

Performance of an unpaved roads reinforced with geogrid: construction of a physical model in laboratory and numerical validation

Juan Gabriel Bastidas-Martínez ^a, Camilo Ernesto Herrera-Cano ^b & Howen Jair Bautista-Tapias ^b

^a Especialización en Ingeniería de Pavimentos, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia. jgbastidas@ucatolica.edu.co

^b Ingeniería civil, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia. ceherreira@ucatolica.edu.co, hjbautista06@ucatolica.edu.co

Received: December 26th, 2023. Received in revised form: February 9th, 2024. Accepted: February 20th, 2024.

Abstract

This study evaluated the mechanical behavior of a physical laboratory model of an unpaved route reinforced with a BG biaxial geogrid. To this end, 0.15 m of improvement material and 0.20 m of subgrade were compacted in a square box of 0.35 m. Tests were carried out with and without reinforcement, by applying 10000 dynamic load cycles on a universal machine. A frequency of 2.5 Hz and pressure of 560 kPa was used by a circular plate of 0.10 m in diameter, simulating the circulation of a tire of a simple wheel axis. The numerical validation for the Finite Elements Methods (MEF) defined parameters using the Hardening Soil model. As a great conclusion, it could be evidenced that reinforcement with a geogrid reduces approximately 45% the magnitude of the rutting, depending on the model, because the geogrid reduces the concentration of cutting stresses (relative τ) decreasing plastic deformation.

Keywords: geosynthetics; unpaved; reinforcement.

Desempeño de una vía no pavimentada reforzada con geomalla: construcción de un modelo físico en laboratorio y validación numérica

Resumen

Este estudio evaluó el comportamiento mecánico de un modelo físico laboratorial de una vía no pavimentada reforzada con una geomalla biaxial GB. Para tal fin, se compactaron 0.15 m de material de mejoramiento y 0.20 m de subrasante en una caja cuadrada de 0.35 m. Se realizaron ensayos con y sin refuerzo, mediante la aplicación de 10000 ciclos de carga dinámica en una maquina universal. Se utilizó una frecuencia de 2.5 Hz y presión de 560 kPa mediante una placa circular de 0.10 m de diámetro, simulando la circulación de una llanta de un eje rueda simple. La validación numérica vía Métodos de los Elementos Finitos (MEF) definió parámetros usando el modelo Hardening Soil. Como gran conclusión, se pudo evidenciar que el refuerzo con una geomalla reduce aproximadamente 45% la magnitud del ahuellamiento, según el modelo, debido a que la geomalla reduce la concentración de esfuerzos cortantes (τ relativo) disminuyendo la deformación plástica.

Palabras clave: geosintéticos; vía no pavimentada; refuerzo.

1. Introducción

En Colombia, la red vial está conformada aproximadamente por 205000 km, de las cuales el 70% corresponde a vías de bajo volumen de tránsito [1]. Esas vías se encuentran ubicadas principalmente en zonas rurales. Según datos del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), las

vías no pavimentadas presentan condiciones buenas, regulares y malas, en 12%, 38% y 50%, respectivamente [2]. Ante este panorama se busca estudiar nuevos materiales y tecnologías que contribuyan al fortalecimiento de las vías rurales, con el fin de mejorar las condiciones de circulación de vehículos para proporcionar mayor integración y crecimiento económico.

How to cite: Bastidas-Martínez, J.G., Herrera-Cano, C.E. y Bautista-Tapias, H.J. Desempeño de una vía no pavimentada reforzada con geomalla: construcción de un modelo físico en laboratorio y validación numérica DYNA, 91(231), pp. 153-162, January - March, 2024.

Actualmente, existen técnicas para la construcción o mejoramiento de vías de bajos volúmenes de tránsito [3, 4]. Las cuales buscan mejorar o estabilizar la subrasante o el tratamiento de materiales granulares. Algunas técnicas consisten en: utilización de geosintéticos [5–7], uso de materiales convencionales (p.e. cemento, cal, asfálticos) [8], uso de materiales no convencionales (p.e. sulfatos, silicatos, resinas, aceites sulfonatos, entre otros) [9–11] técnicas de electroósmosis, [12–14] uso de materiales alternativos (p.e. asfaltos naturales) [15–16], construcción de estructuras en placa huella [17], losas cortas [18–19], entre otras. La selección de una técnica depende de los requerimientos técnicos de los proyectos, disponibilidad de materiales, condiciones ambientales, costos de construcción, entre otros.

Los geosintéticos son materiales poliméricos sintéticos que se utilizan en obras geotécnicas. Existen diferentes tipos que se clasifican en: geotextiles, geomallas, geomembranas, geoceldas, geocompuestos, geonets, productos para control de erosión, entre otros [20]. El uso de geosintéticos proporciona beneficios en las características mecánicas e hidráulicas. Se caracterizan por incrementar la rigidez, resistencia a la tracción, lo cual proporciona mayor capacidad estructural [21]. Asimismo, son utilizados para la separación de capas, barreras, control de filtración, protección y como elementos de drenaje [22–25]. Se emplean ampliamente en la ingeniería de carreteras por su fácil aplicación durante la construcción [20,26]. Sus principales aplicaciones son: mejoramiento de subrasantes y materiales granulares, refuerzo de mezclas asfálticas, obras de drenaje, entre otros [27]. Adicionalmente, son amigables con el medio ambiente por reducir las cantidades de materiales naturales e impactos ambientales [21]

Los principales geosintéticos empleados en vías pavimentadas y no pavimentadas para mejoramiento de subrasante corresponden a: geomallas, geoceldas y geotextiles. Se caracterizan por proporcionar confinamiento lateral, incrementar la capacidad estructural, reducir el efecto de tensión de membrana y separación de capas. A nivel internacional, diversos estudios se han realizado a gran escala para evaluar el desempeño en pavimentos [28–31], a fin cuantificar variables y factores tales como: tránsito, clima, subrasante, materiales (p.e. materiales granulares, mezclas asfálticas), espesores, geometría, rigidez, profundidad/posición, entre otros [21]. A pesar de ser ampliamente estudiados a nivel internacional, mayores estudios se requieren para evaluar y cuantificar los efectos físico-mecánicos a nivel local.

Por lo anterior, el principal objetivo de este estudio consistió en realizar un modelo físico de una vía no pavimentada reforzada con una geomalla biaxial. Asimismo, se realizaron simulaciones numéricas con el fin de analizar la influencia de la respuesta mecánica de los suelos en presencia de una geomalla. La validación numérica incluyó la caracterización de los parámetros del modelo constitutivo Hardening Soil usando valores preestablecidos de ensayo de Índice de Soporte California, por sus siglas en inglés California Bearing Ratio (CBR). A partir de los resultados encontrados, se pretende realizar estudios adicionales

contemplando otros tipos de geosintéticos y materiales, que permitan validar metodologías mecánico empírico para el cálculo de espesores para vías pavimentadas y no pavimentadas.

2. Estado del arte

Diversos estudios se han realizado con el objetivo de analizar los beneficios de los geosintéticos vías pavimentadas y no pavimentadas [24,32,33]. Dicha eficiencia se determina mediante la relación de beneficio de tráfico por sus siglas en inglés TBR Traffic Benefit Ratio. El TBR es definida como la relación del número de ciclos de carga para el mismo ahuellamiento en una carretera reforzada sobre la no reforzada. Los valores típicos reportados en estudios indican que el TBR varían entre 2 y 16, dependiendo del tipo de suelo, características del geosintético, entre otros, [29,34]. Asimismo, Alimohammadi et al., [21] proponen un factor de equivalencia granular entre capas de pavimentos flexibles con y sin geomallas (GE). Lo anterior, basado en estudios experimentales con geomallas y la metodología de diseño AASHTO 1993, que reporta valores entre 1.78 y 10.56.

De forma general, mayores valores de TBR y GE indican mayor capacidad estructural del pavimento por influencia del geosintético, este parámetro indica mayor rigidez, resistencia a la deformabilidad (ahuellamiento) y mayor durabilidad, lo cual se puede traducir a menores espesores de materiales y consecuentemente menores costos de construcción.

En vías no pavimentadas, Leng and Gabr [28] construyeron un modelo físico compuesto por suelo de subrasante (85% arena y 15% caolín) y base granular a fin de ser sometido a carga cíclica. Se utilizaron 2 tipos de geomallas biaxiales de igual geometría y diferente rigidez. Se analizaron espesores de base de 15 cm - 25 cm y de subrasante de 90 cm - 75 cm, respectivamente. El modelo físico se construyó en una caja metálica de 1.50 m x 1.50 m de base y 1.35 m de altura. Los ensayos se realizaron aplicando 8000 ciclos de carga a una frecuencia de 0.67 Hz, empleando una carga de 40kN, presión de inflado de 550 kPa a través de una placa circular de diámetro 0.30 m. Los resultados indican que las geomallas contribuyen a reducir significativamente la deformación permanente. Mediciones de esfuerzos en la base granular con geomallas reportan menores valores en referencia al modelo no reforzado. Asimismo, las bases granulares reforzadas exhibieron menor degradación del módulo con la aplicación de ciclos de carga.

Palmeira & Antunes [29] analizaron el desempeño de una geomalla biaxial y un geotextil como refuerzo en vías no pavimentadas. Construyeron un modelo físico en una caja metálica de base cuadrada y altura de 1.6 m y 1.2 m, respectivamente. Fueron compactadas dos capas de 20 cm y 80 cm de base y subrasante, respectivamente. Se aplicó carga dinámica con presión de 556 kPa a frecuencia de 1 Hz en una placa circular de 0.30 m de diámetro. Se instrumentó la subrasante con celdas de carga y medidores de desplazamiento a profundidades de 0 m, 0.20 m y 0.40 m. En una primera etapa se aplicaron ciclos de carga hasta generar

ahuellamiento de 25 mm. En una segunda y tercera etapa se realizaron reparaciones y se aplicó nuevamente ciclos de carga para conseguir el mismo ahuellamiento. Los resultados indicaron que el modelo con geomalla soporte mayores ciclos de carga en las tres etapas en referencia al geotextil. Los valores de TBR para las tres etapas se encontraron en los rangos de 7.4 a 9.2 para la geomalla y 2.3 a 2.8 para el geotextil. Asimismo, se evidenció una reducción significativa de los esfuerzos verticales. Finalmente, análisis económicos indican que vías no pavimentadas con geomallas requieren menores costos de mantenimientos en referencia a las vías reforzadas con geosintéticos.

Qian et al., [25] estudiaron el desempeño en vías no pavimentadas reforzadas con geomallas triaxiales. Las geomallas triaxiales se caracterizan por distribuir esfuerzos de manera más uniforme. Para tal fin se construyó un modelo físico a gran escala en una caja metálica de base de 2.0 m y 2.2 m de ancho y largo, respectivamente. Se emplearon espesores de 15 cm, 23 cm y 30 cm de base granular, apoyados sobre un espesor de subrasante de 1.0 m. Fueron aplicados ciclos de carga empleando una placa circular de 0.3 m, carga de 40 kN, frecuencia de 0.77 Hz y presión de 550 kPa. Se instrumentó con medidores de desplazamiento en la superficie a 0, 25, 50 y 75 cm desde el punto de aplicación de carga. Los resultados evidencian mayor desempeño de los modelos con geomallas triaxiales en referencia al no reforzado. Los rangos de valores de TBR oscilan entre 1.0 a 13 para ahuellamientos de 25 y 75 mm, dependiendo de la relación modular entre capas (subrasante/base). La interacción entre las partículas de agregados con la geomalla triaxial reduce el efecto de tensión de membrana, lo cual incrementa la rigidez.

Palmeira & Gongora [35,36], analizaron la influencia de las características físicas de geomallas y geotextiles en vías no pavimentada. Fueron analizadas diferentes geomallas considerando diferentes aberturas, resistencia a la tracción, rigidez, entre otras. Para tal fin, construyeron un modelo físico circular (1.20 m de diámetro) compuesto de una capa de subrasante y material granular de 30 cm y 22.50 cm, respectivamente. Se realizó la aplicación de carga dinámica empleando una presión de 560 MPa a través un actuador a frecuencia de 1 Hz por medio de una placa circular de 0.2 m diámetro. Los resultados indicaron un incremento del TBR oscilando entre 1 y 121, dependiendo del tipo de geotextil. Los resultados determinaron correlaciones entre algunas características físicas de los geotextiles y el comportamiento mecánico. Sin embargo, la eficiencia del geosintético no depende directamente de su resistencia a la tracción, abertura y rigidez. Empleando el mismo modelo físico, Gongora & Palmeira [31] usaron agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición como material granular. Los resultados evidenciaron un alto potencial en el aprovechamiento de materiales reciclados para vías no pavimentadas reforzadas con geotextiles.

A partir de la literatura consultada, diversos investigadores realizaron la construcción de modelos físicos para simular vías no pavimentadas con diferentes geosintéticos, tipos de suelos, materiales granulares, espesores, entre otros. Algunos emplearon cajas (cuadradas o rectángulos) o tanques

circulares para conformar diferentes estructuras. En todos los casos, se aplicaron condiciones similares de carga simulando el paso de eje estándar de diseño de 80 kN, presión de inflado, magnitud y tamaño del área de aplicación de carga, entre otros. De igual forma, se instrumentaron los modelos físicos con el objetivo de cuantificar esfuerzos y desplazamientos superficiales. De forma general, los resultados indicaron que existe un beneficio por la presencia de los geosintéticos. Sin embargo, no existe un consenso en valores de la eficiencia de los geotextiles, dado que los rangos de TBR son amplios. Así, mayores estudios son requeridos con el fin de proporcionar adecuadamente los criterios de selección de geosintéticos, basado en su eficiencia, características físicas y mecánicas de suelos, materiales granulares, tránsito, clima, entre otras.

3. Materiales y métodos

3.1 Materiales

3.1.1 Geomalla biaxial

La geomalla biaxial utilizada para el refuerzo de la vía no pavimentada fue suministrada por la empresa Pavco Wavin y es de común uso en obras de infraestructura de la ciudad de Bogotá (Ver Fig. 1). En la Tabla 1 se presentan los principales ensayos de caracterización de la geomalla.



Figura 1. Geomalla biaxial.
Fuente: Autores.

Tabla 1.
Características de la geomalla biaxial 20X20.

Características	Procedimiento de medición	Resultado
Abertura (mm)	Manual	20
Espesor de costilla (mm)	Manual	2.3 a 3.1
Rigidez radial (kN/m)	ISO 10319	380
Rigidez última a la tensión (kN/m)	ASTM D6637	20
Rigidez flexural (mg.cm)	ASTM D7748	700000
Rigidez torsional J (cm.kg/deg)	GRI GG9	3.3
Resistencia a la degradación UV (%)	ASTM D4355/D6637	90
Resistencia a los daños químicos (%)	EPA 9090A	100

Fuente: Autores.

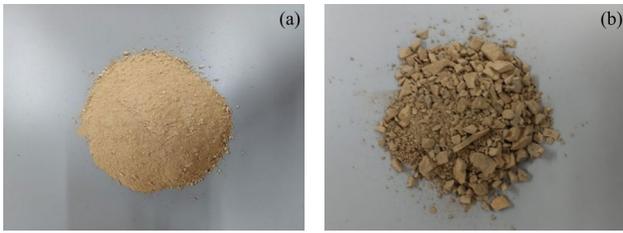


Figura 2. Materiales para pavimentos: a) Suelo de subrasante, b) material granular.
Fuente: Autores.

Tabla 2.
Características físicas del suelo de subrasante y material de mejoramiento.

Parámetros	Suelo de subrasante	Material de mejoramiento
D ₁₀ (mm)	0.15	1.2
D ₃₀ (mm)	0.36	4.7
D ₆₀ (mm)	1.1	19
Coefficiente de uniformidad	7.3	15.8
Coefficiente de curvatura	0.8	1.0
Contenidos Finos (%)	8.3	5.6
Límite Líquido (%)	86	26.9
Límite Plástico (%)	10.2	12.2
Índice de Plasticidad (%)	75.8	14.7
Índice de Grupo	0	0
Clasificación AASTHO	A-2-5	A-2-6
Clasificación SUCS	SW-SC	GW-CL
Contenido de humedad óptima (%)	14.5	8.5
Peso Unitario Máximo seco (kN/m ³)	18.3	20.6
PDC (mm/golpe)	30.8	14.98
California Bearing Ratio CBR (%)	7.6	14.4

Fuente: Autores.

3.1.2 Suelo de subrasante y material de mejoramiento

La subrasante del pavimento corresponde a un suelo de la ciudad de Bogotá (ver Fig. 2a). Para la capa de mejoramiento un material granular (ver Fig. 2b). Fueron realizados ensayos de caracterización física, tales como: determinación del tamaño de las partículas INV-E 123 2013, límite líquido (LL) INV-E 125 2013, límite Plástico (LP) relación de humedad-peso unitario seco (ensayo de compactación energía normal) INV-E 142 2013 e Índice de Soporte California (CBR) INV-E 148 2013. Los resultados de los ensayos para el suelo y el material granular se presentan en las Tablas 2 y 3, respectivamente. A partir de los resultados, el suelo y el material granular se clasifican en los grupos A-2-5 y A-2-6 según el sistema de la AASTHO, respectivamente.

3.2 Construcción del modelo físico

La construcción del modelo físico se realizó con el objetivo de simular una estructura de pavimento unicapa. Esa estructura se compone de una capa de subrasante y una capa de material de mejoramiento. En la interfaz entre las capas se consideró la presencia y ausencia de la geomalla biaxial como material de refuerzo. Para construcción de las capas, se procedió a construir una caja metálica abierta cuadrada de 0.35 m por cada lado. Dicha caja se realizó con acero

inoxidable calibre 12, el cual corresponde a un espesor aproximado de 2.75 mm. En la Fig. 3 se presentan el modelo físico y el equipo para la aplicación de la carga dinámica cíclica.

En la construcción del modelo físico se utilizaron los resultados de los ensayos de compactación. A partir de la máxima densidad húmeda obtenida en el Proctor, se calculó la masa húmeda para completar el volumen de cada material (Ecu. 1). Donde $M_{húmeda}$ y $\gamma_{húmeda}$ corresponden a la masa en kg y densidad húmeda en kg/m³ de cada material, respectivamente; V es el volumen geométrico en m³. Fueron adoptados espesores de 20 cm y 15 cm para la subrasante y subbase granular.

$$M_{húmeda} = \gamma_{húmeda} \cdot V \tag{1}$$

El número de capas y de golpes para la compactación de los materiales fueron determinados a partir de la energía de compactación Proctor, conforme a (Ecu. 2). Donde E corresponde a la energía de compactación en kN-m/m³; n y N equivale a los números de capas y de golpes/capa, respectivamente; W y H al peso y altura de caída del martillo en kN y m, respectivamente y V equivale al volumen del cilindro o modelo físico en m³.

$$E = \frac{n \cdot N \cdot W \cdot H}{V} \tag{2}$$

En la compactación del modelo físico, se subdividió en 4 y 6 subcapas la subrasante y el material de mejoramiento. Se utilizaron los mismos martillos empleados en los ensayos de compactación Proctor.

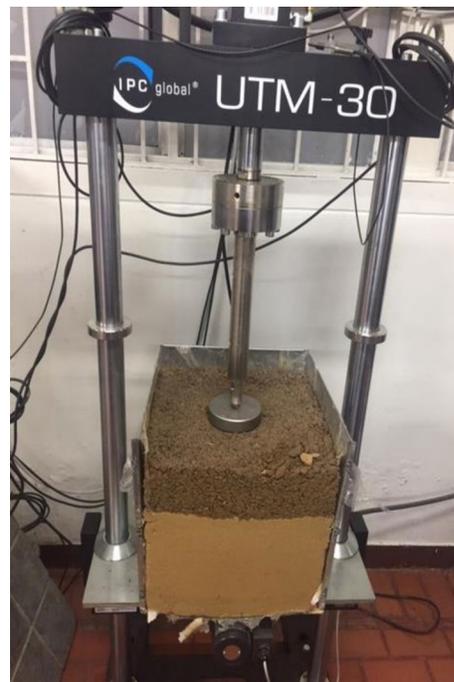


Figura 3. Modelo físico de laboratorio.
Fuente: Autores.

Tabla 3. Variables para la energía de compactación.

Material	Suelo de subrasante		Material de mejoramiento	
	Normal		Modificada	
Tipo de energía	Ensayo	Modelo físico	Ensayo	Modelo físico
Compactación				
Numero de golpes/capa	25	331	56	270
Número de capas	3	4	5	6
Altura de caída (m)	0.30	0.45	0.30	0.45
Peso del martillo (kN)	0.02	0.02	0.04	0.04
Volumen (m ³)	0.00093	0.025	0.00212	0.018
Energía (KN-m/m ³)	595	595	1764	1764

Fuente: Autores.



Figura 4. Construcción del modelo físico: a) protección de la caja metálica; b) colocación la subrasante; c) compactación de la primera capa de subrasante; d) compactación subrasante; e) colocación de la geomalla; f) colocación del material de mejoramiento.

Fuente: Autores.

En la Tabla 3 se presentan los valores de energía de compactación para cada modelo físico.

Para garantizar la humedad óptima de compactación, los materiales fueron secados en un horno a temperatura de 60°C durante 24 horas. Posteriormente, se adicionó la cantidad de agua suficiente para alcanzar la humedad óptima de compactación. Estudios previos indican que el secado de los materiales a temperaturas mayores de 60°C puede originar cambios significativos en la estructura, composición química y mineralógica. Adicionalmente, en la interfaz entre la caja metálica con los materiales se colocó papel vinipel para reducir la fricción entre materiales según recomendaciones de [35,36]. En la Fig. 4 se presenta la metodología en laboratorio para la construcción del modelo físico. Es decir, la compactación de la subrasante, colocación de la geomalla y compactación de la capa de mejoramiento.

Luego de construir los modelos físicos (con y sin geomalla), se colocó en una Máquina Universal de Ensayo (UTM) para la realización del ensayo. Se aplicó una carga dinámica de manera cíclica a través de una placa metálica circular de 0.1 mm de diámetro. Se aplicó una presión de contacto de 560 kPa y una carga de 4.4 kN. La frecuencia de carga correspondió a 2.5 Hz, lo cual equivale a que, durante 1 ciclo de carga, el periodo de carga corresponde al 40% y el periodo de descarga al 60%. Dicha frecuencia representa la velocidad real de un vehículo a una velocidad entre 30 a 40 km/hora, lo cual es común en las vías terciarias. Fueron aplicados 10000 ciclos de carga con el objetivo de analizar el ahuellamiento en el tiempo.

La eficiencia de la geomalla como refuerzo en una vía sin pavimento se puede cuantificar mediante la *TBR*, definido en (Ecu. 3), donde N_r y N_u corresponden al número de ciclos de carga para el mismo ahuellamiento en una carretera reforzada y no reforzada, respectivamente. Para este estudio, *TBR* se determinó para 10 mm.

$$TBR = \frac{N_r}{N_u} \tag{3}$$

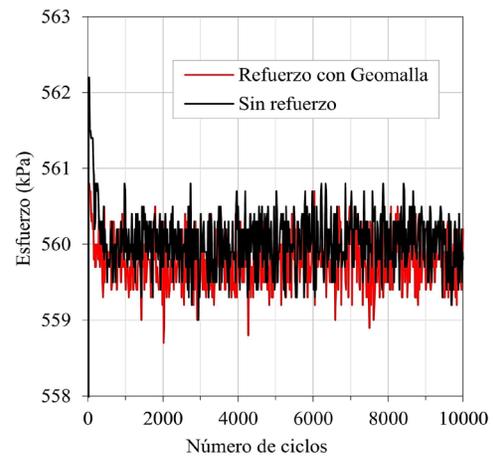


Figure 5. Variación del esfuerzo aplicado con el número de ciclos. Fuente: Autores.

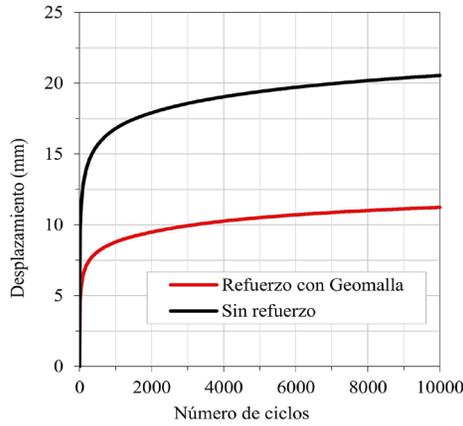


Figure 6. Variación del desplazamiento con el número de ciclos. Fuente: Autores.

4. Resultados experimento físico

Resultados del esfuerzo aplicado y el desplazamiento con el número de ciclos para los dos modelos físicos se presentan en las Figs. 5 y 6, respectivamente.

El esfuerzo promedio para los dos modelos corresponde a 560 kPa. Sin embargo, la diferencia entre el mayor y menor esfuerzo corresponde a 2.0 kPa y 3.2 kPa para el modelo reforzado y no reforzado, respectivamente. Lo anterior, puede indicar que el modelo reforzado presenta mayor acomodo de partículas en referencia al modelo sin refuerzo, dado que se presenta menor variabilidad en el esfuerzo aplicado. Por otro lado, el modelo con geomalla presentó mayor resistencia al ahuellamiento en referencia al modelo no reforzado. Ese comportamiento fue evidenciado para todos los ciclos de carga aplicados. Los incrementos de la resistencia al ahuellamiento para 1000, 2000, 3000, 5000 y 10000 ciclos de carga corresponden al 47.7%, 47.0%, 46.5%, 45.9% y 45.3%, respectivamente. En términos del ahuellamiento, los desplazamientos finales para los modelos con y sin refuerzo corresponden a 11.2 y 20.5 mm, respectivamente. Lo anterior evidencia que la geomalla aporta rigidez y capacidad estructural. Según [21], ese comportamiento es proporcionado por el incremento del confinamiento lateral producto de la interacción materiales-geosintético. Finalmente, los resultados indican que para producir un ahuellamiento de 10 mm se requiere de aproximadamente 33 y 3185 repeticiones de carga para el modelo sin y con geomalla, respectivamente. Lo que lleva a obtener un valor de 138 para el TRB. Valores típicos de TBR para diseño de pavimentos oscilan entre 2 y 16, dependiendo del tipo de suelo, geosintéticos, entre otros. Aunque [25] señala que los TBR resultantes de ensayos experimentales en el laboratorio no debe usarse directamente para el diseño de pavimentos. Por lo anterior, mayores estudios se deben realizar para establecer valores de diseño, basados en calibraciones locales para Colombia. Dichos estudios deberán incluir modelaciones numéricas que validen la caracterización de parámetros mecánicos de los suelos.

5. Simulación matemática con Método de Elementos Finitos (FEM)

El modelado numérico del ensayo físico abarca tres etapas metodológicas. La primera etapa correspondió a la selección del modelo constitutivo y determinación de los parámetros mecánicos de cada elemento. La segunda etapa corresponde a la definición de la geometría y de la secuenciación de la simulación. Finalmente, la tercera etapa corresponde a la interpretación de los resultados numéricos la luz del análisis del ahuellamiento en el experimento a escala.

Caracterización mecánica: Se escogió el modelo Hardening Soil (HS) para los suelos granulares [37], y elástico lineal para las paredes de la caja y la geomalla. Así, los parámetros mecánicos del modelo HS de los suelos se realizó implementando los siguientes criterios propuestos (Ecu 4 a 6), donde E_{50} , E_{edo} , E_{ur} corresponden al módulo elástico obtenido con el 50% de carga de ruptura, modulo edometrico y módulo de descarga en MPa, respectivamente. Asimismo, M_r , corresponde al Modulo resiliente en MPa.

$$E_{50} = 0.66M_r \tag{4}$$

$$E_{edo} = 1.15E_{50} \tag{5}$$

$$E_{ur} = 2E_{50} \tag{6}$$

El módulo resiliente de cada suelo fue obtenido a partir de la siguiente correlación con el CBR (Ecu 7), la cual aplica para materiales densificados-remodelados en laboratorio [38], donde PDC corresponde a la pendiente de la curva del ensayo del penetrómetro dinámico de cono según INVIAS 172 de 2013.

$$CBR = 10^{2.182-0.872Log(PDC)} \tag{7}$$

A partir de la caracterización física e implementación de las Ecuaciones 4 a 7 fueron calculados los parámetros del modelo, los cuales se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros Hardening Soil Model para los suelos

Parámetros	Suelo de subrasante	Material de mejoramiento
Modelo Constitutivo	Hardening Soil	Hardening Soil
PDC (mm/golpe)	30.8	14.9
CBR (%)	7.6	14.4
M_r (MPa)	79.2	149.2
E_{50} (MPa)	52.3	98.4
E_{edo} (MPa)	60.1	113.2
E_{ur} (MPa)	104.5	196.9
Exponente m	0.5	0.5
Poisson (v)	0.33	0.33
Angulo de fricción ϕ (°)	30	45
Dilatancia $\Delta\phi$ (°)	0.0	0.0
Cohesión c' (kPa)	7.3	0.0
Relación de sobreconsolidación Over Consolidation Ratio OCR	5.0	3.0

Fuente: Autores.

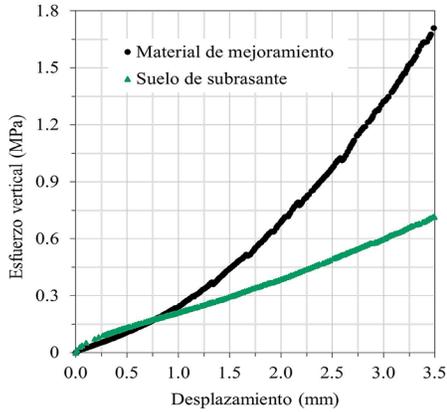


Figure 7. Simulación ensayo CBR parámetros Hardening Soil Model
Fuente: Autores.

Tabla 5.
Parámetros numéricos materiales adicionales

Parámetros	Paredes de la caja	Área de aplicación de carga	Geomalla
Tipo de elemento	plates	plates	geogrids
Modelo constitutivo	Elástico lineal	Elástico lineal	Elástico Lineal
Módulo Axial EA (N/mm)	3.0×10^7	7.0×10^8	20.0
Módulo a flexión EI (N mm ² /mm)	6.3×10^7	5.83×10^9	--
Poisson v	0.33	0.33	--

Fuente: Autores.

Se realizó una validación de los parámetros adoptados mediante la implementación de un ensayo numérico de CBR bajo condiciones drenadas [39], [40]. El resultado se presenta en la Fig. 7. A partir de la simulación, se obtuvo un CBR a 2.54 mm de 14.53% y de 7.27% para el material de mejoramiento y la subrasante, respectivamente.

Los parámetros mecánicos para las paredes de la caja, la placa circular para la aplicación de carga y geomalla se presentan en la Tabla 5.

Creación del modelo numérico: Se implementó un modelo numérico FEM usando el programa PLAXIS 2D en condiciones axi-simétricas. La geometría correspondió a un cilindro con dimensiones 175 mm de radio y 350 mm de altura. En el borde lateral e inferior externo se contempló un elemento de borde (paredes de la caja). La carga fue aplicada sobre un elemento circular para la aplicación de carga de 0.10 m, en una porción inicial de 15 mm con magnitud 6.2 MPa, simulando el pistón del equipo. La geomalla se alejó 10 mm de la pared para evitar interferencia con la interfaz parde caja-materiales. De esta manera se garantiza la aplicación al mejoramiento de la presión de 560 kPa. El enmallado consistió en 4511 elementos triangulares de 15 nodos con tamaño promedio de 5.4 mm. No se implementó la interfaz del geotextil con el material de mejoramiento, dado que se considera que la trabazón de los granulares alejan la superficie de falla por fuera de la geomalla [41]. La geometría del modelo numérico del modelo físico se presenta en la Fig.

8. El modelado del experimento del ahuellamiento consistió en una fase inicial tipo gravedad incremental para considerar una distribución de esfuerzos relacionada con la pared vertical de acrílico, la cual es una superficie libre. Seguida la fase inicial, siguieron dos ciclos de carga-descarga en condiciones monotónicas-estáticas drenadas.

Resultados del modelo numérico: En la Fig. 9 se presenta la curva esfuerzo desplazamiento de los dos ciclos de carga para el modelo físico con y sin geomalla. Considerando que el primer ciclo de carga es una etapa de establecimiento elastoplástico, en este estudio se considera que el segundo ciclo de carga-descarga consiste de un comportamiento resiliente. Para el caso del según ciclo de carga, el aporte en la deformación permanente es de 5.58×10^{-2} mm/ciclo y 3.47×10^{-2} mm/ciclo, para los casos sin refuerzo y con refuerzo respectivamente. Estas velocidades de ahuellamiento son coherentes con cien ciclos de carga en el experimento físico en el laboratorio. Lo que implica una reducción del 38% en la velocidad del ahuellamiento con la inclusión de la geomalla. Este incremento es coherente con el experimento físico en donde la mediana de la reducción de la rata del ahuellamiento es de 36.4%.

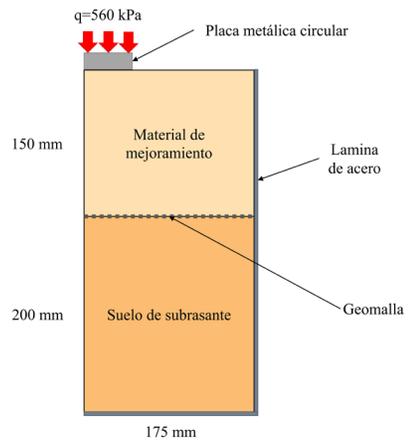


Figura 8. Geometría del modelo numérico FEM de la caja experimental
Fuente: Autores.

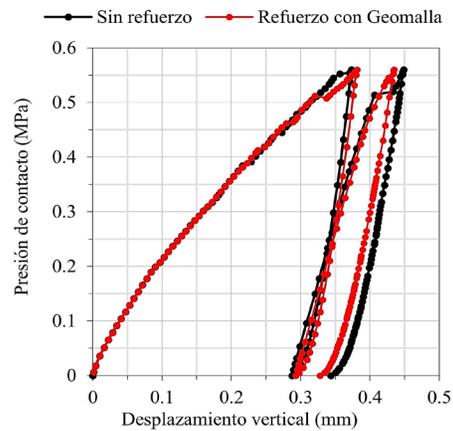


Figura 9. Resultados modelado numérico dos ciclos de carga
Fuente: Autores.

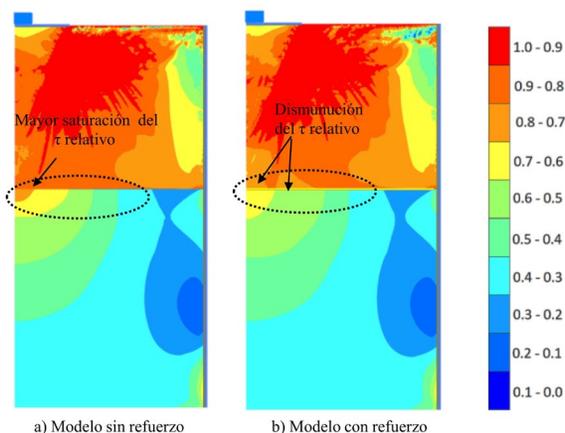


Figura 10. Distribución del τ relativo modelado FEM
Fuente: Autores.

El aumento en la resistencia a la deformación permanente debido a la inclusión de la geomalla puede ser entendido a partir de la distribución del τ relativo. El cual se define como relación entre el esfuerzo cortante movilizado con respecto a la resistencia disponible. La Fig. 10 presenta la distribución de los resultados de las modelaciones sin refuerzo y con la geomalla. Se puede verificar visualmente que la mayor concentración del τ relativo corresponde al caso no reforzado. En este caso, se presenta un τ relativo hasta el 80% en la subrasante debajo de la carga, justo en el contacto con el material de mejoramiento. Mientras que el modelo reforzado, el τ relativo no supera el 70%.

Por otro lado, la presencia del geotextil también disminuye la magnitud del τ relativo en el material de mejoramiento: hacia la base del estrato gravoso, el τ relativo pasa de 80-90% sin refuerzo a 70-80% con refuerzo. La concentración de esfuerzos cortantes es uno de los parámetros que controla la predicción del ahuellamiento en materiales granulares [42 - 43].

6. Conclusiones

Este estudio evaluó el comportamiento mecánico de un modelo físico en laboratorio de una vía no pavimentada compuesto por una capa de material granular apoyada en una subrasante reforzada con una geomalla biaxial GB. La cual fue sometida a la aplicación de 10000 ciclos de carga dinámica en una máquina universal. A partir de los resultados obtenidos, es posible concluir:

La geomalla como material de refuerzo aumenta considerablemente la resistencia a la deformación permanente y reduce consecuentemente el ahuellamiento en aproximadamente 45% comparado al modelo sin refuerzo. Lo cual evidencia una alta eficiencia del geosintético. Según la literatura, lo anterior es atribuido al incremento del confinamiento lateral, lo cual proporciona mayor capacidad estructural y reduce el efecto de tensión membrana.

La validación numérica permitió la verificación de los efectos que tiene la geomalla en el modelo físico. El análisis por elementos finitos incluye criterios para la determinación de los parámetros Hardening Soil. El modelado numérico permite encontrar la distribución del tau relativo (τ relativo), siendo menor para el caso reforzado. A menor τ relativo se presenta menor deformación plástica acumulada en cada ciclo. Este efecto redonda en una disminución del ahuellamiento.

Los resultados presentados en este estudio son válidos únicamente para el tipo de geomalla, de suelo, de material granular y las condiciones de carga empleadas. Nuevos estudios se recomiendan con el objetivo de establecer correlaciones entre las características físicas de diferentes geomallas y geotextiles con los parámetros geotécnicos de los suelos y los materiales. Así como analizar diferentes materiales granulares convencionales y alternativos (p.e. Residuos de demolición y construcción, material asfáltico reciclado (Reclaimed Asphalt Pavement RAP), residuos industriales, entre otros).

Agradecimientos

Los autores agradecen a la dirección central de Investigación de la Universidad Católica de Colombia por el financiamiento del proyecto de investigación CON0000557.

Referencias

- [1] Ministerio de Transportes., Anuario Nacional de Transporte, Colombia, Transporte en cifras 2021, Colombia, 2021, 123 P.
- [2] INVIAS Instituto Nacional de Vías. Estado de la red vial [en Línea], Estado de la red vial no pavimentada, Bogotá, Colombia, 2023. [Consulta, 18 de noviembre de 2023]. Disponible en: <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/2-principal/57-estado-de-la-red-vial>.
- [3] Jones, D., and Surdahl, R., New procedure for selecting chemical treatments for unpaved roads. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2433, pp. 87–99, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3141/2433-10>
- [4] Bushman, W., Freeman, T., and Hoppe, E., Stabilization techniques for unpaved roads. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1936(1), pp. 28–33, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198105193600104>
- [5] Keller, G., Application of geosynthetics on low-volume roads. Transportation Geotechnics, 8, pp. 119–131, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.04.002>
- [6] Latha, G., Nair, A., and Hemalatha, M., Performance of geosynthetics in unpaved roads. International Journal of Geotechnical Engineering, 4(3), pp. 337–349, 2010. DOI: <https://doi.org/10.3328/IJGE.2010.04.03.337-349>
- [7] Hufenus, R., Rueegger, R., Banjac, R., Mayor, P., Springman, S.M., and Brönnimann, R., Full-scale field tests on geosynthetic reinforced unpaved roads on soft subgrade. Geotextiles and Geomembranes, 24(1), pp. 21–37, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2005.06.002>
- [8] Haghsheno, H., and Arabani, M., The effect of primary stabilizers for stabilization/solidification of oil-polluted soils—a review. Environmental Technology Reviews, 12(1), pp. 337–358, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/21622515.2023.2215460>
- [9] Abdeldjoud, L., Asadi, A., Nahazanan, H., Huat, B., Dheyab, W., and Elkhebu, A., Effect of clay content on soil stabilization with alkaline activation. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 5 (1), pp. 1–8, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40891-019-0157-y>

- [10] Behnood, A., Soil and clay stabilization with calcium- and non-calcium-based additives: a state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques. *Transportation Geotechnics*, 17, pp. 14–32, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.08.002>
- [11] Gilazghi, S., Huang, J., Rezaeimalek, S., and Bin-Shafique, S., Stabilizing sulfate-rich high plasticity clay with moisture activated polymerization. *Engineering Geology*, 211, pp. 171-178, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.07.007>
- [12] Liu, Y., Xie, X., Zheng, L., and Li, J., Electroosmotic stabilization on soft soil: experimental studies and analytical models (A historical review). *International Journal of Electrochemical Science*, 13(9), pp. 9051–9068, 2018. DOI: <https://doi.org/10.20964/2018.09.40>
- [13] Martin, L., Alizadeh, V., and Meegoda, J., Electro-osmosis treatment techniques and their effect on dewatering of soils, sediments, and sludge: a review. *Soils and Foundations*, 9(2), pp. 407–418, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.12.015>
- [14] Kherad, M., Vakili, A., Selamat, M., Salimi, M., Farhadi, M., and Dezh, M., An experimental evaluation of electroosmosis treatment effect on the mechanical and chemical behavior of expansive soils. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(6), pp. 1-12, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5266-3>
- [15] Rondón-Quintana, H., Ruge-Cárdenas, J., and Zafra-Mejía, C., Natural asphalts in pavements: review. *Sustainability*, 15(3), pp. 1-22, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15032098>
- [16] Ghanizadeh, A., and Jahanshahi, F., A case study on potential use of stabilized mine overburden wastes as pavement materials. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, pp. 1-35, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40515-023-00307-0>
- [17] Bastidas-Martínez, J.G., and Ruge, J.C., Structural evaluation of pavement thickness in Plain-concrete strip road. en: Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería, Conference Proceedings, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/CONIITI57704.2022.9953590>
- [18] Roesler, J.R., Cervantes, V.G., and Amirkhani, A.N., Accelerated performance testing of concrete pavement with short slabs. *International Journal of Pavement Engineering*, 13(6), pp. 494–507, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.575134>
- [19] Salsilli, R., Wahr, C., Delgadillo, R., Huerta, J., and Sepúlveda, P., Field performance of concrete pavements with short slabs and design procedure calibrated for Chilean conditions. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(4), pp. 363–379, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.943129>
- [20] Zornberg, J.G., Functions and applications of geosynthetics in roadways. *Procedia Engineering*, 189, pp. 298–306, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.048>
- [21] Alimohammadi, H., Zheng, J., Schaefer, V.R., Siekmeier, J., and Velasquez, R., Evaluation of geogrid reinforcement of flexible pavement performance: a review of large-scale laboratory studies. *Transportation Geotechnics*, 27, art. 100471, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100471>
- [22] Deb, K., Samadhiya, N.K., and Namdeo, J.B., Laboratory model studies on unreinforced and geogrid-reinforced sand bed over stone column-improved soft clay. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(2), pp. 190–196, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2010.06.004>
- [23] Das, B.M., Use of geogrid in the construction of rail roads. *Innovative Infrastructure Solutions*, 1(1), pp. 1–15, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41062-016-0017-8>
- [24] Gu, F., Luo, X., Luo, R., Lytton, R.L., Hajj, E.Y., and Siddharthan, R.V., Numerical modeling of geogrid-reinforced flexible pavement and corresponding validation using large-scale tank test. *Constr Build Mater*, 122, pp. 214–230, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.081>
- [25] Qian, Y., Han, J., Pokharel, S.K., and Parsons, R.L., Performance of triangular aperture geogrid-reinforced base courses over weak subgrade under cyclic loading. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(8), pp. 1013–1021, 2013. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)jmt.1943-5533.0000577](https://doi.org/10.1061/(asce)jmt.1943-5533.0000577)
- [26] Roodi, H., Zornberg, J.G., Aboelwafa, M.M., Phillips, J.R., Zheng, L., and Martínez, J., Soil-Geosynthetic interaction test to develop specifications for geosynthetic-stabilized roadways (FHWA 5-4829-03-1) FHWA 5-4829-03-1, EE. UU, [online], 2017. [Consulted, November 18th of 2023]. Available at: <http://library.ctr.utexas.edu/ctr-publications/5-4829-03-1.pdf>
- [27] Rueda, E.J., Bastidas-Martínez, J.C., Ruge, J.C., Alayón, Y., and Olivos, J., Laboratory analysis of an asphalt mixture overlay reinforced with a biaxial geogrid. *Coatings*, 13(1), pp. 1-12, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings13010099>
- [28] Leng, J., and Gabr, M.A., Characteristics of Geogrid-Reinforced Aggregate Under Cyclic Load, *Transportation Research Record*, 1786(1), pp. 29-35, 2002. DOI: <https://doi.org/10.3141/1786-04>
- [29] Palmeira, E.M., and Antunes, L.G., Large scale tests on geosynthetic reinforced unpaved roads subjected to surface maintenance. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(6), pp. 547–558, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2010.03.002>
- [30] Mekkawy, M.M., White, D.J., Suleiman, M.T., and Jähren, C.T., Mechanically reinforced granular shoulders on soft subgrade: laboratory and full scale studies. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(2), pp. 149–160, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2010.10.006>
- [31] Góngora, I.A., and Palmeira, E.M., Influence of fill and geogrid characteristics on the performance of unpaved roads on weak subgrades. *Geosynth Int*, 19(2), pp. 191–199, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1680/gein.2012.19.2.191>
- [32] Nair, A.M., and Latha, G.M., Repeated load tests on geosynthetic reinforced unpaved road sections. *Geomechanics and Geoengineering*, 11(2), pp. 95–103, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/17486025.2015.1029012>
- [33] Zadehmohamad, M., Luo, N., Abu-Farsakh, M., and Voyiadjis, G., Evaluating long-term benefits of geosynthetics in flexible pavements built over weak subgrades by finite element and Mechanistic-Empirical analyses. *Geotextiles and Geomembranes*, 50(3), pp. 455–469, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2022.01.004>
- [34] Koerner, R.M., *Designing with Geosynthetics*, 1994.
- [35] Palmeira E.M., and Góngora, I.A.G., Assessing the influence of some soil–reinforcement interaction parameters on the performance of a low fill on compressible subgrade. Part I: fill performance and relevance of interaction parameters. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2(1), pp. 455–469, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40891-015-0041-3>
- [36] Góngora, I.A.M., and Palmeira, E.M., Assessing the influence of soil–reinforcement interaction parameters on the performance of a low fill on compressible subgrade. Part II: influence of surface maintenance. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2(1), pp. 1–12, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40891-015-0042-2>
- [37] Schanz, T., Vermeer P.A., and Bonnier P.G., The hardening soil model: formulation and verification. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics - 10 Years of Plaxis*, 1, pp. 1–16, 2000.
- [38] Feleke, G.G., and Araya, A.A., Prediction of CBR using DPC for locate subgrade materials. *International Conference on Transport and Road Research*, 2016, pp. 1–25.
- [39] Narzary, B.K., and Ahamad, K.U., Estimating elastic modulus of California bearing ratio test sample using finite element model. *Constr. Build Mater*, 175, pp. 601–609, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.228>
- [40] Marroquín, J.S.C., Maldonado, V.A.B., and Cano, C.E.H., Numerical simulation of the CBR test for subgrades in the city of Bogotá. in: *2022 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONIITI)*, Bogotá, Colombia, 2022, pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/CONIITI57704.2022.9953599>
- [41] Jewell, R.A., Partners, B., and Milligan, G.W.E., Interaction between soil and geogrids. In *polymer grid reinforcement*. Thomas Telford Limited, 1, pp. 18–30, 1984.
- [42] Puppala, A.J. Saride, S., and Chomtid, S., Experimental and modeling studies of permanent strains of subgrade soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(10), pp. 1379–1389, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1061/ASCEGT.1943-5606.0000163>
- [43] Qui, Y., Dennis, N.D., and Elliott, R.P., Design criteria for permanent deformation of subgrade soils in flexible pavements for low-volume roads. *Soils and Foundations*, 40, pp. 1–10, 2000.

J.G. Bastidas-Martínez, es Ing. Civil en 2010, de la Universidad del Cauca Colombia. MSc. en Geotecnia en 2014, y Dr. en Geotécnica en 2017 de la Universidad de Brasilia, Brasil. Premio Nacional de Ingeniería Diodoro Sanches, otorgado por la Sociedad Colombiana de Ingenieros en 2021. Actualmente trabaja como profesor Asociado en la Universidad Católica de Colombia.
ORCID: 0000-0002-6818-0322.

C.E. Herrera-Cano, es Ing. Civil en 2005 de la Universidad Industrial Santander, Colombia. MSc. en Ingeniería de la Universidad de los Andes en

2012, y Dr. en Ingeniería de la Universidad de los Andes, Colombia en 2021. Consultor en geotecnia y pavimentos. Actualmente trabaja profesor Asistente en la Universidad Católica de Colombia.
ORCID: 0000-0002-4154-8705.

H.J. Bautista-Tapias, es Ing. Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Colombia, 2023.
ORCID 0009-0008-9899-6083.