

Evaluación de la Influencia de la Temperatura en la Rigidez de Materiales Granulares Ligados
con Ligantes Obtenidos de la Modificación de Residuos Aceitosos

Cristheand Leonardo Roa Bueno

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Eduardo Alberto Castañeda Pinzón

Doctor en Ingeniería Civil

Codirector

María Cristina Rivero Olarte

Magíster en Ingeniería Civil Pavimentos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Este trabajo es el fruto de años de dedicación y esfuerzo en mi camino universitario. Cada desafío enfrentado, cada aprendizaje y cada logro me han traído hasta este momento, donde puedo mirar atrás con profundo orgullo y gratitud. Agradezco a Dios, por darme la fortaleza y la guía en cada paso de este camino. A mi madre, Beatriz Bueno, por su amor incondicional y su apoyo constante, y a mi padre, Álvaro Roa, por su duro trabajo, sabiduría y consejos que siempre me han motivado a seguir adelante. A mis hermanos, por su respaldo inquebrantable y por ser una fuente de aliento en cada etapa, apoyándome sin reservas. A toda mi familia y amigos, por su paciencia y comprensión durante este proceso, por entender cada sacrificio y por esperar conmigo este momento. Con emoción y gratitud, celebro este logro que me acerca a mi sueño de ser ingeniero civil.

Agradecimientos

Expreso mi profundo agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander (UIS) por el espacio académico, recursos y apoyo brindados para esta investigación. Un especial reconocimiento a Ecopetrol S.A. por su respaldo técnico y suministro de materiales, esenciales para el éxito del proyecto.

Deseo extender un sincero agradecimiento a mi director de proyecto, Eduardo Alberto Castañeda Pinzón, por su excepcional guía, paciencia y orientación durante cada etapa del trabajo. Sus conocimientos y su dedicación fueron un faro de apoyo en los momentos más desafiantes.

A mi codirector María Cristina Rivero Olarte, gracias por sus consejos valiosos y su incansable compromiso, que aportaron profundidad y precisión a este estudio. Sus aportes fueron invaluable para perfeccionar el enfoque y las metodologías empleadas.

A mi familia, gracias por su amor incondicional y su constante ánimo. Su apoyo emocional y su fe en mí me dieron la fuerza necesaria para perseverar durante los momentos más difíciles. Y a mis amigos, que con sus palabras de aliento y momentos de distracción supieron recordarme la importancia del balance y la resiliencia.

Tabla de contenido

Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1. Objetivo General	15
1.2. Objetivos Específicos	15
2. Marco referencial	16
2.1. Sensibilidad a la temperatura de materiales asfálticos	16
2.2. Base estabilizada	18
2.3. Módulo resiliente	19
2.4. Ensayo de módulo resiliente	19
2.5. Curva de deformación de carga repetida	19
3. Metodología	20
3.1. Materiales	21
3.1.1. Material bituminoso a partir de lodos aceitosos (MBL)	21
3.1.2. Material Convencional (EA)	22
3.1.3. Material Pétreo	23
3.2. Dosificación de la mezcla	24

3.3.	Fabricación de especímenes de prueba	25
3.3.1.	Proceso de mezclado de las probetas	26
3.3.2.	Proceso de compactación de las probetas	27
3.3.3.	Proceso de curado de las probetas.....	27
3.3.4.	Acondicionamiento húmedo de probetas	28
3.3.5.	Evaluación de la influencia de la temperatura	28
3.3.6.	Parámetros del ensayo triaxial.....	29
4.	Resultados de la evaluación	30
4.1.	Módulo resiliente evaluado tras el curado seco	30
4.1.1.	Módulo resiliente del suelo estabilizado con ligante de referencia.....	31
4.1.2.	Módulo resiliente del suelo estabilizado con GOR.....	32
4.1.3.	Módulo resiliente del suelo estabilizado con GRB	33
4.1.4.	Módulo Resiliente del suelo estabilizado con GDH	34
4.1.5.	Indicador de la sensibilidad térmica de los ligantes MBL acondicionados en seco	36
4.1.6.	Desempeño de la rigidez de materiales estabilizados con residuos con un material de referencia acondicionados en seco.....	37
4.2.	Módulo resiliente evaluado tras el acondicionamiento húmedo.....	38
4.2.1.	Módulo resiliente del suelo ligado con EA	39
4.2.2.	Módulo resiliente del suelo ligado con GOR.....	40
4.2.3.	Módulo resiliente del suelo ligado con GRB	41

4.2.4. Módulo resiliente del suelo ligado con GDH.....	42
4.2.5. Indicador de la sensibilidad térmica de los ligantes MBL acondicionados en húmedo.	43
5. Actividades de apoyo.....	44
6. Conclusiones.....	47
Referencias bibliográficas.....	50

Lista de figuras

Figura 1 Nomograma del índice de penetración.....	17
Figura 2 Deformación bajo un ensayo de carga repetida.....	20
Figura 3. Metodología evaluación de la influencia de temperatura.....	20
Figura 4 Granulometría del suelo empleado para fabricar las probetas.....	24
Figura 5 Montaje de probeta en la cámara triaxial	29
Figura 6. Módulo resiliente del suelo no estabilizado en condición seca.....	30
Figura 7 Módulo resiliente del suelo ligado con EA en condición seca.	31
Figura 8 Módulo resiliente del suelo ligado con GOR en condiciones de curado seco.....	32
Figura 9 Magnitudes de los módulos resilientes GOR vs EA.	33
Figura 10 Módulo resiliente del suelo ligado con GRB en condiciones de curado seco.....	33
Figura 11 Magnitudes de los módulos resilientes GRB vs EA.....	34
Figura 12 Módulo resiliente del suelo ligado con GDH en condiciones de curado seco.	35
Figura 13 Magnitudes de los módulos resilientes GDH vs EA.	35
Figura 14 Variación del módulo resiliente variando la temperatura.....	36
Figura 15 Módulo resiliente del suelo no estabilizado	38
Figura 16 Módulo resiliente del suelo ligado con EA	39
Figura 17 Módulo resiliente del suelo estabilizado con GOR en condiciones de humedad.....	40
Figura 18 Magnitudes de los módulos resilientes GOR vs EA.	40
Figura 19Módulo resiliente en condiciones húmedas del suelo estabilizado con GRB	41

Figura 20 Magnitudes de los módulos resilientes GRB vs EA.....	42
Figura 21 Módulo resiliente en condiciones húmedas del suelo estabilizado con GDH.....	42
Figura 22 Magnitudes de los módulos resiliente GDH vs EA.....	43
Figura 23 Proceso de curado de las probetas 2x4cm en cama de arena.	45

Lista de tablas

Tabla 1. Agente estabilizante MBL	21
Tabla 2. Caracterización Emulsión Asfáltica.....	22
Tabla 3. Caracterización del material pétreo	23
Tabla 4 Dosificación de mezclas	25
Tabla 5 Sensibilidad térmica de los ligantes bituminosos en condición seca.....	37
Tabla 6 Variación del módulo resiliente de los MBL respecto a la EA	37
Tabla 7 Sensibilidad térmica de los ligantes bituminosos en condición húmeda	43
Tabla 8 Variación del módulo resiliente de los MBL respecto a la EA.	44
Tabla 9 Desempeño del módulo complejo para mezclas ligadas con MBL.	46

Lista de Apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional

Apéndice A. Análisis graficas probetas 7x14

Apéndice B. Evaluación del módulo complejo

Resumen

Título: Evaluación de la influencia de la temperatura en la rigidez de materiales granulares ligados con ligantes obtenidos de la modificación de residuos aceitosos*

Autor: Cristheand Leonardo Roa Bueno**

Palabras clave: Módulo resiliente, residuos aceitosos, ligantes bituminosos, temperatura, rigidez.

Descripción:

En este artículo se evalúa la sensibilidad térmica de mezclas de suelo estabilizadas con residuos aceitosos obtenidos de los procesos de producción y refinación del petróleo, a partir de determinar la influencia de la variación de la temperatura en la rigidez del material compuesto. Se definió un índice de sensibilidad térmica teniendo en cuenta el desempeño mecánico en función del módulo resiliente medido a temperatura de 23°C y 45°C mediante la ejecución del ensayo triaxial dinámico descrito en la norma INV-E-156- 22. Los especímenes se ensayaron tras un curado en seco para evaluar su sensibilidad en condiciones de baja humedad, posteriormente se incrementó el contenido de humedad del espécimen y se repitió el ensayo para determinar la sensibilidad térmica en condiciones de alta y baja humedad. Los valores obtenidos con el material de referencia (emulsión asfáltica, CRL-1) sometido a la misma evaluación para el cual se determinó en condición seca una sensibilidad de 14% y para el suelo estabilizado con MBL entre -7 a 23%. En suelos estabilizados altamente sensibles a la temperatura el índice toma valores cercanos a 100%. Para los materiales estabilizados posterior al acondicionamiento en húmedo, el índice de sensibilidad térmica fue de 16% para el material de referencia, y para los materiales con residuos aceitosos osciló entre -3 a 44%. Se concluyó que estos ligantes obtenidos de los residuos aceitosos presentan un comportamiento semejante al material de referencia y pueden ser considerados como una alternativa para incrementar la rigidez de bases en vías con bajos niveles de tránsito.¹

¹ *Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Eduardo Alberto Castañeda Pinzón, PhD. Codirector María Cristina Rivero Olarte, M. Sc.

Abstract

Title: Evaluation of the influence of temperature on the stiffness of granular materials bound with binders obtained from oily waste modification*

Author: Cristheand Leonardo Roa Bueno**

Key words: Resilient modulus, oily residues, bituminous binders, temperature, stiffness.

Description:

This study evaluates the thermal sensitivity of soil mixtures stabilized with oily residues from petroleum production and refining processes, by analyzing the effect of temperature variation on the stiffness of the composite material. A thermal sensitivity index was established based on the resilient modulus measured at 23°C and 45°C using the dynamic triaxial test (INV-E-156-22). Specimens were tested under dry curing conditions to assess sensitivity in low-moisture environments, followed by tests with increased moisture content to evaluate thermal sensitivity under both high and low moisture conditions. The reference material (asphalt emulsion CRL-1) exhibited a thermal sensitivity of 14% under dry conditions, while soil stabilized with oily residues showed values ranging from -7% to 23%. For highly temperature-sensitive soils, the index approached 100%. After wet conditioning, the thermal sensitivity index was 16% for the reference material and ranged from -3% to 44% for the oily residue-stabilized materials. These results indicate that binders derived from oily residues demonstrate performance comparable to the reference material, suggesting their potential as an alternative for enhancing the stiffness of base layers in low-traffic roads.²

² *Bachelor Thesis

**Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director Eduardo Alberto Castañeda Pinzón, PhD. Co-director María Cristina Rivero Olarte, M. Sc.

Introducción

El proyecto de investigación, enmarcado en el convenio 3023616 establecido entre la UIS y Ecopetrol S.A., abordó la problemática de la gestión de los residuos aceitosos en la industria del petróleo y la pertinencia para obtener un material bituminoso a partir del residuo con propiedades físicas y mecánicas para el mejoramiento de suelos granulares utilizados como capa de rodamiento de vías de bajo volumen de tránsito. El objetivo principal fue evaluar el ligante denominado como MBL (Material Bituminoso a partir de Lodos aceitosos) como un agente estabilizante al conferir a la matriz granular características de impermeabilización y cohesión que aumentan la respuesta mecánica al aplicar esfuerzos. Esta iniciativa contribuye de modo significativo al mantenimiento y mejoramiento de vías de bajo tráfico aportando a la economía y confort de las regiones rurales y a las áreas circundantes a los complejos industriales de extracción, producción y refinación del crudo. De igual manera, establece alternativas técnicas innovadoras encaminadas al mejoramiento continuo de las operaciones petroleras en el marco de la economía circular permitiendo la transformación de desechos en materias primas rentables que reduzcan el impacto ambiental.

Para determinar la factibilidad técnica de la utilización del ligante MBL en la estabilización de suelos granulares fue de interés definir el comportamiento mecánico del material compuesto frente a la influencia de la temperatura en la rigidez. La evaluación del comportamiento de estos materiales es fundamental para su adopción efectiva en aplicaciones reales y su contribución a la sostenibilidad en el sector de la construcción además de la contribución a la cadena de valor que busca convertir los residuos en activos ambientalmente amigables y

económicamente viables.

Con el propósito de observar las variaciones del módulo resiliente (M_r), el material estabilizado con residuos aceitosos fue sometido a ensayos en un equipo triaxial dinámico a diferentes temperaturas: 23°C, 45 °C y 60 °C. La evaluación se llevó a cabo comparativamente con un material de referencia, la emulsión asfáltica (EA), con el fin de definir las ventajas o desventajas que presentan los residuos aceitosos en comparación con un material convencional empleado en la estabilización de bases granulares.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Evaluar la influencia de la temperatura en la rigidez de suelos granulares estabilizados mediante el uso de ligantes obtenidos de residuos aceitosos de la industria del petróleo.

1.2. Objetivos Específicos

Determinar el módulo resiliente de los suelos granulares estabilizados con ligantes obtenidos de residuos aceitosos de la industria del petróleo mediante ensayos de laboratorio.

Comparar el comportamiento mecánico de los suelos granulares estabilizados a partir de residuos aceitosos, con relación a materiales granulares estabilizados con ligantes comúnmente utilizados como emulsiones asfálticas.

Apoyar las actividades de laboratorio requeridas por el convenio para realizar la caracterización de materiales, diseño de mezclas y su respectiva evaluación mecánica.

Asegurar el proceso investigativo siguiendo los lineamientos establecidos en el plan de calidad del convenio UIS- Ecopetrol a fin de dar trazabilidad a los resultados a los que se lleguen en el presente trabajo.

2. Marco referencial

La búsqueda de información técnica relacionada con el impacto de la temperatura en bases granulares estabilizadas con ligantes obtenidos al modificar los desechos aceitosos de la industria petrolera mostró que no se han realizado investigaciones específicas sobre este tema en Colombia, lo que resalta la importancia y relevancia del tema propuesto. Por otra parte, se resaltan las metodologías propuestas para establecer la sensibilidad de los materiales asfálticos y las mezclas compuestas por granulares estabilizados con estos, además de los conceptos técnicos empleados para la evaluación de la temperatura en la rigidez de mezclas bituminosas al emplear un equipo triaxial dinámico con control de temperatura para determinar el módulo resiliente y observar la influencia del acondicionamiento en la respuesta mecánica del material.

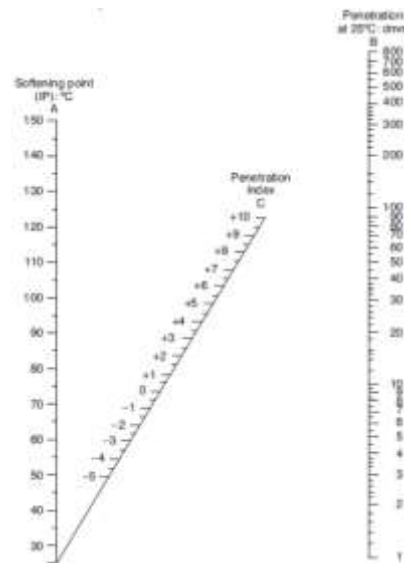
2.1. Sensibilidad a la temperatura de materiales asfálticos

La naturaleza viscoelástica de los materiales asfálticos condiciona el comportamiento mecánico y lo hace dependiente tanto de la temperatura como de la frecuencia de la carga. Para estimar la susceptibilidad térmica del asfalto se ha establecido el índice de penetración (IP), determinado a partir de resultados obtenidos del ensayo de penetración (INVIAS, 2012) y del ensayo de punto de ablandamiento (INVIAS, 2012). La norma INV E 724 (INVIAS, 2012), indica una clasificación según el valor del IP, valores mayores de +1, son cementos asfálticos con poca sensibilidad a la temperatura, valores inferiores a -1 representan materiales con mayor susceptibilidad con una componente viscosa predominante y valores entre +1 a -1, presentan características intermedias a las anteriormente descritas.

El nomograma del índice de penetración (ver *Figura 1*) es un referente clave que permite comparar y entender el comportamiento térmico de los ligantes, proporcionando una base teórica para explicar los resultados obtenidos en cuanto a la sensibilidad térmica de los materiales bajo análisis.

Figura 1

Nomograma del índice de penetración.



Nota: Adaptado de (*Read & Whiteoak, 2015*).

Otro parámetro utilizado para definir la respuesta del material a diferentes temperaturas es la viscosidad, la cual se determina por medio del viscosímetro rotacional (INVIAS, 2012). Dentro de la Guía de Diseño Mecanicista-Empírico de Pavimentos de la AASHTO (MEPDG, por su sigla en inglés) (ASTM International, 2021), la curva de susceptibilidad térmica del asfalto está dada por la expresión (1).

$$\log \log \eta = A + VTS \log T_R \quad (1)$$

Dónde η es la viscosidad en centipoises, T_R es la temperatura en Rankine, A es la constante que intercepta las ordenadas, VTS es la pendiente de la curva de susceptibilidad de viscosidad vs temperatura.

La sensibilidad térmica de las mezclas bituminosas es influenciada por el cambio de consistencia del ligante asfáltico respecto a las variaciones de temperatura afectando la respuesta del material compuesto al momento de ser sometido a la aplicación de cargas. A altas temperaturas, las propiedades viscoelásticas del asfalto generan un comportamiento dominado por la componente viscosa que hace fluir el material asfáltico promoviendo la acumulación de deformaciones plásticas. Por otra parte, a bajas temperaturas, el asfalto tiende a aumentar la rigidez y se comporta como un material elástico, propenso a fracturarse. Y para temperaturas intermedias presenta una combinación de los dos estados anteriormente expuestos.

La literatura sobre los materiales compuesto por ligantes asfálticos y agregados no reporta un indicador o índice que estime la sensibilidad térmica de las mezclas. Los estudios muestran la evaluación de la sensibilidad a la temperatura a través de pruebas mecánicas que definen la tendencia de la respuesta bajo esfuerzos de los materiales bajo la aplicación de esfuerzos que simulan las exigencias del tránsito acondicionadas a diferentes temperaturas. (Díaz & Archila, 2010) (Albeño Cáceres, Molina Humaña, & Reynoza Moran, 2012).

2.2. Base estabilizada

La base es conformada por la capa de pavimento ubicada entre la capa de subbase y la capa de rodadura, tiene como función soportar la capa de rodadura y transmitir las cargas generadas por el tránsito a las capas inferiores. Los materiales por estabilizar podrán ser agregados pétreos o suelos granulares.

De acuerdo con lo establecido en la especificación de construcción INVIAS 340-22 (INVIAS, 2012), los agregados pétreos a estabilizar con emulsión asfáltica podrán provenir de la trituración de piedra de cantera o de grava proveniente de fuentes de grava natural y dicho material podrá ser utilizado en la construcción de bases estabilizadas para todo tipo de tránsito.

2.3. Módulo resiliente

El módulo resiliente (M_r) es un concepto desarrollado por Seed et al. en 1955 (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007) y fue definido como la magnitud del esfuerzo desviador ($q = \sigma_1 - \sigma_3$) repetido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable o resiliente (ε_{1r}), σ_1 es el esfuerzo axial, σ_3 es la presión de confinamiento y ε_{3T} es la deformación horizontal resiliente.

$$M_r = \frac{q}{\varepsilon_{1r}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon_{1r}} \quad (2)$$

Esta ecuación (2), se aplica cuando la presión de confinamiento es constante, caso contrario se utiliza la ecuación generalizada de Hooke (3) descrita a continuación.

$$M_r = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)(\sigma_1 + \sigma_3)}{\varepsilon_{1r}(\sigma_1 + \sigma_3) - 2\varepsilon_{3T} \sigma_3} \quad (3)$$

2.4. Ensayo de módulo resiliente

Este ensayo de laboratorio consiste en aplicar un esfuerzo axial de magnitud fija, con una duración de carga de 100 ms y un periodo de reposo de 900 ms, a un espécimen cilíndrico de 71 mm de diámetro (d) y una altura mínima de $2 * d$. Durante el ensayo, la muestra permanece sometida a un esfuerzo de confinamiento proporcionado por medio de una cámara de presión triaxial. Se mide la deformación axial resiliente de respuesta del espécimen y se calcula el módulo resiliente relacionando el esfuerzo axial desviador con la deformación axial resultante (INVIAS, 2012).

$$M_r = \frac{S_{cíclico}}{\varepsilon_r} \quad (4)$$

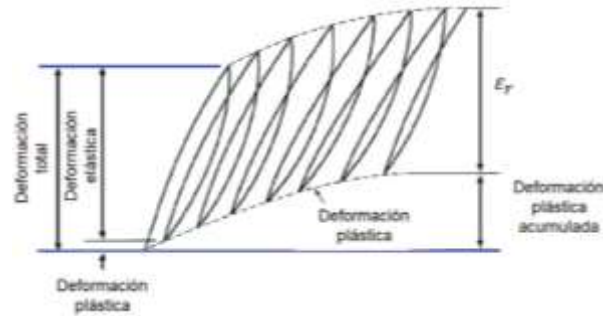
2.5. Curva de deformación de carga repetida

Esta curva caracteriza el comportamiento del material y se obtiene mediante la ejecución del ensayo de módulo resiliente. Para construirla, se tiene en cuenta la deformación elástica (ε_r) y

la deformación plástica en cada ciclo.

Figura 2

Deformación bajo un ensayo de carga repetida



Nota: Tomado de (Pérez Rativa & Vásquez Vanegas, 2020)

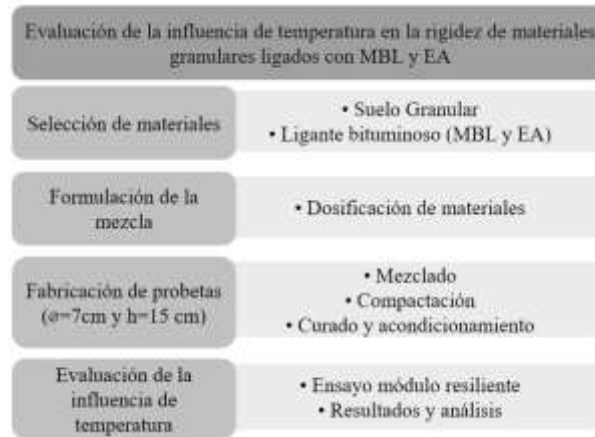
3. Metodología

Para realizar la respectiva evaluación de la influencia de temperatura en la rigidez de los materiales granulares se estableció una metodología dividida en cuatro fases. (Ver

Figura 3) En primer lugar, una selección de los componentes de la matriz granular para los especímenes a ensayar y de los estabilizantes bituminosos, seguido de la dosificación de la mezcla, la cual fue definida y suministrada por el convenio UIS-Ecopetrol con base en los resultados obtenidos de las pruebas de resistencia a la compresión simple y la resistencia a la tensión indirecta en condición seca evaluando distintos contenidos de ligante. Posteriormente se fabricaron probetas con un diámetro de 7 cm y una altura de 14 cm, teniendo en cuenta lo protocolos establecidos de mezclado de los componentes, compactación, curado y acondicionamiento. Finalmente, la ejecución del ensayo de módulo resiliente bajo la normativa INV-E-156-13 (INVIAS, 2012) donde se llevó a cabo con el equipo triaxial a 23°C, 45 °C y 60 °C registrando los resultados y efectuando el correspondiente análisis.

Figura 3.

Metodología evaluación de la influencia de temperatura



Nota: En esta figura se encuentran plasmadas las fases metodológicas que se siguieron para la realización de este proyecto.

3.1. Materiales

La evaluación de la influencia de la temperatura en la rigidez de materiales granulares estabilizados con bitumen, se realizó empleando el agente obtenido de los residuos aceitosos (MBL), además, se utilizó un ligante convencional (emulsión asfáltica), con el fin de comparar y evaluar el desempeño del MBL frente a un material ampliamente utilizado en el mejoramiento de corredores viales. A continuación, se describe cada uno de los materiales empleados.

3.1.1. Material bituminoso a partir de lodos aceitosos (MBL)

Los residuos bituminosos son sustancias derivadas del petróleo cuyo origen proviene de procesos de exploración, producción y refinación de este. En la presente investigación se seleccionaron tres productos bituminosos obtenidos de los lodos aceitosos.

Tabla 1.

Agente estabilizante MBL

MBL	Presentación	Residual/agua
GOR-E19	Emulsionado	70/30

GRB-E10	Emulsionado	70/30
GDH-M33	Modificado	100/0

Nota: Información suministrada por el Convenio UIS-ECP

De acuerdo con el sitio de generación de la materia prima, se procesaron residuos bituminosos producidos en la Gerencia de operaciones de desarrollo y producción Rubiales (GOR), Gerencia de la Refinería de Barrancabermeja (GRB) y la Gerencia de operaciones de desarrollo y producción Huila (GDH). Ver Tabla 1.

Los ligantes GOR y GRB fueron emulsionados en una proporción de 70% ligante residual y 30% agua debido a que su punto de ablandamiento es superior a la temperatura ambiente. Esto garantiza su estabilidad y facilita su aplicación en frío. Por otra parte, el ligante GDH presentó un punto de ablandamiento inferior a la temperatura ambiente, lo que lo hace menos viscoso a esas condiciones y permite su uso sin necesidad de emulsión.

3.1.2. *Material Convencional (EA)*

El material bituminoso convencional evaluado es una emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento (CRL-1).

Tabla 2.

Caracterización Emulsión Asfáltica

Ensayo sobre la EA	Valor
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C, s	27.0
Contenido de agua, %	38.6
Estabilidad durante almacenamiento(24 horas), % Sedimentación a los 5 días, %	0.6 2.9
Destilación Asfalto residual, % Aceite, %	61.4 0.0

Tamizado	
Retenido tamiz No. 20, %	0.00117
Carga de partícula	Positiva
pH	2.7
Ensayo sobre el residuo destilado	
Penetración (25°C, 100 g, 5s)	
-ARD	
-ARB	- 103
Ductilidad (25°C, 5cm/min), cm	118
Solubilidad tricloroetileno, %	98.97

Nota: En esta tabla se muestran las especificaciones para la emulsión establecidas por el fabricante. Información suministrada por el Convenio UIS-ECP

3.1.3. *Material Pétreo*

La matriz granular se seleccionó con base en las especificaciones técnicas colombianas INVIAS de acuerdo con lo contemplado el Artículo 340 (INVIAS, 2012). Por consiguiente, se empleó un suelo granular proveniente de las afueras del área metropolitana de Bucaramanga combinado con arena de río Chicamocha en un porcentaje 90/10 respectivamente, para cumplir con el mínimo valor de CBR establecido en la norma. La granulometría del material está indicada en Tabla 3 y Nota: Información suministrada por el Convenio UIS-ECP

Figura 4.

Tabla 3.

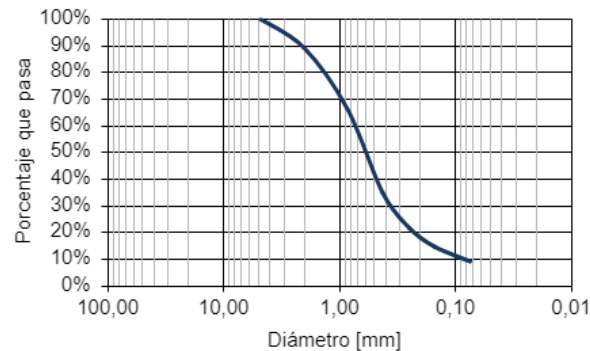
Caracterización del material pétreo

Suelo	Tamiz	
Suelo (90%)	No. 4	No. 200
+	% Pasa	
Arena (10%)	100	5-25

Nota: Información suministrada por el Convenio UIS-ECP

Figura 4

Granulometría del suelo empleado para fabricar las probetas



Nota: Información suministrada por el Convenio UIS-ECP

3.2. Dosificación de la mezcla

La dosificación para el contenido de ligante bituminoso, fue determinada con los resultados de los ensayos realizados para la evaluación del desempeño mecánico a través de la resistencia a la compresión simple inconfiada y la resistencia a la tensión indirecta en condición seca.

En el ensayo de compresión inconfiada, se fabricaron y acondicionaron especímenes cilíndricos de dimensiones 5,08 cm de diámetro y 10,16 cm de alto con contenidos de ligante entre el 4 y 11% para cada uno de los MBL seleccionados con el material pétreo especificado en la Tabla 4. Las probetas fueron curadas durante un periodo de 48 horas a 60°C. Antes del ensayo de compresión, el espécimen fue acondicionado a una temperatura de 60°C por 24 horas en condiciones húmedas, colocando el material en un recipiente que contenía un volumen de arena saturado. Seguidamente, se llevaron a su respectiva evaluación bajo la normativa INV-152-13 compresión inconfiada en muestras de suelos (INVIAS, 2012), garantizando que todas las probetas estuvieran sometidas en el ensayo a las mismas condiciones y finalmente se registraron

los datos de carga y deformación cada 15 s con una velocidad de deformación constante de 1.27 mm/min.

En el ensayo de tensión indirecta se fabricaron probetas tipo Marshall con un diámetro de 10.16 cm y una altura de 6.35 cm con contenidos de ligante en un rango de 4% a 11% mezclado con el esqueleto granular mencionado en la Tabla 3. Las probetas se sometieron a un curado seco por un periodo de 48 horas a 60°C y antes de la prueba fueron acondicionadas a 25°C durante 24 horas y posteriormente se ejecutó el ensayo siguiendo los lineamientos de la norma INV E-786-13 determinación de la resistencia a la tensión indirecta (RTI) de las mezclas asfálticas (INVIAS, 2012).

Una vez obtenidos los resultados y análisis de estos por parte del equipo del convenio UIS-Ecopetrol se determinó que el contenido óptimo para el material bituminoso convencional fue de 5.5% y para los MBL de la gerencia de GOR fue 8%, GRB 9% y GDH de 5%. En la Tabla 4 se especifica la formulación porcentual de los especímenes de prueba.

Tabla 4

Dosificación de mezclas

Ligante	Ligante(%)	Residual(%)	Árido(%)
Ninguno	0	0	100
Emulsión Asfáltica	5.5	3.38	94.5
GRB-E10	9	6.3	91
GDH-M33	5	5	95
GOR-E19	8	5.6	92

Nota: Esta tabla muestra la dosificación de cada material empleado en la fabricación de las probetas. Los valores están expresados en porcentaje % del peso a producir.

3.3. Fabricación de especímenes de prueba

Para el ensayo de módulo resiliente se fabricaron dos especímenes por cada tipo de ligante seleccionado de diámetro 7 cm y altura 14 cm. El ensayo fue realizado bajo la normativa INV E-156-13 (INVIAS, 2012) para materiales de base granular. Así mismo, se siguieron los procedimientos establecidos en el convenio para el mezclado, densificación, curado y acondicionamiento de especímenes de prueba.

3.3.1. Proceso de mezclado de las probetas

Para el mezclado de los componentes se estableció un nivel específico de energía y un tiempo. El equipo de mezclado utilizado contaba con una capacidad de 3 litros y operaba a una velocidad de 158 revoluciones por minuto (rpm). A continuación, se describe en detalle el protocolo de mezclado implementado.

Se llevó a cabo la homogeneización de los agregados, compuestos en un 90% por suelo granular y en un 10% por arena proveniente del río Chicamocha, durante un lapso de 30 segundos a una velocidad de 158 revoluciones por minuto (rpm). Se procedió a la dosificación de agua, la cual se ajustó de acuerdo con el contenido óptimo de humedad de compactación previamente establecido mediante el ensayo modificado de compactación, siguiendo las directrices estipuladas en la norma, INV E-142-13 (INVIAS, 2012). Con el fin de facilitar la distribución homogénea del ligante sobre los agregados durante el proceso de mezclado, se incorporó un exceso de agua equivalente al 1% del contenido calculado.

Posteriormente se agregó la mitad del MBL a la mezcla y se integró durante 30 segundos mientras se mantuvo la velocidad del mezclador. Luego de una pausa de 15 segundos, se agregó la segunda mitad del MBL y se mezcló durante 1 minuto a la misma velocidad. Posteriormente, se procedió al curado de la mezcla, permitiendo el reposo en condiciones ambientales o sometiénola a una corriente de aire generada por un ventilador hasta alcanzar la humedad óptima de

compactación, previamente calculada mediante el ensayo modificado de Proctor.

3.3.2. Proceso de compactación de las probetas

El procedimiento de compactación de las probetas se inició con la preparación del molde, que incluyó la limpieza de posibles contaminantes y la aplicación de aceite lubricante en su interior. A continuación, el molde se colocó en la placa base, se instaló el collar del conjunto y se procedió a colocar la muestra en el molde distribuida en cinco capas. Cada capa fue colocada uniformemente en el área del molde utilizando una espátula y se aplicó una energía de compactación mediante un martillo manual aplicando 25 golpes en cada capa. Es importante asegurar la distribución de la misma cantidad de material en cada capa y escarificar la superficie de la capa compactada antes de agregar el material para la siguiente capa de esta manera se aseguró una mayor adhesión entre ellas. Una vez completada la compactación de todas las capas, se retiró el collar del molde y se desmontó el conjunto.

Las probetas compactadas se dejaron en el molde durante un período de 24 horas antes de desmoldarlas. Para las probetas cilíndricas de 7 x 14 cm, el proceso de desmoldeo pudo llevarse a cabo de forma manual, asegurando una adecuada lubricación del molde para garantizar la integridad de las probetas. Esto implicó soltar los tornillos que sujetan el anillo que mantiene las tres piezas del molde juntas, deslizar el anillo para liberar completamente el molde y ejercer presión lateral para separar las piezas del conjunto de compactación.

3.3.3. Proceso de curado de las probetas

Las muestras preparadas se sometieron a un proceso de curado seco en una cama de arena durante 48 horas a 60°C en un horno de convección forzada. El volumen de arena fue implementado para evitar alteración en la estructura del espécimen debido a la temperatura empleada durante el proceso.

3.3.4. *Acondicionamiento húmedo de probetas*

Posterior a la prueba mecánica realizada sobre la probeta en condición seca, el material se sometió a un acondicionamiento húmedo que involucró la aplicación de agua haciendo uso de una cama de arena saturada exponiendo el material durante 24 horas a 60°C en un horno de convección forzada para simular condiciones de humedad desfavorables en campo.

3.3.5. *Evaluación de la influencia de la temperatura*

La evaluación de la influencia de la temperatura en la rigidez de los materiales granulares ligados con un material bituminoso MBL se realizó mediante el ensayo de módulo resiliente a 23°C, 45°C y 60°C, considerando que el ensayo simula varias condiciones de esfuerzos a las cuales podría estar sometido el material estabilizado en un corredor vial, bajo condiciones de cargas cíclicas impuestas por el paso de vehículos y cambios de temperatura por las condiciones ambientales del sitio de la vía.

Según Huang (2004), cuando un material se somete a un ensayo de carga repetida, al inicio de la aplicación de la carga, se da una deformación permanente y al mismo tiempo una deformación recuperable, conforme aumenta el número de repeticiones de carga, la deformación plástica va disminuyendo y la deformación pasa a ser prácticamente toda recuperable.

Conforme a lo anterior, es posible determinar la respuesta mecánica de los materiales granulares solicitado por cargas repetidas a diferentes condiciones de temperaturas para determinar la susceptibilidad térmica de los ligantes MBL, a través de los valores del módulo resiliente. (Jiménez, 2009)

Seguidamente, se detallan las condiciones, resultados y análisis de las pruebas realizados sobre las muestras de ensayo, a partir de los diagramas de módulo resiliente vs esfuerzo bulk, donde se comparó la magnitud de la rigidez del suelo granular estabilizado con los productos

bituminosos a partir de lodos aceitosos y la emulsión asfáltica.

3.3.6. *Parámetros del ensayo triaxial*

Este ensayo consiste en aplicar un esfuerzo axial cíclico repetido, de magnitud, duración (0.1 s) y frecuencias fijas, a un espécimen cilíndrico, previamente curado en seco o acondicionado en húmedo.

Figura 5

Montaje de probeta en la cámara triaxial



Nota: La imagen muestra la colocación de la membrana de látex triaxial en la probeta, antes de montarla en la cámara triaxial para el ensayo.

Durante y entre las aplicaciones del esfuerzo dinámico desviador, el espécimen está sometido a un esfuerzo estático en su contorno, proporcionado por medio de una cámara de presión triaxial. Se mide la deformación axial total resiliente (recuperable) de respuesta del espécimen y se calcula el módulo resiliente relacionando el esfuerzo axial desviador con la deformación unitaria axial resultante. (5). Los ensayos se realizaron a temperatura controlada de 23°C, 45 °C y 60 °C pre acondicionando el espécimen en la cámara por un tiempo de 2 horas entre cada nivel de

temperatura.

4. Resultados de la evaluación

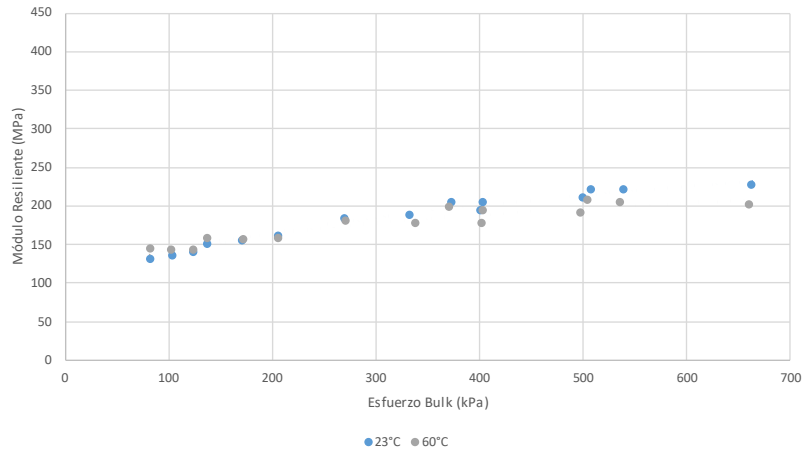
Los resultados que se presentan en las siguientes gráficas y tablas son el producto del procesamiento de los ensayos realizados sobre dos probetas por cada ligante evaluado. En cada gráfica, se muestra la tendencia de los resultados de las pruebas de módulo resiliente a tres temperaturas distintas: 23°C, 45°C y 60°C seleccionadas para abordar una gama representativa de condiciones a las que los materiales granulares ligados pueden estar expuestos en aplicaciones prácticas según los climas de las regiones en Colombia. En particular, se han analizado tres tipos de ligantes bituminosos obtenidos de la modificación de residuos aceitosos con las siguientes dosificaciones: GOR 8%, GDH 5% y GRB 9%. Cada uno de estos ligantes se sometió al ensayo triaxial dinámico con las temperaturas anteriormente mencionadas, con el propósito de determinar el comportamiento en términos de rigidez. Estas pruebas son fundamentales para comprender el rendimiento de los materiales en diferentes escenarios. Los resultados de las pruebas de laboratorio de módulo resiliente ejecutadas con el equipo triaxial se muestran en el Apéndice A.

4.1. Módulo resiliente evaluado tras el curado seco

Inicialmente se presenta la respuesta resiliente del suelo de referencia no estabilizado, es decir con contenido 0% de ligante.

Figura 6.

Módulo resiliente del suelo no estabilizado en condición seca



Nota: en esta figura se aprecia el efecto nulo de la temperatura y es un resultado acorde a la naturaleza del material ensayado (suelo arenoso).

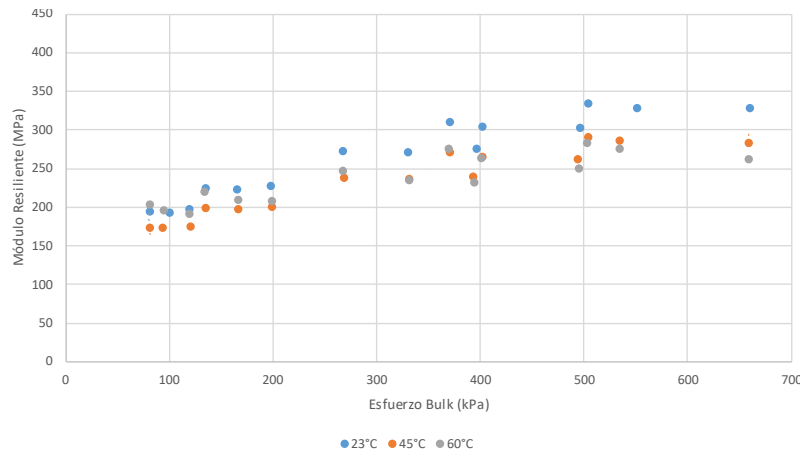
4.1.1. Módulo resiliente del suelo estabilizado con ligante de referencia

A continuación, se presentan los datos obtenidos del comportamiento resiliente de la emulsión asfáltica, utilizada en aplicaciones de estabilización de bases granulares. La emulsión asfáltica es sometida al mismo conjunto de pruebas con condiciones de temperatura, tiempo de curado y acondicionamiento de los demás ligantes. Esto permite una evaluación directa de las ventajas o desventajas que poseen los residuos aceitosos como estabilizante en comparación con un material de referencia con una amplia trayectoria en la industria.

En la Figura 7 el suelo estabilizado con emulsión asfáltica muestra una variación de la rigidez que tiende a disminuir cuando la temperatura aumenta. En el rango de temperaturas evaluado entre 23 a 60°C, el módulo resiliente disminuyó a razón de -1.82 MPa/°C manteniendo el 80% de la rigidez inicial determinada a 23°C.

Figura 7

Módulo resiliente del suelo ligado con EA en condición seca.



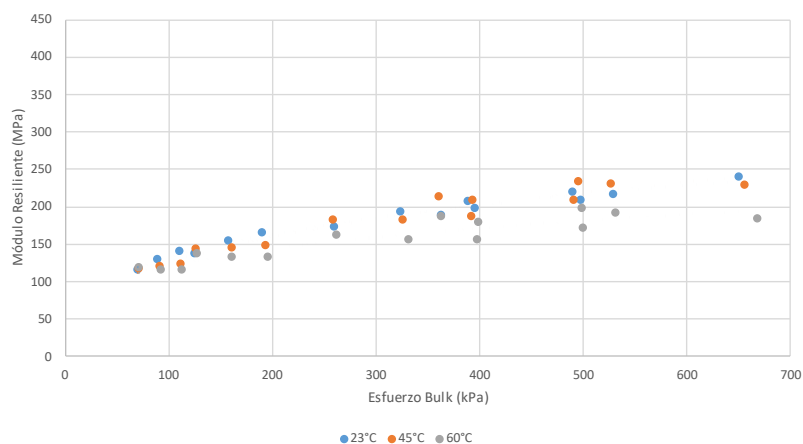
Nota: elaboración propia

4.1.2. Módulo resiliente del suelo estabilizado con GOR

Al examinar el comportamiento en el intervalo de temperaturas evaluado del material estabilizado con el ligante GOR, este presentó una disminución del módulo resiliente a una razón de cambio de $-1.41 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$ en donde mantuvo el 77% de la rigidez obtenida con la temperatura inicial de 23°C cuando el material fue expuesto a una temperatura de 60°C Ver Figura 8

Figura 8

Módulo resiliente del suelo ligado con GOR en condiciones de curado seco

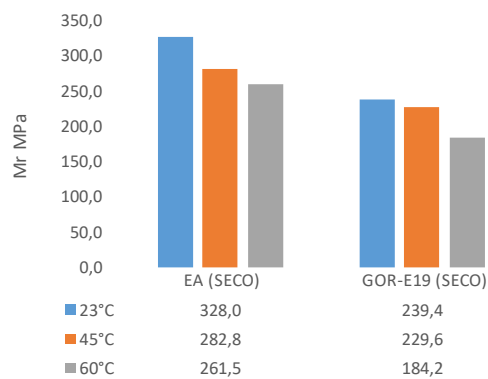


Con relación a la magnitud del módulo resiliente, la mezcla de suelo estabilizado con GOR logró alcanzar sobre una mezcla estabilizada con emulsión asfáltica el 73% del módulo

resiliente a 23°C, 81% a 45°C y 70% a 60°C siendo inferior en cada una de las temperaturas. No obstante, obtuvo un aumento de casi el 13% en comparación con el suelo no estabilizado (ver Tabla 6). Las magnitudes de los módulos de la mezcla ligada con GOR comparada con los valores del material estabilizado con EA se pueden ver en la Figura 9. Los valores ilustrados en los análisis de la magnitud de la rigidez de los materiales estabilizados fueron los obtenidos al realizar el ensayo triaxial con la presión de cámara más alta, es decir 137.9 KPa y una fuerza axial máxima de 275.8 KPa.

Figura 9

Magnitudes de los módulos resilientes GOR vs EA.

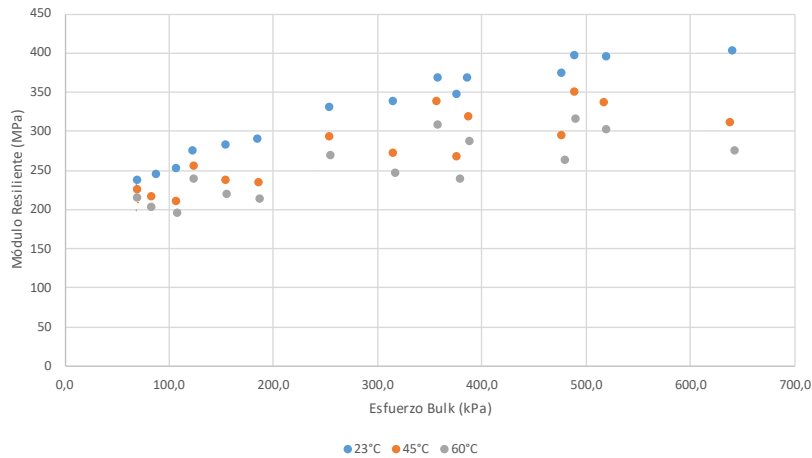


4.1.3. Módulo resiliente del suelo estabilizado con GRB

En la Figura 10 se presenta el desempeño del ligante de GRB cuando es sometido a incrementos de temperatura. Este obtuvo un módulo de 403.2 MPa a 23°C, a 45°C mantuvo el 77% de la rigidez y a 60°C el 68% del valor obtenido inicialmente. El material estabilizado con GRB en el intervalo de temperatura evaluada presentó una razón de cambio del módulo de -3.5 MPa/°C presentando la mayor sensibilidad a la variación de la temperatura entre los ligantes evaluados.

Figura 10

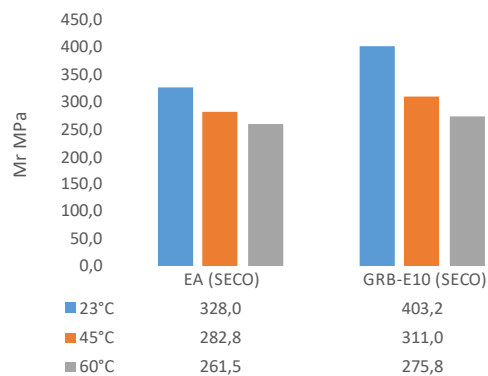
Módulo resiliente del suelo ligado con GRB en condiciones de curado seco.



Comparando el desempeño de la mezcla estabilizada con GRB con un suelo estabilizado con emulsión asfáltica (probetas sometidas a curado seco) presentó un 123% del módulo resiliente a 23°C, 110% a 45°C y 105% a 60°C superando al ligante de referencia en cada una de las temperaturas (ver Tabla 6). Las magnitudes de los módulos están representadas en la Figura 11.

Figura 11

Magnitudes de los módulos resilientes GRB vs EA.



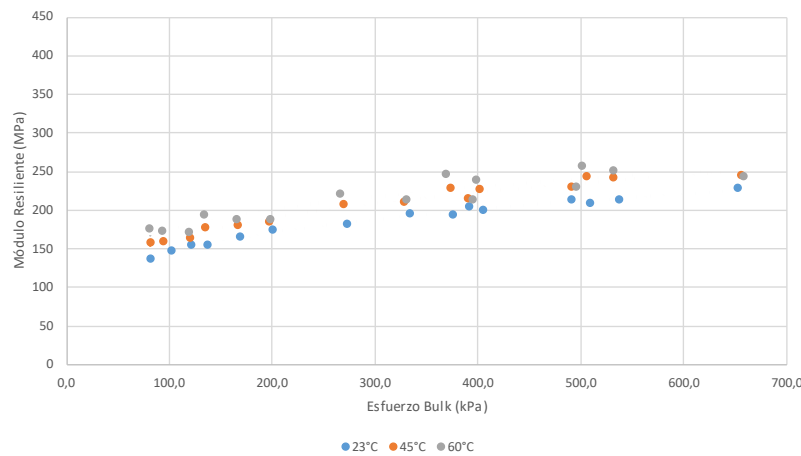
4.1.4. *Módulo Resiliente del suelo estabilizado con GDH*

Al analizar el comportamiento del suelo estabilizado con el ligante GDH, no se observó una disminución del desempeño cuando fue sometido a incrementos de temperatura. Como se

observa en la Figura 12 se obtuvo un módulo de 228.6 MPa a 23°C tras el curado seco, el cual incrementó 7% a 45°C y 6% a 60°C del valor anteriormente mencionado. La tendencia de los datos obtenidos refleja un comportamiento en la rigidez atípico para materiales bituminosos donde se espera una reducción del desempeño mecánico al someter el material a un aumento de temperatura.

Figura 12

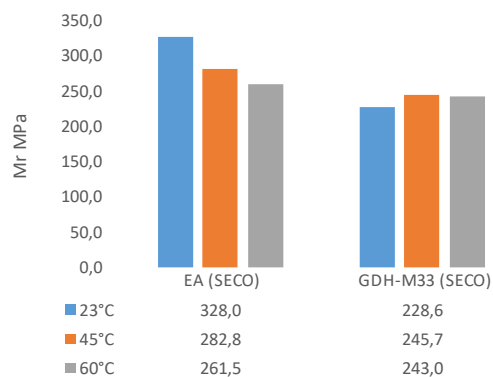
Módulo resiliente del suelo ligado con GDH en condiciones de curado seco.



La mezcla estabilizada con GDH respecto al suelo estabilizado con emulsión asfáltica (probetas sometidas a curado seco), alcanzó el 70% del módulo resiliente a 23°C, 87% a 45°C y 93% a 60°C. Las magnitudes de los módulos están representadas en la Figura 13.

Figura 13

Magnitudes de los módulos resilientes GDH vs EA.



4.1.5. Indicador de la sensibilidad térmica de los ligantes MBL acondicionados en seco

Para establecer el grado de sensibilidad a la temperatura de los ligantes evaluados, se definió un parámetro como la relación del módulo resiliente medido a 45 °C con relación al valor obtenido a 23 °C.

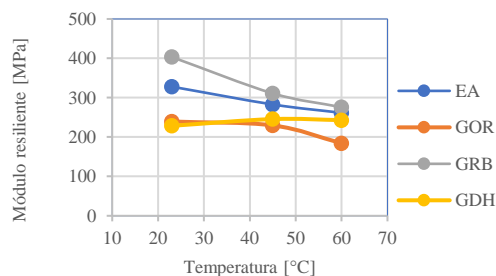
$$ST_{Mr} = \left(1 - \frac{Mr_{45^{\circ}C}}{Mr_{23^{\circ}C}}\right) \times 100 \quad (5)$$

Dónde un valor cercano a 100%, indica un material con alta sensibilidad térmica y variaciones de la temperatura afectan la magnitud de la rigidez presentado un menor desempeño mecánico. Por otro lado, valores cercanos a 0%, representan materiales con menor susceptibilidad a la temperatura permitiendo mantener un valor de módulo resiliente constante a diferentes deltas de temperatura.

En la Figura 14 se presenta la razón de cambio del Mr por cada °C al incrementar la temperatura desde los 23°C hasta los 45°C. Además, se muestra la relación del Mr que mantiene la probeta en comparación con el valor obtenido a 23°C, como el índice que expresa la sensibilidad térmica determinada con la ecuación (5).

Figura 14

Variación del módulo resiliente variando la temperatura



El material estabilizado que presentó mayor sensibilidad a la variación de temperatura fue el fabricado con GRB, seguido por la emulsión asfáltica (material de referencia) y las menores sensibilidades térmicas las presentaron los ligantes de GOR y GDH.

Tabla 5*Sensibilidad térmica de los ligantes bituminosos en condición seca*

Efecto correlativo de la temperatura				
Ligante	Mr a 23 °C [MPa]	Mr a 45 °C [MPa]	m [MPa/°C]	STMr [%]
EA	328.0	282.8	-2.05	14
GOR	239.4	229.6	-0.44	4
GRB	403.2	311.0	-4.19	23
GDH	228.6	245.7	0.77	-7

Nota: Esta tabla, presenta el indicador de la sensibilidad térmica (STMr) en donde la razón de cambio del Mr está representado con la letra m.

4.1.6. Desempeño de la rigidez de materiales estabilizados con residuos con un material de referencia acondicionados en seco

En la Tabla 6 se presentan las magnitudes del módulo resiliente obtenido por la emulsión asfáltica y el cálculo de variación del módulo de cada MBL respecto al ligante de referencia expresado en porcentaje, se toma como el 100% el rendimiento de los especímenes ligados con Emulsión Asfáltica (EA), evaluados posterior a ser sometidos a un proceso de curado seco.

Tabla 6*Variación del módulo resiliente de los MBL respecto a la EA*

Mr de los MBL con respecto al material de referencia				
En condiciones secas				
Ligante	23°C	45°C	60°C	Promedio
EA [MPa]	328.0	282.8	261.5	
GOR	73%	81%	70%	75%
GRB	123%	110%	105%	113%
GDH	70%	87%	93%	83%

Nota: Esta tabla expresa en términos porcentuales el módulo resiliente del suelo estabilizado con

MBL en relación con el ligante de referencia. Evaluación en seco.

El ligante obtenido a partir de los residuos aceitosos que logró superar el desempeño mecánico del material estabilizado con un ligante convencional fue GRB, en promedio logró un desempeño valorado a través del módulo resiliente de 113% con respecto al obtenido con emulsión asfáltica catiónica. Seguidamente, el ligante generado con los residuos de la Gerencia de GDH con un 83% de rendimiento con respecto al logrado con la EA y, por último, el material estabilizado con GOR alcanzó a desarrollar una rigidez del 75% comparada con la rigidez exhibida por la mezcla con EA.

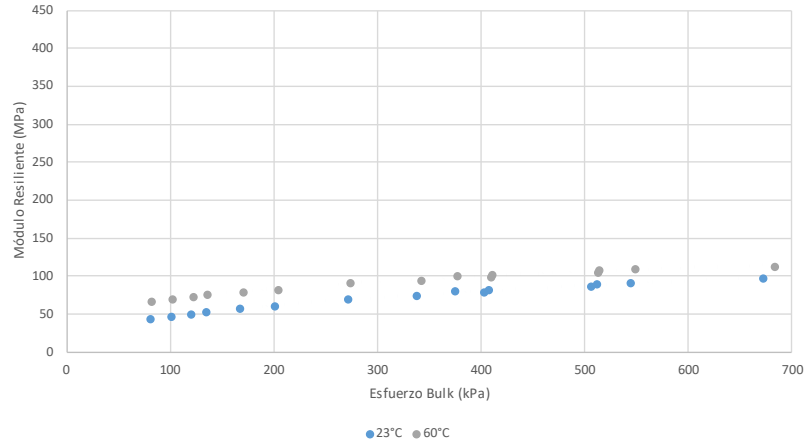
4.2. Módulo resiliente evaluado tras el acondicionamiento húmedo

Los resultados aquí presentados fueron los obtenidos de las probetas sometidas a un acondicionamiento húmedo realizado en un recipiente que involucró la aplicación de agua haciendo uso de una cama de arena saturada exponiendo el material durante 24 horas en un horno de convección forzada a 60°C. Debido a las condiciones desfavorables de ensayo todos los especímenes redujeron la rigidez en gran medida como se tenía previsto.

En primer lugar, se presenta la respuesta resiliente del suelo de referencia no estabilizado de la misma manera que en condiciones secas la temperatura presenta un efecto nulo como es de esperarse de un suelo arenoso sin ningún tipo de bitumen (ver Figura 15).

Figura 15

Módulo resiliente del suelo no estabilizado

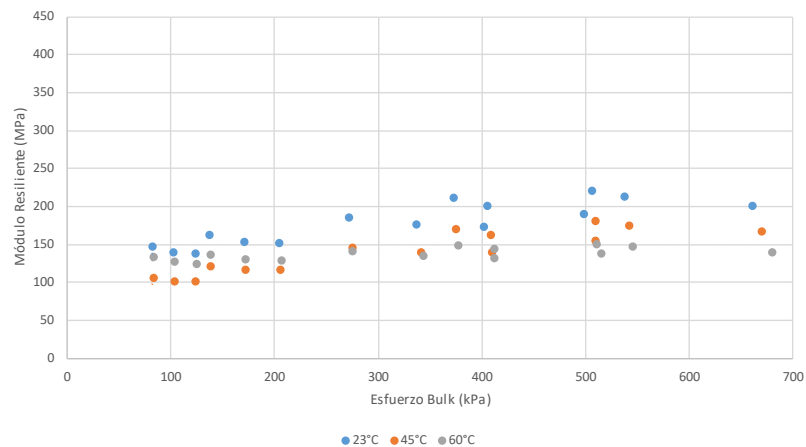


4.2.1. Módulo resiliente del suelo ligado con EA

La Figura 16 muestra los resultados obtenidos del ensayo triaxial sobre los especímenes de suelo granular estabilizados con emulsión asfáltica, en esta gráfica se observa de manera cualitativa una disminución del módulo proporcional al incremento de temperatura, esto es respaldado por el siguiente análisis cuantitativo.

Figura 16

Módulo resiliente del suelo ligado con EA



La emulsión asfáltica obtuvo un M_r tras el acondicionamiento húmedo de 201.2 MPa a 23°C y debido al efecto de la temperatura en un nivel de 45°C logró mantener un 70% del valor inicial a razón de -1.63 MPa/°C. Cuando se incrementó la temperatura hasta los 60°C, la rigidez

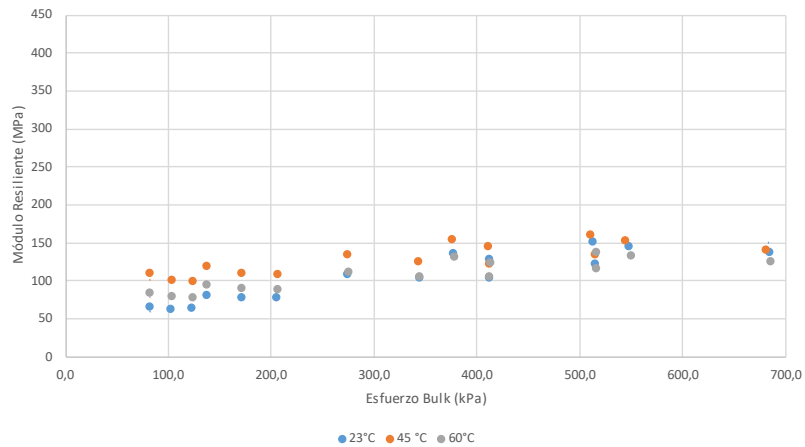
disminuyó y la EA mantuvo el 70% de la rigidez obtenida a 23°C.

4.2.2. Módulo resiliente del suelo ligado con GOR

El suelo estabilizado con el ligante GOR no presentó mayores cambios en la rigidez al ser sometido a cambios de temperatura en condiciones de humedad, se observa que las tasas de cambio son bajas en los dos segmentos evaluados a 45°C y 60°C logrando retener una rigidez del 103% y 91% respectivamente del valor obtenido a 23°C.

Figura 17

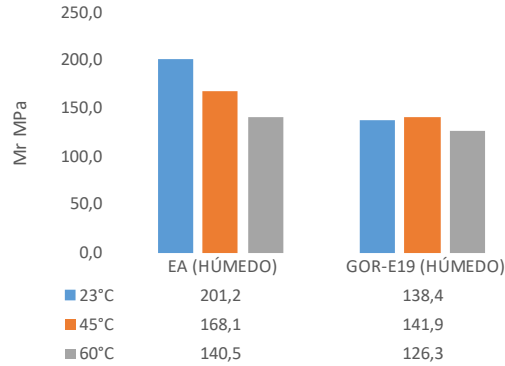
Módulo resiliente del suelo estabilizado con GOR en condiciones de humedad



La mezcla de suelo estabilizado con GOR alcanzó sobre una mezcla estabilizada con emulsión asfáltica el 69% del módulo resiliente a 23°C, 84% a 45°C y 90% a 60°C una vez más siendo inferior en cada una de las temperaturas (ver Tabla 8). Las magnitudes de los módulos están representadas en la Figura 18.

Figura 18

Magnitudes de los módulos resilientes GOR vs EA.

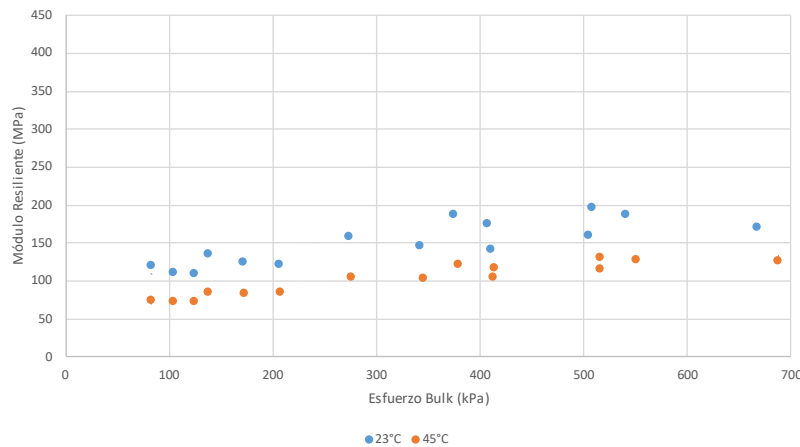


4.2.3. Módulo resiliente del suelo ligado con GRB

El suelo estabilizado con ligante modificado GRB sometido a incrementos de temperatura demostró un módulo resiliente de 172.3 MPa a 23°C y a 45°C mantuvo el 74% de dicha rigidez, es decir que disminuyó a razón de $-2.08 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$. Durante la evaluación a 60°C la probeta estabilizada con GRB llegó a falla, razón por la cual no se tomaron registros en esta temperatura.

Figura 19

Módulo resiliente en condiciones húmedas del suelo estabilizado con GRB

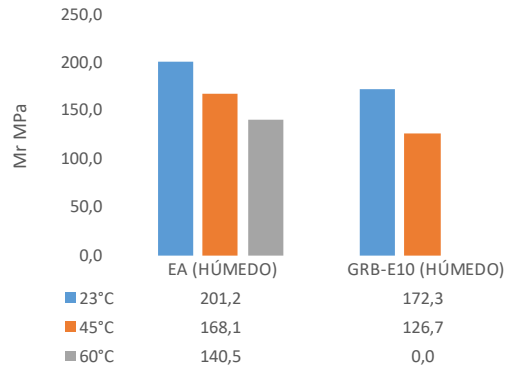


La mezcla estabilizada con GRB en comparación con el suelo estabilizado con emulsión asfáltica (probetas sometidas a acondicionamiento húmedo) retuvo el 86% del módulo resiliente a 23°C y el 75% a 45°C siendo inferior al ligante de referencia en las temperaturas mencionadas

como se muestra en la Tabla 8. Las magnitudes de los módulos están representadas en la Figura 20.

Figura 20

Magnitudes de los módulos resilientes GRB vs EA

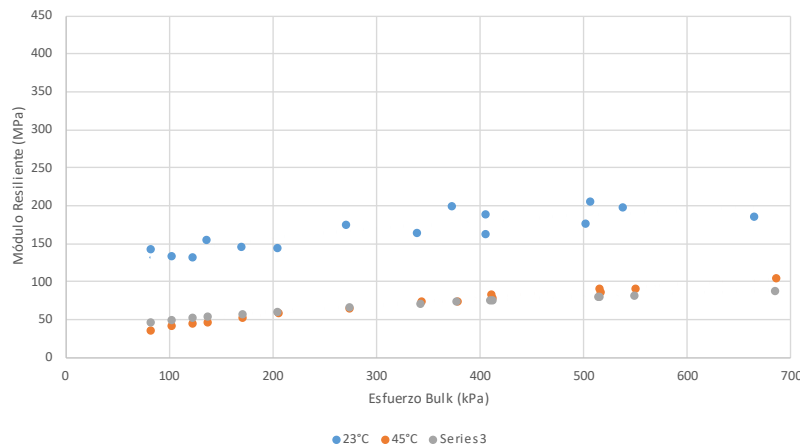


4.2.4. Módulo resiliente del suelo ligado con GDH

Al analizar el comportamiento del suelo estabilizado con el ligante GDH, se observó una disminución del desempeño cuando fue sometido a incrementos de temperatura. Como se observa en la Figura 22 se obtuvo un módulo de 186.5 MPa a 23°C en condiciones de humedad, dicho valor disminuyó a razón de $-2.73 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$ al aumentar la temperatura hasta 60°C.

Figura 21

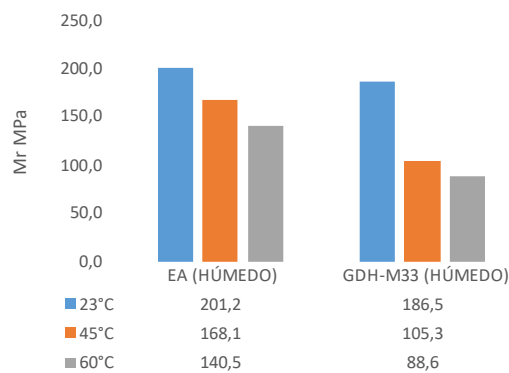
Módulo resiliente en condiciones húmedas del suelo estabilizado con GDH.



La mezcla estabilizada con GDH respecto al suelo estabilizado con emulsión asfáltica (probetas sometidas a acondicionamiento húmedo), alcanzó el 93% a 23°C y 63% para las temperaturas de 45°C y 60°C con relación a la EA, debido a esto se posicionó como el ligante con los resultados absolutos más desfavorables en condición húmeda, la rigidez de este MBL es incluso inferior a la que presenta el suelo no estabilizado. Las magnitudes de los módulos están representadas en la Figura 22.

Figura 22

Magnitudes de los módulos resiliente GDH vs EA



4.2.5. Indicador de la sensibilidad térmica de los ligantes MBL acondicionados en húmedo

En la Tabla 7 se presenta la razón de cambio del Mr por cada °C entre las temperaturas definidas para determinar la sensibilidad térmica del material estabilizado según la ecuación (5). Se tiene que el material con mayor sensibilidad a la temperatura posterior a un acondicionamiento para aumentar la humedad en el espécimen fue GDH, posteriormente el ligante de GRB seguido de la EA y por último del bitumen obtenido de los residuos aceitosos de GOR.

Tabla 7

Sensibilidad térmica de los ligantes bituminosos en condición húmeda

Efecto correlativo de la temperatura				
Ligante	Mr a 23 °C [MPa]	Mr a 45 °C [MPa]	m [MPa/°C]	STMr [%]

EA	201.2	168.1	-1.51	16%
GOR	138.4	141.9	0.16	-3%
GRB	172.3	126.7	-2.08	26%
GDH	186.6	105.3	-3.69	44%

Nota: En esta tabla se presentan las magnitudes en MPa del módulo resiliente obtenido por la emulsión asfáltica y el cálculo de variación del módulo de cada MBL respecto al ligante de referencia expresado en porcentaje, se toma como el 100% el rendimiento de los especímenes ligados con Emulsión Asfáltica (EA), evaluados en condiciones húmedas.

Tabla 8

Variación del módulo resiliente de los MBL respecto a la EA.

Mr de los MBL con respecto al material de referencia				
En condiciones húmedas				
Ligante	23°C	45°C	60°C	Promedio
EA [MPa]	201.2	168.1	140.5	
GOR	69%	84%	90%	81%
GRB	86%	75%	-	81%
GDH	93%	63%	63%	73%

Nota: Esta tabla expresa en términos porcentuales el módulo resiliente del suelo estabilizado con MBL en relación con el ligante de referencia. Evaluación en húmedo.

En promedio los MBL lograron mantener un 81% de la rigidez de la EA para los ligantes GOR y GRB. En el caso de GDH el valor retenido de rigidez promedio fue del 73%.

5. Actividades de apoyo

En el contexto de una investigación multidisciplinaria, se derivan tareas que requieren un enfoque colaborativo, por lo que en el marco del convenio UIS- Ecopetrol, se estableció la ejecución de actividades complementarias.

En consecuencia, para cumplir con el tercer objetivo propuesto, se llevó a cabo una investigación paralela centrada en la evaluación del módulo complejo de los ligantes empleados en el presente proyecto, esta incluyó la selección y caracterización del material granular, diseño de las mezclas, la fabricación de los especímenes de diámetro 2 cm por 4 cm de altura y se ejecutaron las pruebas mecánicas no destructivas con el fin de observar la evolución del módulo complejo. Esta fue evaluada sobre un mismo espécimen sometido a un proceso de curado secuencial, utilizando un horno de convección forzada a una temperatura de 60°C, ver Figura 23. Cada periodo de curado fue de 48 horas, un lapso de acondicionamiento utilizando un equipo de enfriamiento para garantizar la temperatura durante la ejecución de la prueba en el equipo Metravib+1000 y realizada a 10°C. La matriz arenosa utilizada fue un material de referencia seleccionado de la zona conocida como “El Guamo”, la cual posee una granulometría uniforme y libre de finos.

Figura 23

Proceso de curado de las probetas 2x4cm en cama de arena.



Nota: En esta foto se muestra el tamaño de las probetas, y la cama de arena en donde se acondicionaron para el curado seco secuencial.

El procedimiento de compactación de las probetas se inició con la preparación del molde, que incluyó la limpieza de posibles contaminantes y la aplicación de aceite lubricante en su interior. A continuación, el molde se colocó en la placa base y se procedió a colocar la muestra en el molde distribuida en tres capas. Cada capa fue colocada uniformemente en el área del molde utilizando una espátula y se aplicó una energía de compactación 5 segundos en cada capa mediante un martillo neumático sostenido de manera vertical con la ayuda de un soporte de madera para mejorar la aplicación de fuerza en cada espécimen.

Como en todos los casos, se determinó el comportamiento del ligante de referencia (EA). Para cada ligante fueron preparados 3 especímenes de prueba (réplicas) con los siguientes contenidos de ligante: emulsión asfáltica EA 7%, GOR 8%, GDH 5% y GRB 9%. Los materiales fueron sometidos a una prueba de ensayo no destructiva, lo que permitió determinar el valor del módulo complejo sobre la misma probeta y así comprobar la evolución de la rigidez.

Tabla 9

Desempeño del módulo complejo para mezclas ligadas con MBL.

LIGANTE	CURADO (HORAS)	MÓDULO COMPLEJO - E (Pa)				
		FRECUENCIA (Hz)				
		1	3	5	10	20
EA	162	1,29E+08	1,55E+08	1,69E+08	1,88E+08	2,08E+08
GOR-E	278	1,02E+08	1,18E+08	1,25E+08	1,37E+08	1,52E+08
GDH-M	116	9,13E+07	1,05E+08	1,13E+08	1,25E+08	1,40E+08
GRB-E	116	1,27E+08	1,49E+08	1,58E+08	1,73E+08	1,88E+08
DESEMPEÑO CON RESPECTO AL MATERIAL DE REFERENCIA (EMULSIÓN ASFÁLTICA) %						
GOR-E	278	79	76	74	73	73
				75		
GDH-M	116	71	68	67	66	67
				68		
GRB-E	116	99	96	93	92	90
				94		

Nota: En esta tabla se observa el desempeño del módulo complejo para cada una de las frecuencias

evaluadas a medida que el material fue objeto de un proceso más prolongado de curado de hasta 278 horas.

En comparación con el material de referencia (EA), el ligante GRB demostró un destacado desempeño en estos ensayos, alcanzando un máximo del 94% del módulo complejo a las 116 horas de curado. Le siguió el ligante GOR, que registró un 75% a las 278 horas de curado, y finalmente, el ligante GDH, que alcanzó el 68% del módulo complejo obtenido por la emulsión asfáltica. Los resultados de este trabajo complementario se encuentran consolidados en el Apéndice B.

6. Conclusiones

Se definió un índice para establecer la sensibilidad térmica de los materiales estabilizados con MBL como la relación existente en el módulo resiliente medido a 45°C con respecto al valor de rigidez obtenido a 23°C y la diferencia de este valor con respecto a 1.

Se evidenció una influencia de la temperatura en el módulo resiliente de los materiales estabilizados. En términos generales, a medida que la temperatura aumentaba, la rigidez de los materiales disminuye. No obstante, es importante señalar que esta relación no fue constante y varió según el tipo de ligante empleado.

La adición de MBL mostró un mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo granular, aunque algunos de los ligantes presentan mayor sensibilidad a la temperatura y la adición de combinada de temperatura y humedad conducen a una gran pérdida de la rigidez de la base estabilizada.

En cuanto a la sensibilidad a la temperatura, en el intervalo de 23°C a 45°C se destacan del más sensible al menos sensibles de los ligantes en condiciones secas de la siguiente manera;

GRB, EA, GOR y GDH.

Por otra parte, en condición de humedad a temperatura la sensibilidad determinada entre 23°C a 45°C, los MBL se presentan del más sensible al menos sensible así: GDH, GRB, EA y GOR.

La sensibilidad térmica de todos los ligantes aumentó posterior al acondicionamiento húmedo de los especímenes ensayados. Del más sensible al menos sensible comparando el índice térmico establecido en el curado seco al acondicionamiento en húmedo se tiene: GDH, GOR, GRB y EA.

Comparada la sensibilidad térmica con el material de referencia los ligantes de GOR y GRB son los que se acercan al desempeño alcanzado por la EA.

En cuanto a la magnitud del módulo resiliente de los materiales estabilizados con MBL con respecto al material de referencia, se tiene que en promedio las mezclas con residuos logran retener un 84% de la rigidez de la mezcla con emulsión asfáltica.

Se llevó a cabo una investigación paralela evaluando el módulo complejo de los ligantes, destacando el desempeño destacado del ligante GRB en comparación con GOR y GDH. Los resultados del módulo complejo respaldan la viabilidad de los ligantes modificados en condiciones específicas de curado.

La implementación exitosa de la trazabilidad metodológica aseguró la coherencia y calidad de los resultados a lo largo del proyecto. El seguimiento detallado, la aplicación de procedimientos técnicos y las reuniones periódicas contribuyeron a mantener la integridad del proceso investigativo.

En resumen, estos resultados subrayan la importancia de seleccionar cuidadosamente el tipo de ligante para estabilizar materiales granulares, considerando las condiciones ambientales

específicas del sitio de aplicación. Además, resaltan la necesidad de realizar pruebas exhaustivas en condiciones representativas para garantizar un diseño y construcción adecuados en proyectos de ingeniería civil y construcción sostenible.

Referencias bibliográficas

- Alarcón, J., Jiménez, M., & Benítez, R. (5 de Enero de 2020). Estabilización de suelos mediante el uso de lodos aceitoso. *Revista Ingeniería de Construcción RIC*, Vol 35 N°1, págs. 5-20.
- Albeño Cáceres, H., Molina Humaña, V., & Reynoza Moran, S. E. (2012). *Suceptibilidad térmica de los pavimentos asfálticos utilizados en El Salvador*. Santa Ana: Universidad de El Salvador.
- American Society for Testing and Materials. (2016). *ASTM D698-12e2: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*. ASTM Internacional.
- ASTM International. (2021). *ASTM D-1557-12*.
- Correa Valderrama, E. (2017). EL rol de las vías terciarias en la construcción de un nuevo país. *Revista de Ingenierías*(45), 64-71.
- Díaz, L., & Archila, A. (2010). Determinación rápida de la susceptibilidad térmica del asfalto para el diseño de mezclas asfálticas en caliente. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*(80), 55-66.
- Eka Putri , E., Kameswara Rao, N., & Manam, M. (01 de 2010). Evaluation of the Modulus of Elasticity and Resilient Modulus for Highway Subgrades. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15, 1285-1293. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/228747739>
- Georgees, R., Hassan, R., Evans, R., & Jegatheesan, P. (2018). Resilient Response Characterization Pavement Foundation Materials Using a Polyacryamide-Base Stabilizer.

Journal of Materials in Civil Engineering, 30(1).

Huang, Y. (2004). *Pavement analysis and desing*. New Yersey: Pearson.

INVIAS. (2012). *INV E-142-13 Relaciones humedad – Peso unitario seco en los suelos (ensayo modificado de compactación)*.

INVIAS. (2012). *ART. 340 BASE ESTABILIZADA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA*.

INVIAS. (2012). *INV E-706-13 PENETRACIÓN DE LOS MATERIALES VITUMINOSOS*.

INVIAS. (2012). *INV E-152-13 COMPRESIÓN INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELOS*.

INVIAS. (2012). *INV E-156-13 MODULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS*.

INVIAS. (2012). *INV E-712-13 PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE MATERIALES BITUMINOSOS*.

INVIAS. (2012). *INV E-717-13 DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL ASFALTO EMPLEANDO UN VISCOSÍMETRO ROTACIONAL*.

INVIAS. (2012). *INV E-724-13 ÍNDICE DE PENETRACIÓN DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS*.

INVIAS. (2012). *INV E-786-13 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA (RTI) DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS*.

Muhammad Junaid et al. (2022). Investigating the Effect of Gradation, Temperature and Loading Duration on the Resilient Modulus of Asphalt Concrete. *Civil Engineering Journal* , 278-289.

- Ortega santos, H et,al. (2011). *Estado del arte de las emulsiones asfálticas en El Salvador*. SANTA ANA: UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.
- Peng Li, Juanyu Liu, & Stephan Saboundjian. (2011). *Materials and Temperature Effects on the Resilient Response of Asphalt-Treated Alaskan Base Course Materials*. JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING © ASCE .
- Pengcheng Fu, & John T. Harvey. (2007). Temperature sensitivity of foamed asphalt mix stiffness: field and lab study. *International Journal of Pavement Engineering*, 8(2), 137-145. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1080/10298430601149486>
- Pérez Rativa, L. N., & Vásquez Vanegas, L. A. (2020). *Estudio de una sub base granular estabilizada con geostab aplicado a vías terciarias*. Bogotá D.C.: UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.
- Read, J., & Whiteoak, D. (2015). *The Shell Bitumen Handbook*. London: Thomas Telford Publishing.
- Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. (11 de Julio de 2007). Comportamiento resiliente de materiales granulares en pavimentos flexibles: estadodel conocimiento. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 65-90.
- Ruiz Zambrano, D. L. (2019). *Influencia de la temperatura en el módulo resiliente de materiales granulares con diferentes proporciones de RAP (reclaimed asphalt pavement)*. Bogotá D.C: Universidad de Los Andes.
- Vergara, Pedro, et, al. (2014). Evaluación del potencial solar y eólico del campus centralde la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga, Colombia. *Colombia.Rev.UIS.Ingenierías*,vol13,n.2,p.p, 49-57.
- Zambrano Mesa, M et, al. (16 de Julio de 2020). Materiales granulares mejorados con emulsión

asfáltica catiónica para subbases de pavimentos. *Revista Infraestructura Vial / LanammeUCR, Vol 22, Numero 39*, págs. 29-42.