada porcentaje de emulsión asfáltica y para cada cantera analizada. La pendiente M6, M7, M8 Y M10 representa la pérdida de masa de los especímenes durante las primeras 24 horas a temperatura ambiente. No obstante, dichas pendientes no evidencian la tendencia esperada, ya que, a mayores contenidos de emulsión asfáltica, debería haber una mayor pérdida de masa, y las pendientes correspondientes a las primeras 24 horas no presentan un comportamiento acorde con el incremento del contenido de emulsión.

Figura 13

Tendencia de masa vs. tiempo, material de la cantera de Samacá.

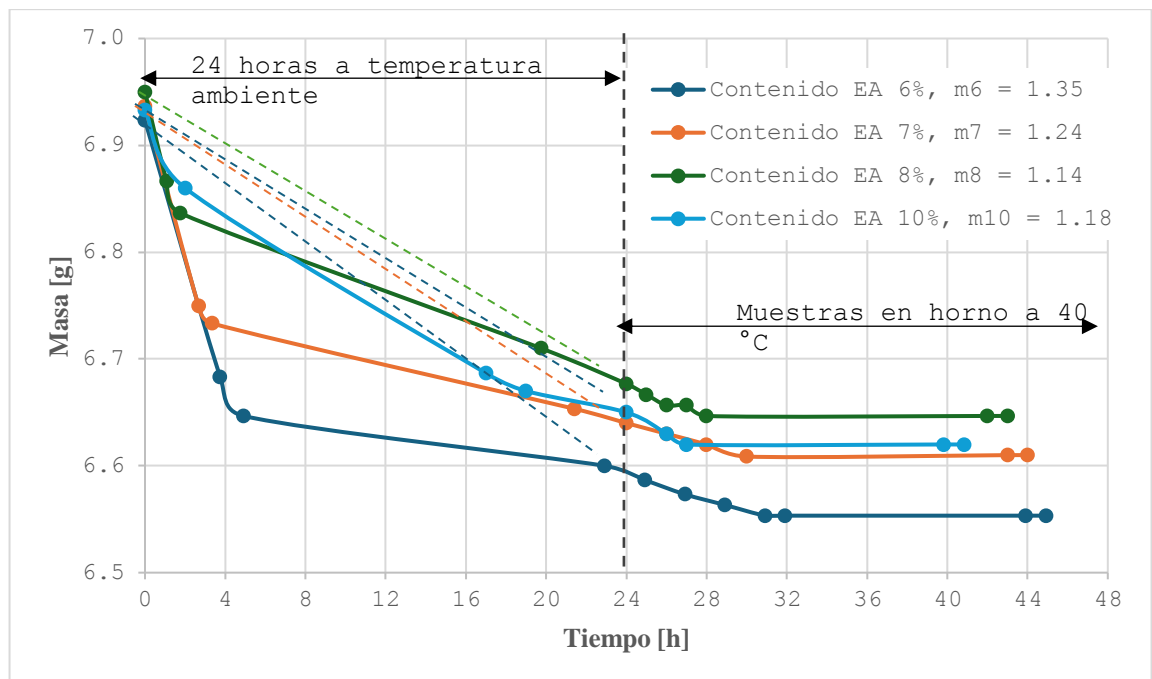
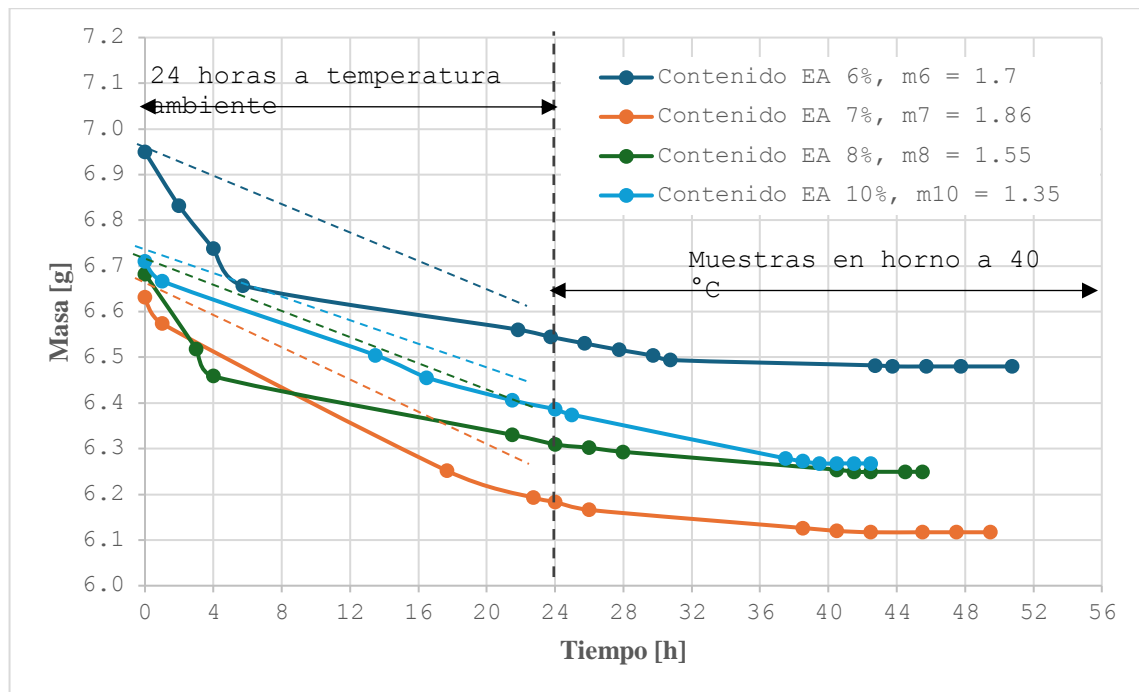


Figura 14

Tendencia de masa vs tiempo, material de la cantera de Medellín.



4.3 Fase B

4.3.1 Definición de parámetros del ensayo DMA

Para la definición de parámetros del ensayo DMA, se realizaron ensayos de prueba y error a las probetas elaboradas con material de las dos canteras para determinar la fuerza, desplazamiento y las frecuencias que aseguraran que los ensayos se hicieran en condiciones estables (rango viscoelástico lineal del material), obteniendo una fuerza de 16 N y frecuencias comprendidas entre 1 y 10 Hz. Posteriormente, se realizaron barridos en las probetas elaboradas con la cantera de Samacá y Medellín, como se muestra en las figuras 15 y 16. Estos barridos

muestran el comportamiento del módulo dinámico en función del desplazamiento, a partir del cual se determinó el desplazamiento óptimo para especímenes de Samacá.

Figura 15

Barrido de desplazamientos material de Samacá

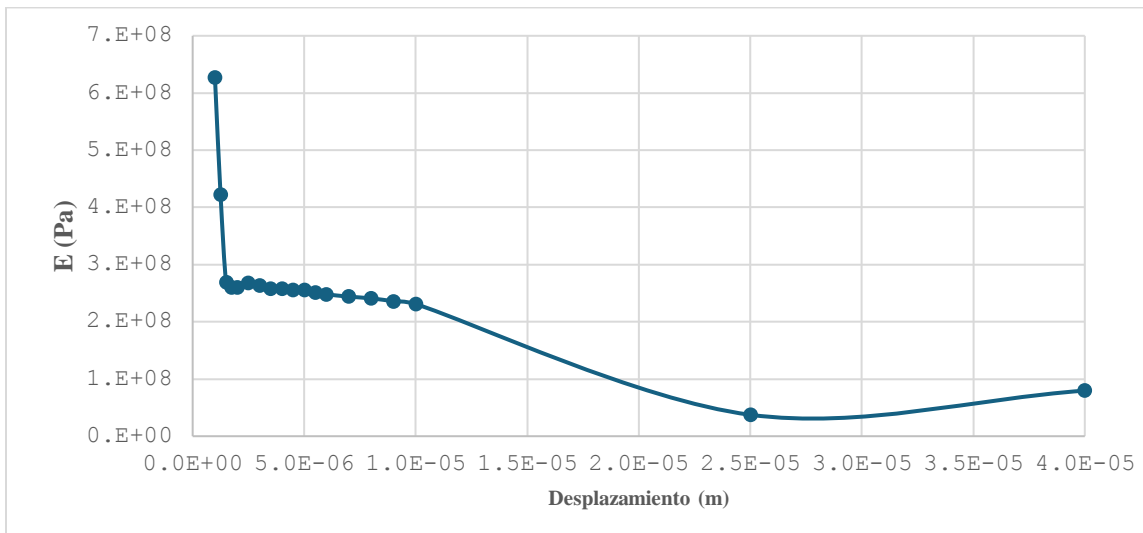
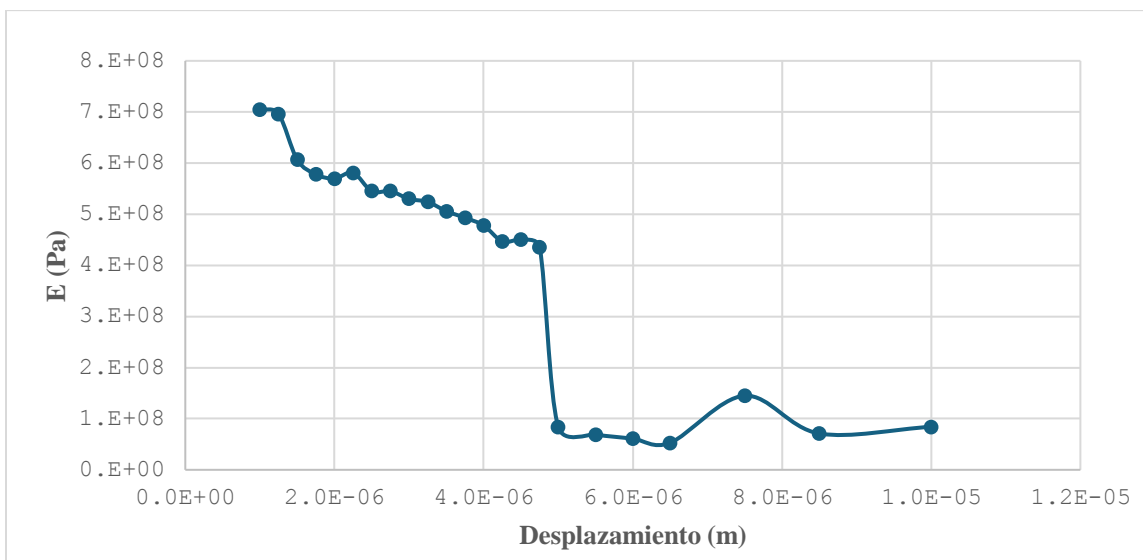


Figura 16

Barrido de desplazamientos material de Medellín



Tal como se observa en las Figuras 15 y 16, los barridos realizados evidencian un intervalo de desplazamientos en el que el módulo dinámico presenta valores aproximadamente constantes. Con base en este comportamiento, se seleccionó un desplazamiento $3 \cdot 10^{-6}$ m, asegurando que, durante la ejecución de los ensayos en la máquina DMA, las probetas tengan respuestas en el rango viscoelástico lineal.

4.3.2 Diseño y elaboración de hoja de cálculo para tratamiento de datos y resultados del ensayo DMA

Como parte del desarrollo del presente trabajo, se elaboró una hoja de cálculo en Microsoft Excel “Resultados_DMA” diseñada para el procesamiento de datos obtenidos en los ensayos de Análisis Mecánico Dinámico (DMA). Esta herramienta permite organizar la información experimental suministrada por el software Dynatest, para generar representaciones gráficas que faciliten el análisis y la comparación de los resultados.

4.4 Análisis de resultados del ensayo DMA

Mediante el software Dynatest – [stabilized 2:3] (Dynatest Consulting Inc.) empleado para la ejecución del ensayo de DMA, se obtuvieron los resultados del comportamiento de los especímenes ensayados en la máquina Metravib+1000. Los especímenes fueron sometidos a diferentes valores de frecuencia y a variaciones de temperatura establecidas en la sección 3.4.2.

Considerando que los resultados del ensayo DMA para cada cantera, evaluados a distintos contenidos de emulsión asfáltica evidencian tendencias de comportamiento similares frente a las variables de frecuencia y temperatura, se seleccionaron los resultados más representativos para su presentación y análisis. En este sentido, se presentan los resultados correspondientes a las probetas de la cantera de Samacá, con un contenido de emulsión asfáltica del 8 %, y de la cantera de

Medellín, con un contenido de emulsión asfáltica del 8 %. Estos resultados se evidencian en las figuras 17, 18, 19 y 20.

Figura 17

Ángulo de fase vs. frecuencias del espécimen estabilizado con 8% de emulsión asfáltica de la cantera de Samacá, a temperatura ambiente (54 °C) y a 60 °C.

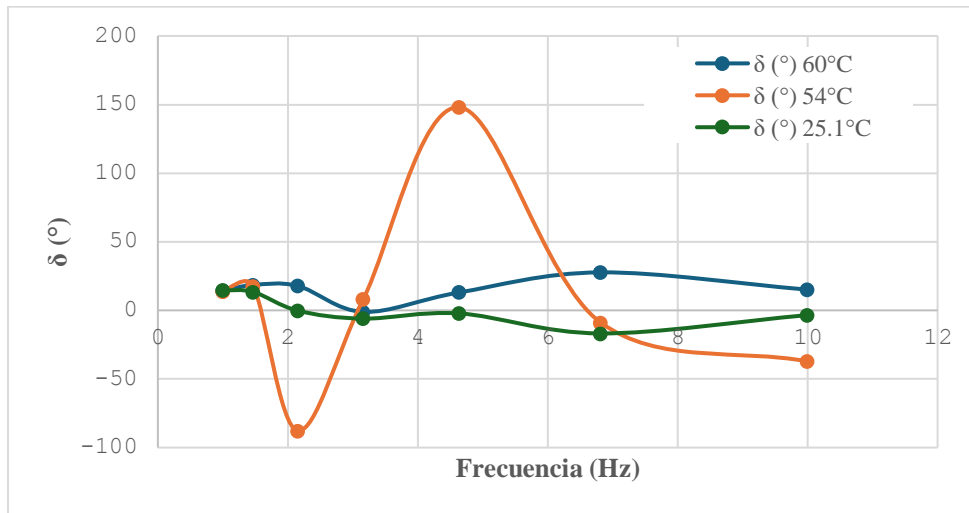
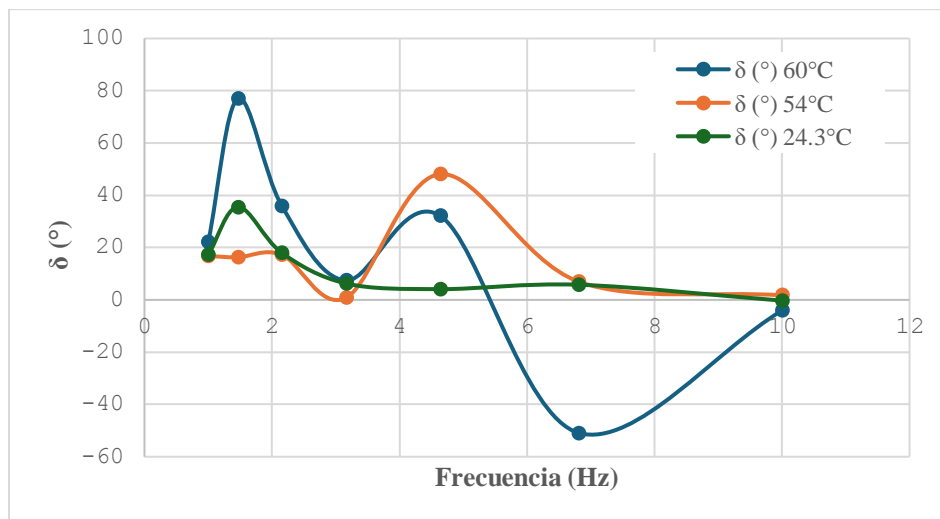


Figura 18

Ángulo de fase vs. frecuencias del espécimen estabilizado con 8% de emulsión asfáltica de la cantera de Medellín a temperatura ambiente, 54 °C y 60 °C.

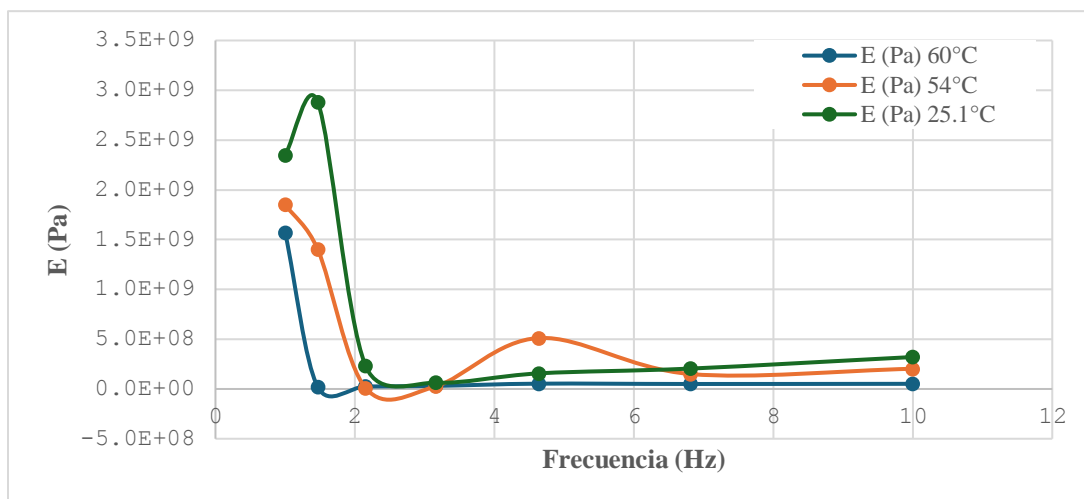


Al analizar la Figura 17, se evidencia que los especímenes elaborados con material de la cantera de Samacá presentan un comportamiento atípico del ángulo de fase, ya que al aumentar la temperatura este parámetro disminuye hasta valores negativos a temperatura ambiente y a 54 °C, lo cual no concuerda con el comportamiento teórico esperado. Adicionalmente, el ángulo de fase no muestra una tendencia uniforme con el incremento de la frecuencia, sino que presenta variaciones con ascensos y descensos, considerados no esperados desde el punto de vista viscoelástico. Así mismo, al analizar la figura 18, se puede observar que los especímenes elaborados con la cantera de Medellín, tienen el mismo comportamiento atípico del ángulo de fase respecto a la tendencia teórica esperada desde el punto de vista viscoelástico.

Los comportamientos atípicos observados en el ángulo de fase podrían estar relacionados con una configuración inadecuada del equipo de ensayo o con posibles limitaciones asociadas a los sensores de fuerza y desplazamiento de la máquina Metravib DMA+1000, aspectos que exceden el alcance del presente proyecto de investigación.

Figura 19

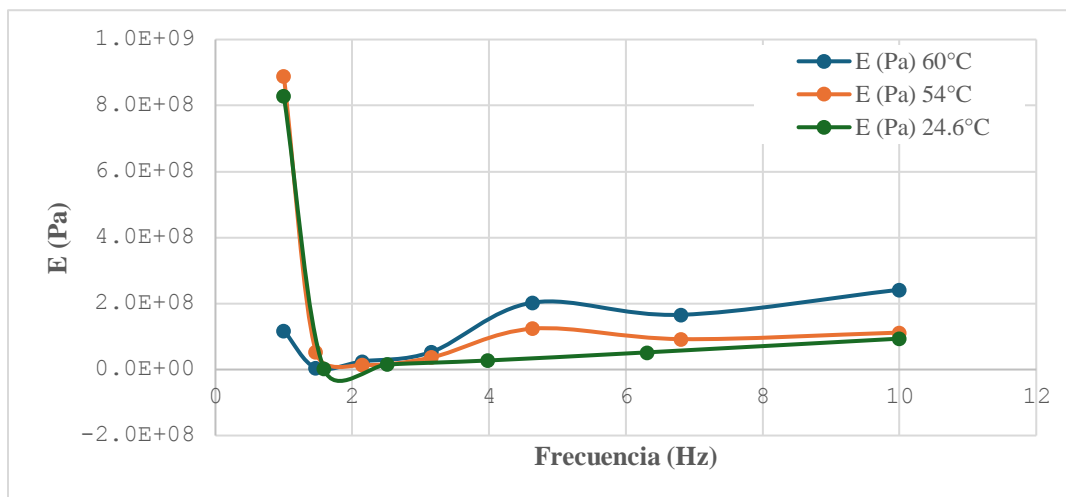
Módulo dinámico vs. frecuencias del espécimen estabilizado con 8% de emulsión asfáltica de la cantera de Samacá a temperatura ambiente, 54 °C y 60 °C.



Nota: El gráfico representa el comportamiento del módulo dinámico vs frecuencias del ensayo realizado para especímenes de la cantera de Samacá estabilizados con 8% de EA.

Figura 20

Módulo dinámico vs. frecuencias del espécimen estabilizado con 8% de emulsión asfáltica de la cantera de Medellín a temperatura ambiente, 54 °C y 60 °C.



Nota: El gráfico representa el comportamiento del módulo dinámico en función de la frecuencia del ensayo realizado para especímenes de la cantera de Medellín estabilizados con 8% de EA.

Al analizar la Figura 19, los resultados de las probetas elaboradas con material de la cantera de Samacá muestran que el módulo dinámico disminuye con el aumento de la temperatura, lo que confirma la sensibilidad térmica del material estabilizado con emulsión asfáltica. Asimismo, se observa que el aumento de la frecuencia de carga incrementa el módulo dinámico, lo cual es coherente con la respuesta viscoelástica esperada para este tipo de materiales bajo condiciones de carga dinámica.

En contraste, al evaluar la Figura 20 correspondiente a las probetas fabricadas con material de la cantera de Medellín, se identifica un comportamiento atípico, dado que el módulo dinámico aumenta con la temperatura, lo cual difiere de la tendencia teórica esperada para materiales estabilizados con emulsión asfáltica. Se corroboró este comportamiento en un total de 50 especímenes, evaluándolos a temperatura ambiente, a 54 °C y a 60 °C, y sometidos a variaciones de frecuencia de 1 a 10 Hz.

Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de realizar un mantenimiento correctivo a los sensores de fuerza y desplazamiento del equipo, así como de profundizar en la revisión y configuración de los ensayos evaluados.

5. Conclusiones

De acuerdo con los objetivos propuestos en el plan de estudios y los resultados obtenidos, se concluye que:

- Se logró mejorar el proceso de compactación y curado de los materiales granulares estabilizados con emulsión asfáltica para la elaboración de probetas con cohesión, estabilidad dimensional y repetibilidad adecuadas a emplear en el ensayo DMA. En general, los resultados no presentan una tendencia definida; se cumplió con los objetivos planteados, pero no existe validación de la respuesta mecánica de los materiales, dado que no fue posible establecer mediciones consistentes.
- En relación con el contenido óptimo teórico de emulsión asfáltica determinado, correspondiente al 5 %, se optó por evaluar contenidos superiores, dado que los especímenes elaborados con dicho contenido presentaron fallas durante la ejecución de los ensayos, al no soportar adecuadamente el nivel de carga mínimo aplicado por el equipo, lo que comprometió la integridad de las probetas.
- Mediante el uso de la máquina Metravib DMA+1000 y el software Dynatest, fue posible ejecutar el ensayo establecido, obteniendo resultados que permitieron analizar el comportamiento de los especímenes elaborados para cada cantera bajo diferentes condiciones de operación y ambientales. De esta manera, se evaluó la influencia del contenido de emulsión asfáltica sobre la respuesta mecánica de las probetas.
- Se establecieron los parámetros mecánicos de ensayo para la caracterización dinámica de los materiales granulares estabilizados mediante el ensayo DMA, definiendo

rangos de frecuencia, desplazamiento, fuerza estática y condiciones de temperatura que permitieron evaluar el comportamiento viscoelástico de las probetas.

- Los resultados obtenidos en los ensayos no coinciden plenamente con el comportamiento teórico esperado, ya que, al evaluar los especímenes a diferentes temperaturas, se evidencian respuestas contrarias a las previstas teóricamente respecto del módulo dinámico.

6. Recomendaciones

De acuerdo con el estudio experimental realizado, se recomienda que, para futuras investigaciones, se realice una calibración rigurosa y un mantenimiento periódico del equipo. En el presente estudio, los resultados no mostraron tendencias consistentes y se evidenció una alta variabilidad al repetir los ensayos, lo que sugiere que el desempeño del equipo pudo influir significativamente en la confiabilidad de las mediciones. La calibración y verificación adecuadas del estado del equipo permitirán mejorar la repetibilidad y la interpretación de los resultados experimentales.

Previo a la ejecución de los ensayos en el equipo DMA, se recomienda realizar un barrido preliminar en un rango amplio de desplazamientos, con el propósito de verificar que la deformación de trabajo seleccionada se encuentre dentro del régimen viscoelástico del material, evitando así la generación de daño en las probetas (e.g., efectos de fatiga).

Con el propósito de garantizar que los especímenes alcancen una temperatura interna uniforme durante los ensayos realizados a temperaturas superiores al ambiente, se recomienda establecer un tiempo de estabilización entre 25 y 30 minutos. Los resultados obtenidos indican que

no es necesario prolongar este periodo hasta una hora, dado que no se observan variaciones significativas en la respuesta del material para tiempos de estabilización mayores.

Por último, durante el proceso de elaboración de las probetas, se recomienda lubricar de manera controlada la superficie interna del molde, evitando excesos, con el propósito de facilitar el desmoldeo de los especímenes y prevenir daños superficiales que puedan afectar su integridad y el desarrollo adecuado de los ensayos

Referencias Bibliográficas

- Bautista, E. Y., & Cabrales, J. D. (2023). Evaluación mecánica de materiales granulares marginales para uso en capas de subbase granular en vías de bajo volumen de tránsito (MGM 1-2-3-4) [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. Escuela de Ingeniería Civil.
- Bennert, T., Maher, A., Gucunski, N., & Papp, W. J., Jr. (2004). Influence of emulsified asphalt stabilization on the performance of reclaimed aggregate base materials. *Transportation Research Record*, 1874(1), 36–43. <https://doi.org/10.3141/1874-05>
- Caro, S., Sánchez, D. B., & Caicedo, B. (2014). Methodology to characterise non-standard asphalt materials using DMA testing: Application to natural asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.893328>
- Castelo Branco, V. T. F. (2009). A unified method for the analysis of nonlinear viscoelasticity and fatigue cracking of asphalt mixtures using the dynamic mechanical analyzer (Doctoral dissertation, Texas A&M University). <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/ETD-TAMU-3136>
- Dynatest Consulting Inc. (s.f.). Dynatest – Stabilized 2:3 [Software]. Dynatest Consulting Inc.
- Garnica Anguas, P., Gómez López, J. A., & Sesma Martínez, J. A. (2002). *Mecánica de materiales para pavimentos* (Publicación Técnica No. 197). Instituto Mexicano del Transporte.
- Instituto Nacional de Vías. (2022). Especificaciones técnicas generales para la construcción de carreteras. INVIAS. <https://www.invias.gov.co/>
- Instructivo para la realización del ensayo de módulo complejo con el equipo DMA METRAVIB+1000. (2021). (Versión 0.1). [Manual/instructivo interno].

- Martínez Álvarez, C. D., & Arroyo Arrieta, Á. J. (2023). Evaluación del comportamiento mecánico de materiales granulares marginales... (MGM 5-6-7-8) [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. Escuela de Ingeniería Civil.
- Menezes Pacheco, L. (2011). *Solos estabilizados com emulsão asfáltica para uso em pavimentação: estudo laboratorial* [Trabajo de grado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul].
- Metravib. (2023). The origin of Metravib DMA comes from... acoustic engineering and the French Navy! <https://www.metravib-materialtesting.com/our-history/>
- Multitest Systems. (2023). Multiloader Automatic Universal Tester – Technical Manual. Multitest Systems.
- Rahman, M. M., Hossain, M. A., & Tarefder, R. A. (2017). Performance evaluation of emulsified asphalt stabilized base course materials using dynamic modulus. *Construction and Building Materials*, 148, 574–583. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.016>
- Rhinoceros. (2025). Rhino 7. <https://www.rhino3d.com/es/7/>
- Villacorta, F., Munera, J., Linares, P., Arrieta, F., Moya, J., Loria, L., & Moya, J. (2013). Metodología de diseño en laboratorio para materiales granulares estabilizados con emulsión asfáltica. En *Memorias del XVIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto (CILA)*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), San Pedro de Montes de Oca.
- Xiao, F., Yao, S., Wang, J., & Li, X. (2018). A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 180, 579–604. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.039>

Apéndices

APENDICE A. APÉNDICEAPÉNDICE PROTOCOLO PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO DE ANÁLISIS MECÁNICO DINÁMICO DMA DE COMPRESIÓN SIMPLE MEDIANTE EL EQUIPO METRAVIB+1000

Elaborado por: Jordan Andres Monroy Hernandez y Jhon Carlos Hernandez Florez

El presente documento es una guía básica para el desarrollo óptimo del ensayo de DMA de compresión simple mediante el equipo Metravib MDA+1000. A continuación, se muestra el paso a paso para el desarrollo del ensayo DMA.

Se debe abrir la válvula de presión y verificar que quede paralela a la manguera de aire, como se muestra en la Figura 21.

Figura 21

Posición de la válvula abierta.



Nota: Esta figura representa la válvula abierta.

Poner el switch rojo en posición ON como se muestra en la Figura 22. Posteriormente, se debe verificar que los breakers internos estén hacia arriba, como se muestra en la Figura 24.

Figura 22

Posición de encendido y de breakers en posición correcta.



Nota: Elaboración propia.

Encender el tablero lateral, oprimiendo el botón de encendido ubicado en la parte inferior derecha, como se muestra en la Figura 23. Al encender el equipo, aparecerá en el panel visual del equipo el número 2.3, el cual hace referencia a la versión del firmware ecot y posteriormente a la temperatura de la recámara.

Figura 23

Botón de encendido de la máquina.

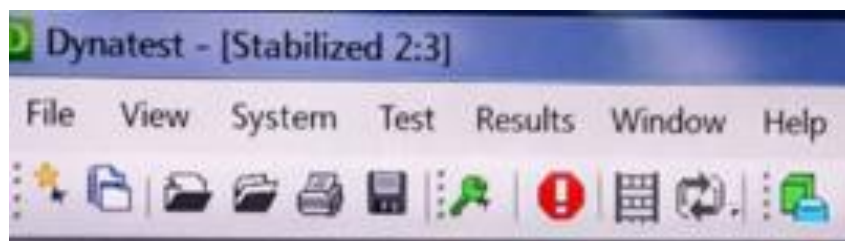


Nota: Elaboración propia.

Ingresa al software Dynatest donde se llevará a cabo el ensayo. Ingresa en “File” (Figura 24) y selecciona la opción “New Project”. Posteriormente, selecciona la opción “Stabilized”, donde se realizará el ensayo (Figura 25)

Figura 24

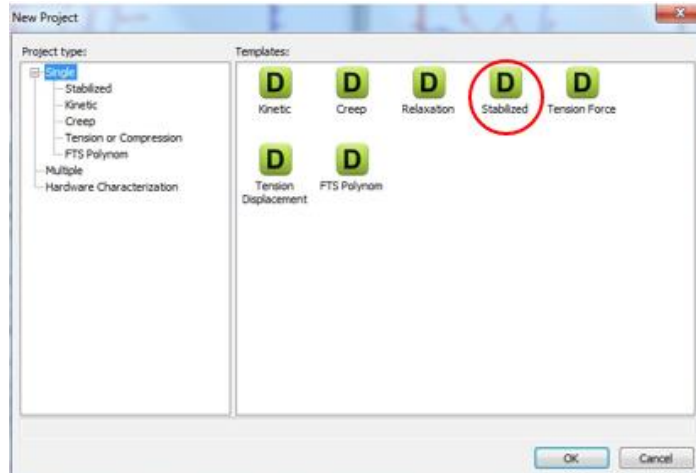
Barra de menú y herramientas.



Nota: Elaboración propia.

Figura 25

Ingresar a Stabilized.

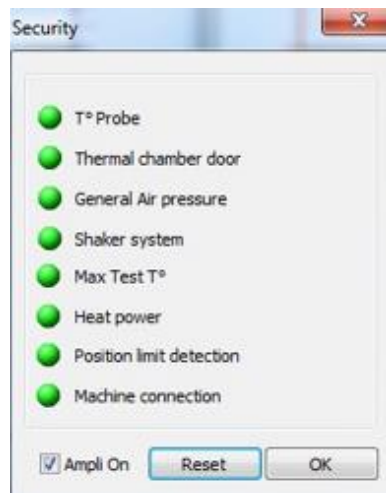


Nota: Elaboración propia.

Ingresar al software; se debe verificar, por medio del icono rojo ubicado en la barra de herramientas (Figura 24), que todos los parámetros de la máquina estén en verde y chulear “Ampli On” para activar el amplificador de presión de aire y, posteriormente, dar OK. (Figura 26).

Figura 26

Menú de seguridad.

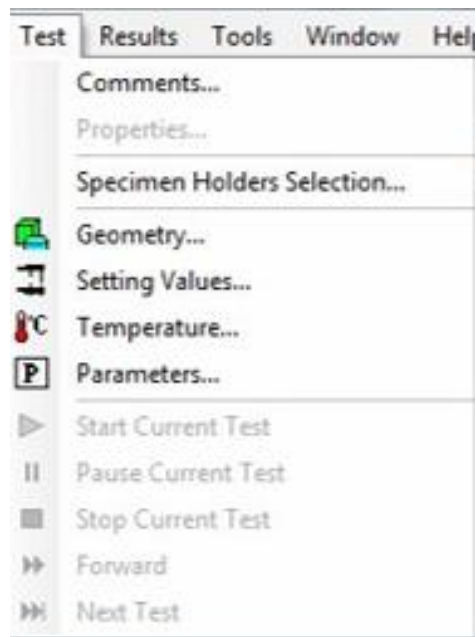


Nota: Elaboración propia.

Para realizar el ensayo, se deben definir parámetros como la geometría, el desplazamiento dinámico, las frecuencias, la fuerza aplicada y la temperatura; para ello, se debe ir a la pestaña “Test” (Figura 27).

Figura 27

Definir parámetros.

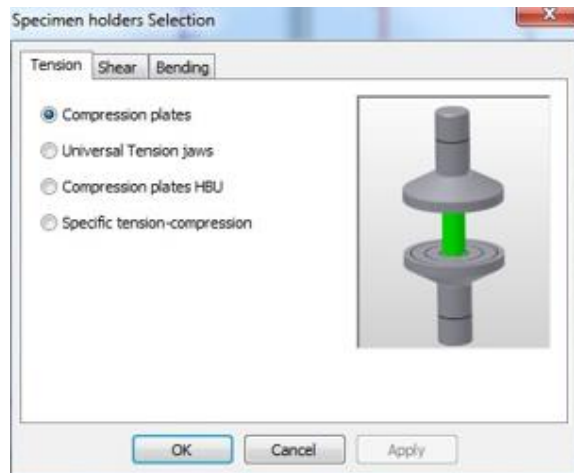


Nota: Elaboración propia.

Una vez en “test”, primero se debe ingresar a la opción “Specimen Holders Selection” y seleccionar “Compression plates”. (Figura 28)

Figura 28

Seleccionar “compression plates”.



Nota: Elaboración propia.

Luego, se debe ingresar en la opción “Geometry”, donde se va a nombrar el espécimen según su nomenclatura correspondiente e introducir las dimensiones de la probeta a ensayar. La masa de los platos no se modificará, 0.076 kg y 0.076 kg. (Figura 29).

Figura 29

Nombrar y dimensionar el espécimen.

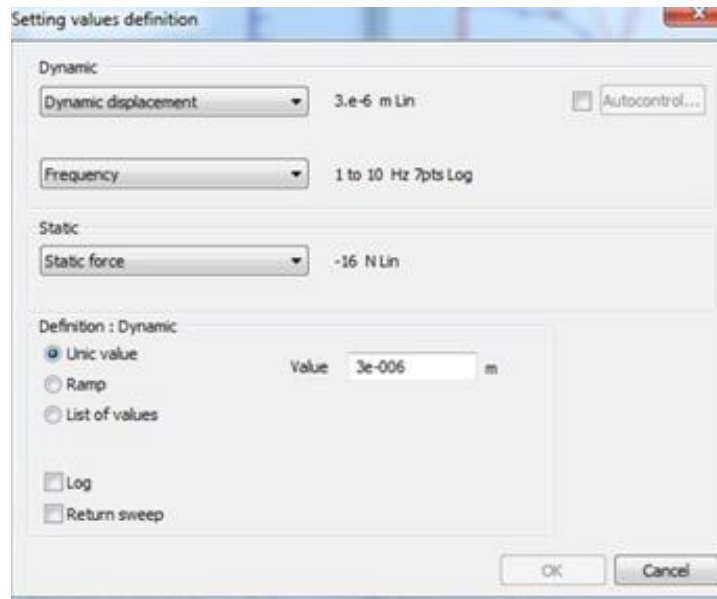


Nota: Elaboración propia.

Se debe ingresar en la opción “Setting values definition”, donde se ingresarán los parámetros para realizar el ensayo, como el desplazamiento dinámico, las frecuencias y la fuerza estática aplicada. Se definirá el primer parámetro en “Dynamic” donde se desplegará una serie de opciones, en la cual se seleccionará “Dynamic displacement” y posteriormente dirigirse a “Definition: Dynamic” y escoger la opción “Unic value” donde se introducirá el desplazamiento dinámico (Figura 30).

Figura 30

Parámetro de desplazamiento dinámico del ensayo.

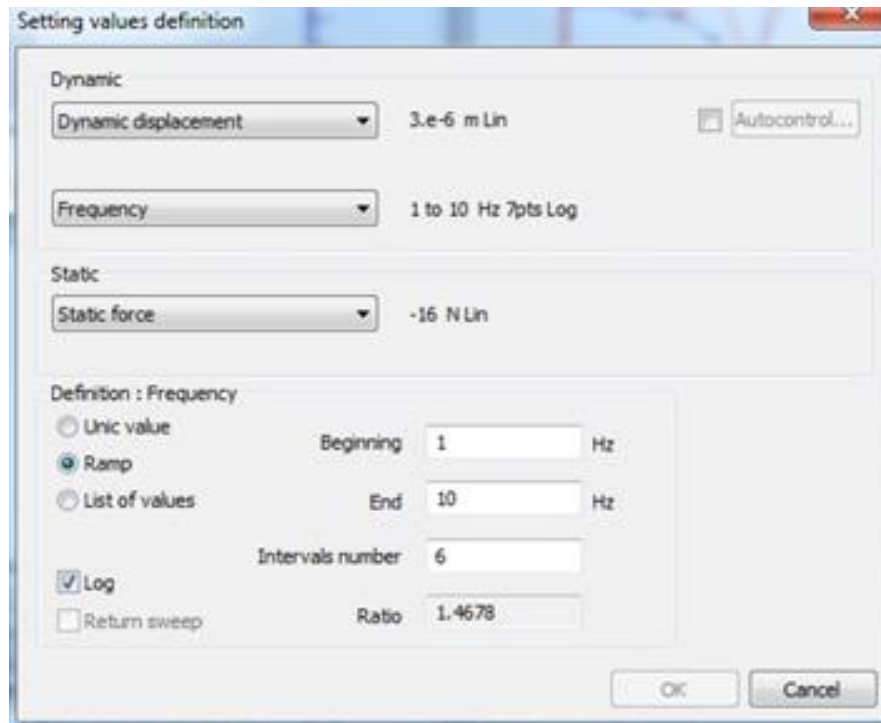


Nota: Elaboración propia.

Luego, se definen las frecuencias con las que se realizará el ensayo. Para esto, se irá a la opción de “Frequency” y, posteriormente, a “Definition: Dynamic”, donde se seleccionará la opción “Ramp” y se ingresará el rango requerido de frecuencias a las que se realizará el ensayo y la cantidad de intervalos (Figura 31).

Figura 31

Parámetros de frecuencia del ensayo.

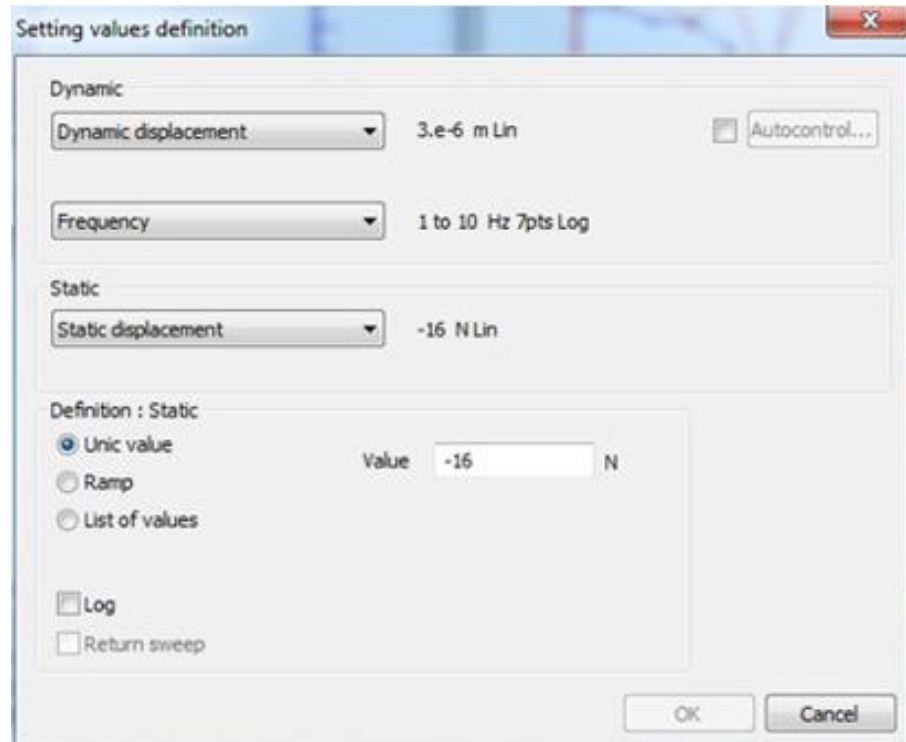


Nota: Elaboración propia.

Posteriormente, se define la carga aplicada al ensayo. Para esto, se debe ir a “Static”, desplegar las opciones correspondientes y seleccionar “Static forcé”; posteriormente, dirigirse a “Definition: Dynamic” y escoger la opción “Unic value”, donde se introducirá el valor de la fuerza estática (Figura 32).

Figura 32

Parámetro de la fuerza estática aplicada al ensayo.

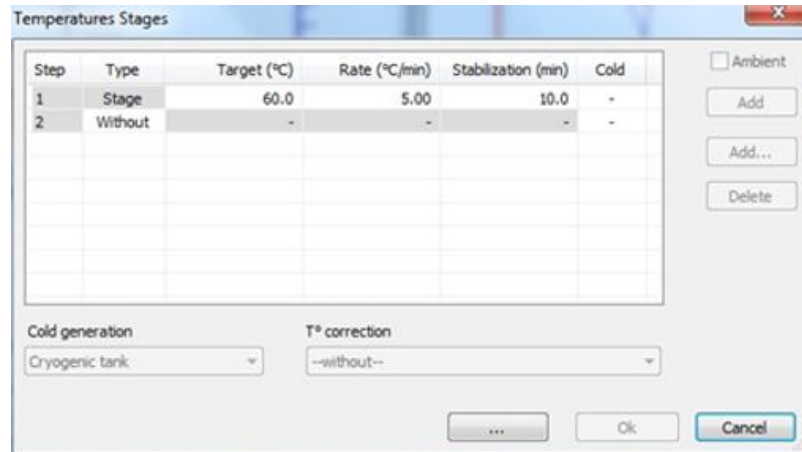


Nota: Elaboración propia.

Ahora, se debe ingresar en la opción “Temperatures Stages”, donde se definirá la temperatura a la que se realizará el ensayo. Para hacer el ensayo a temperatura ambiente, hay que chulear la opción “Ambient” en la parte superior derecha y dar Ok. Para hacer el ensayo a temperaturas superiores a la temperatura ambiente, se deben diligenciar los siguientes datos: primero, la temperatura a la que se va a realizar el ensayo; este dato se pondrá en la columna llamada “Target (°C)”. Segundo, la tasa de cambio de temperatura por minuto, este dato se pondrá debajo de “Rate”. Y, tercero, el tiempo de estabilización de la cámara, en minutos; este dato se pondrá debajo de “Stabilization” (Figura 33).

Figura 33

Parámetro de temperatura del ensayo.

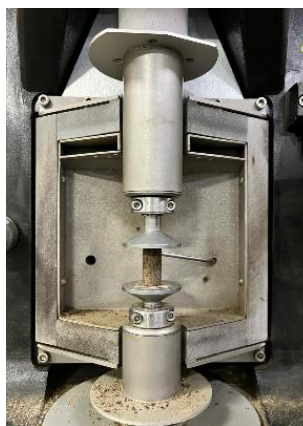


Nota: Elaboración propia.

Una vez que se cuenta con los parámetros necesarios en el software para realizar el ensayo, se debe ubicar la muestra entre los platos de la máquina (Figura 34) y ajustarla con los botones de subir y bajar ubicados en el tablero de control (Figura 35).

Figura 34

Ubicación de la probeta en la máquina.



Nota: Elaboración propia.

Figura 35

Botones de ajuste de la máquina.

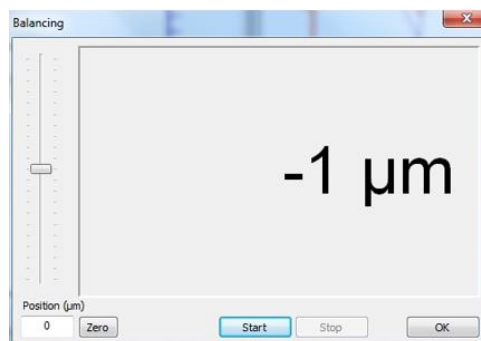


Nota: elaboración propia.

Se debe dirigir a la opción “Weight Balancing” dar clic en “zero” y “Start”. Se espera hasta que se estabilice, y con los botones del tablero ajustar la muestra con los platos de la máquina, verificando que se encuentre en un rango menor a $|30|$ micrómetros. Y Ok (Figura 36).

Figura 36

Estabilización de las probetas en los platos.



Nota: elaboración propia.

Si se va a realizar el ensayo a temperatura ambiente, no es necesario cerrar la cámara; por el contrario, si se requiere realizar el ensayo a temperaturas diferentes al ambiente, se debe cerrar la cámara para mantener la temperatura objetivo (Figura 37).

Figura 37

Cámara de la máquina.



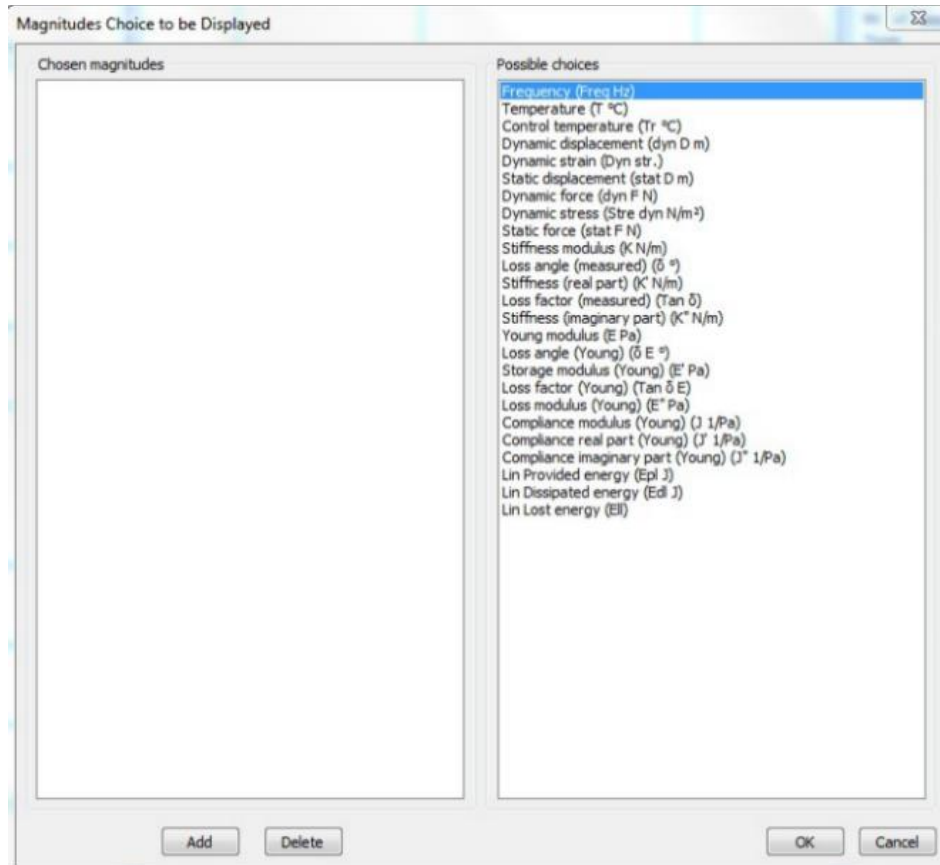
Nota: elaboración propia.

Por último, se debe hacer clic en “Start current test ▶”, ubicado en la barra de herramientas, para iniciar el ensayo.

Para obtener los resultados del ensayo mediante tablas, se debe dirigir a la opción “Results” ubicada en la barra de menú (Figura 24) y hacer clic en “Text”. Luego de dar clic en “text”, se abrirá la ventana mostrada en la Figura 38, donde se deben seleccionar los resultados que se requieran, dar clic en “Add” y “Ok”.

Figura 38

Resultados requeridos del ensayo.

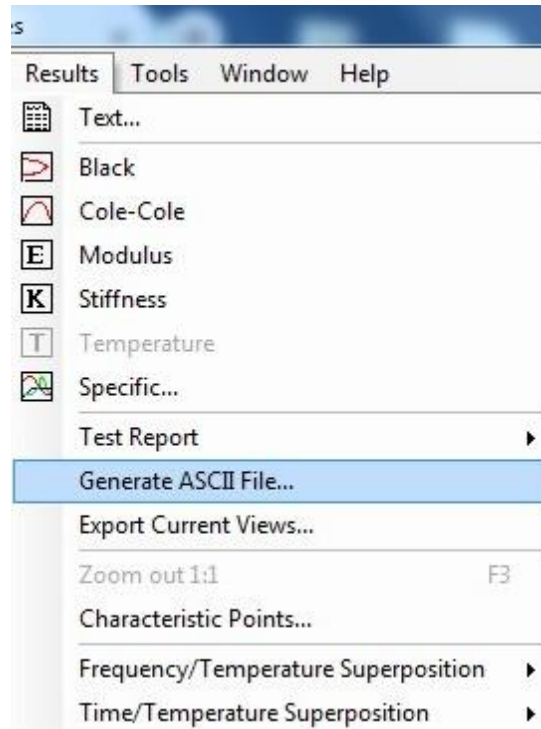


Nota: elaboración propia.


Para guardar los resultados del ensayo, se debe dirigir a la opción “Results” ubicada en la barra de menú (Figura 24) y, posteriormente, hacer clic en “Generate ASCII File”. (Figura 39) para generar un archivo “.CSV” que es como se guardan los resultados del ensayo.

Figura 39

Guardar resultados del ensayo.



Nota: elaboración propia.

Para apagar la máquina, se debe hacer lo siguiente: primero, se debe dar clic en el icono rojo de seguridad, desm  la opción “Ampli On” (Figura 26), hacer clic en Ok y cerrar el programa.

Mantener oprimido el botón de apagado del tablero de la máquina hasta que la máquina se apague (Figura 40).

Y poner el switch rojo en posición horizontal apuntando hacia Off (Figura 41).

Figura 40

Botón de apagado de la máquina.



Nota: elaboración propia.

Figura 41

Switch en posición off.



Nota: elaboración propia.

**APENDICE B. APÉNDICEAPÉNDICEAPÉNDICEAPÉNDICEAPÉNDICEP
ROTOCOLO DE COMPACTACIÓN DE PROBETAS 1.2X2.4 (CM) POR
MEDIO DE LA MÁQUINA CONTROLS MULTILOADER**

Elaborado por: Jordan Andres Monroy Hernandez y Jhon Carlos Hernandez Florez

El presente documento es una guía básica para la elaboración y compactación de probetas de dimensiones 1.2 x 2.4 cm mediante la máquina Controls Multiloader. A continuación, se muestra el paso a paso a seguir.

1. Elaboración de probetas de ensayo PETIT

Una vez recolectado y tamizado el material proveniente de las canteras de Medellín y Sácama, se procedió a seleccionar y ajustar la granulometría a emplear en la presente investigación, siguiendo la propuesta granulométrica planteada por Silvia Caro (Caro et al., 2014) La dosificación definida se ilustra en la Figura 42 y se detalla en la Tabla 4.

El material fue separado según su tamaño de partícula mediante tamizadoras industriales de pequeña escala, disponibles en el Laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad Industrial de Santander. A partir de este proceso se obtuvieron las fracciones correspondientes a finos y arenas, que posteriormente se utilizaron para la preparación de las mezclas y la elaboración de los especímenes de ensayo.

Figura 42

Dosificaciones para los especímenes.



Nota: Elaboración propia.

Tabla 4.

Dosificación para tres especímenes de ensayo.

		Silvia caro		Peso Suelo
Fuente	Tamiz	%Retenido	%Retenido	6.902
	N40		40%	2.761
Arenas	N80	80%	23%	1.587
	N200		17%	1.173
FONDO	P200	20%	20%	1.380
Peso total				6.902 [g]

Nota: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la cantidad de especímenes que se debían elaborar para cada una de las canteras evaluadas (Medellín y Sácama), se tomó una porción de los materiales previamente clasificados por tamaño de partícula y se llevó a un horno de secado por un tiempo mínimo de 24 horas, con el fin de eliminar la humedad presente antes de la preparación de los especímenes.

Posteriormente, para preparar el material granular necesario para cada espécimen de ensayo, se pesó la cantidad correspondiente de cada fracción granulométrica, la cual ya se encontraba seca. Estas fracciones se tomaron de acuerdo con la dosificación granulométrica

propuesta por Silvia Caro. Finalmente, el material se mezcló manualmente, asegurando que quedara bien distribuido y con una granulometría homogénea, antes de continuar con la elaboración de los especímenes.

2. Determinación de masas del material, contenido de agua, y contenido de emulsión

Para determinar las masas de cada componente del material estabilizado, inicialmente se prepararon varios recipientes, los cuales se utilizaron para separar la cantidad de material necesaria para la elaboración de cada probeta de 1.2×2.4 cm. El propósito de estos recipientes fue facilitar la organización del material y asegurar que cada probeta contara con la dosificación adecuada.

Se dispuso de al menos un recipiente por cada método de curado, es decir, tres recipientes por cada contenido de emulsión evaluado, con el fin de preparar correctamente los especímenes. Cada recipiente fue pesado con balanzas de precisión, con una exactitud mínima de 0,01 g, garantizando así una cuantificación adecuada del material empleado en la elaboración de las probetas.

Figura 43

Recipientes.



Nota: Elaboración propia.

3. Obtención de la parte líquida del material estabilizado (emulsión asfáltica y agua)

Con el objetivo de facilitar la absorción del agua y de la emulsión asfáltica durante el proceso de mezclado, inicialmente se combinaron las cantidades correspondientes de agua y emulsión en una taza plástica de tamaño específico, como se muestra en la Figura 44. La mezcla se realizó manualmente hasta obtener una masa homogénea, asegurando una distribución uniforme de ambos componentes antes de incorporarlos al material granular.

Figura 44

Mezcla de agua y emulsión asfáltica.



Nota: Elaboración propia.

4. Proceso de mezclado de todos los materiales

Para obtener el material estabilizado final correspondiente a los materiales granulares marginales de las canteras de Medellín y Sácama, se utilizó una taza plástica de tamaño adecuado, lo que permitió realizar el mezclado sin que se produjeran pérdidas de material. Primero, se colocó el material granular en la taza y, con ayuda de una cuchara de cocina o una espátula mediana, se hizo un orificio en el centro, una práctica común para facilitar la incorporación del ligante.

Luego, en este orificio se agregó la mezcla previamente preparada de agua y de emulsión asfáltica comercial. El mezclado se realizó manualmente, presionando el material con la parte posterior de la cuchara hasta lograr que la emulsión se distribuyera de manera uniforme. Este proceso se continuó hasta obtener una mezcla homogénea, lo cual se identificó visualmente por la uniformidad del color del material.

Finalmente, una vez alcanzada esta condición, el material estabilizado se volvió a colocar en los recipientes correspondientes, de acuerdo con la dosificación definida para cada probeta de 1.2×2.4 cm, tal como se muestra en la Figura 45.

Figura 45

Material estabilizado MGM con 8% de emulsión asfáltica.



Nota: Elaboración propia.

5. Observación del tiempo de rotura de la emulsión asfáltica.

Una vez terminado el proceso de mezclado, el material estabilizado se dejó en reposo durante un tiempo determinado, con el fin de permitir que el contenido de humedad disminuyera

y evidenciarse la rotura de la emulsión asfáltica. En este caso, el tiempo de reposo dependió directamente del porcentaje de emulsión presente en la mezcla, ya que, a mayor contenido de emulsión, fue necesario un mayor tiempo para que el material alcanzara un estado más estable.

De acuerdo con las observaciones realizadas durante el trabajo experimental, se consideraron tiempos de reposo aproximados para cada contenido de la emulsión. Para las mezclas con 6 % de emulsión, el tiempo de reposo estuvo entre 12 y 18 minutos; para 7 %, entre 13 y 20 minutos; para 8 %, entre 13 y 22 minutos; y para 10 %, entre 15 y 25 minutos. Estos tiempos permitieron que la mezcla perdiera aproximadamente un 1 % de su peso total, lo que favoreció que la emulsión comenzara a romperse y el material adquiriera una textura más uniforme y estable antes de continuar con el proceso de elaboración de las probetas.

6. Preparación del molde (armado y aplicación de desmoldante)

- i) Una vez que el material estabilizado estuvo listo, se procedió a armar el molde, tal siguiendo una serie de pasos para asegurar su correcta preparación. En primer lugar, se unieron las dos caras laterales del molde y, posteriormente, se colocaron sobre la base correspondiente.
- ii) Luego, todas las partes del molde se aseguraron mediante las dos piezas laterales, haciendo coincidir correctamente las ranuras del molde para garantizar su estabilidad. Una vez alineadas todas las piezas, se procedió a colocar los tornillos con sus respectivas arandelas y tuercas, ajustándolos de manera gradual y uniforme, para evitar que el molde se desplazara o se deformara debido a la fuerza ejercida durante el apriete.
- iii) Luego, todas las partes del molde se aseguraron mediante las dos piezas laterales, haciendo coincidir correctamente las ranuras del molde para garantizar su estabilidad. Una vez alineadas todas las piezas, se procedió a colocar los tornillos con sus

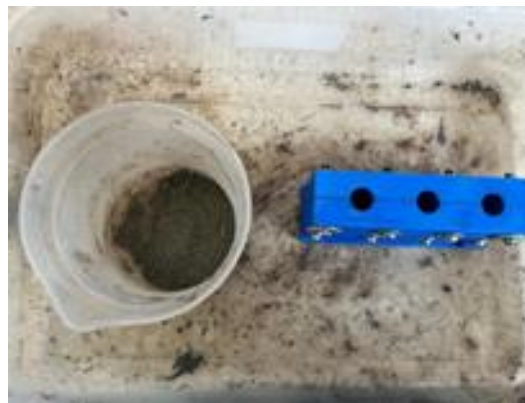
respectivas arandelas y tuercas, ajustándolos de manera gradual y uniforme, para evitar que el molde se desplazara o se deformara debido a la fuerza ejercida durante el apriete.

7. Colocación del material en el molde

Una vez acondicionados tanto el molde como el material estabilizado, incluido el aceite del molde y del émbolo (Figura 46), se procedió a introducir el material en el molde. Este proceso se realizó de manera cuidadosa, utilizando un embudo, con el fin de evitar pérdidas de material y reducir la posibilidad de formar vacíos que pudieran afectar el desempeño final de la probeta.

Figura 46

Molde negro (6 cm de alto por 15 cm de largo), elaborado por impresión 3D. con material estabilizado



Nota: Elaboración propia.

8. Compactación en la prensa hidráulica (Multiloader)

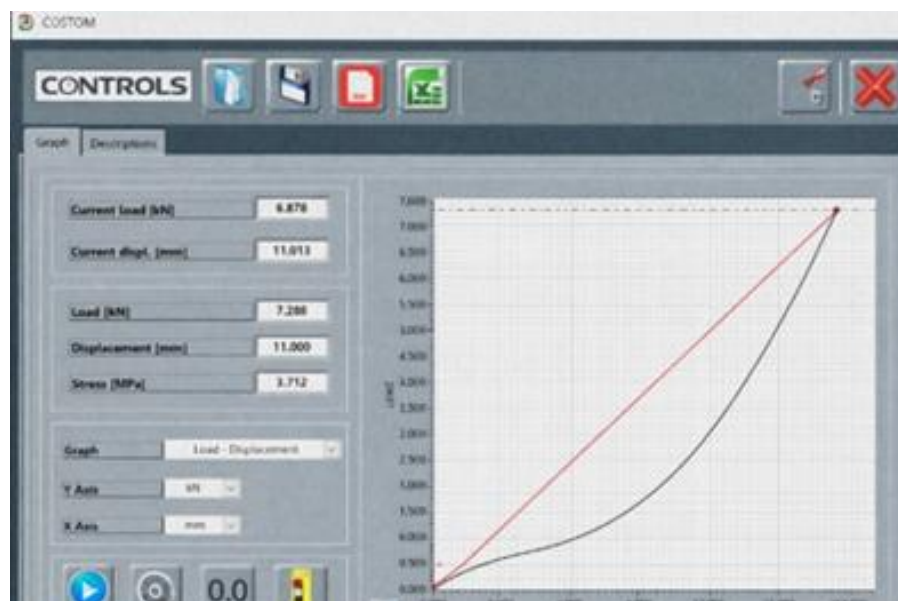
Después de realizar la precompactación manual del material con el émbolo, se llevó a cabo la compactación en la prensa hidráulica, controlando la deformación directamente desde el

software del equipo Multiloader Automatic Universal Tester . Este sistema permitió realizar un seguimiento en tiempo real del desplazamiento y de la carga aplicada durante todo el proceso, como se observa en la Figura 47.

Con la información que se iba mostrando en la pantalla del equipo, fue posible definir y alcanzar la deformación requerida, asegurando que la probeta alcanzara la altura final deseada. De esta manera, se logró un mejor control del proceso de compactación, evitando errores de sobrecompactación y garantizando condiciones similares para todos los especímenes ensayados.

Figura 47

Gráfica del software multiloader (control de deformación).



Nota: Elaboración propia.

Figura 48

Molde y émbolo durante el proceso de compactación.



Nota: Elaboración propia.

9. Desmolde de las probetas

Para realizar el desmolde y obtener las probetas en buen estado, se siguieron los siguientes pasos:

- i) En primer lugar, se aflojaron los tornillos del molde.
- ii) Posteriormente, se retiraron las dos piezas laterales que sostienen la base del molde y se extrajo la base del molde.
- iii) Luego, se ubicaron los émbolos de desmolde en las ranuras del molde.
- iv) Finalmente, se dio la vuelta al molde y, utilizando los mismos émbolos, se aplicó una presión controlada, lo que permitió que las probetas salieran de manera uniforme y sin daños.

10. Curado de las probetas

Una vez finalizado el proceso de compactación y desmolde, se procedió al curado de las probetas. Dado que el molde empleado permite obtener simultáneamente tres especímenes de

ensayo, se decidió someter cada probeta al mismo tipo de curado para garantizar condiciones uniformes durante esta etapa del procedimiento, como se observa en la Figura 9.

El proceso de curado se realizó en dos etapas. En una primera fase, las probetas se dejaron al aire libre durante 24 horas, lo que permitió la evaporación inicial de la humedad presente en el material. Posteriormente, las probetas fueron trasladadas a un horno a una temperatura constante de 40 °C, donde permanecieron durante 24 horas adicionales, hasta completar el proceso de curado.

Este procedimiento permitió obtener probetas con un estado de humedad más estable, adecuadas para los ensayos posteriores y coherentes con la metodología adoptada en esta investigación.