

Modelación Elástica Tridimensional de una Estructura de Pavimento Flexible Compuesta por  
Materiales Granulares Marginales

Karen Julieth Valbuena Martínez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Civil

Director

Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

Doctorado en Ingeniería del Terreno Cartográfica y Geofísica

Codirector

Brayan Andrés Velásquez Bueno

Ingeniero Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Físico-mecánicos

Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

A Dios y la Virgen María por darme las habilidades, el conocimiento y la perseverancia para poder llegar a esta meta en mi vida.

A mis profesores que estuvieron dispuestos a todo tipo de orientación y colaboración para el desarrollo de este proyecto y crecimiento personal.

A mi madre y padre, a mi compañero de vida y a mis hijos por estar siempre apoyándome durante este camino, alentándome a seguir adelante, siempre queriendo que yo cumpla cada una de mis metas propuestas.

### **Agradecimientos**

A la Universidad Industrial de Santander, por permitir la culminación de esta meta, como miembro de esta importante institución.

A mi director y codirector de trabajo de grado por su acompañamiento y apoyo incondicional en el desarrollo del proyecto y todos sus consejos y recomendaciones.

A cada uno de los docentes, por toda su orientación, todo lo aprendido durante mi formación y camino para poder optar por el título de Profesional de Ingeniera Civil.

A mi familia por su apoyo incondicional y motivación constante.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	13
1. Objetivos .....	15
1.1 Objetivo General .....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Metodología .....	16
2.1 Parámetros de respuestas estructurales en el pavimento flexible .....	17
2.1.1 Deflexión.....	18
2.2 Metodología de elementos finitos .....	18
2.3 Parámetros de diseño .....	19
2.4 Modelos de referencia.....	21
2.4.1 Definición de geometría.....	22
3. Resultados y discusión .....	26
3.1 Determinación del tamaño de elementos óptimo para el enmallado .....	27
3.2 Comportamiento de los parámetros de diseño estructural ante la variación del módulo de elasticidad de las capas estructurales de pavimento.....	29
3.2.1. Influencia del módulo de elasticidad del concreto asfáltico y base granular sobre los parámetros de diseño estructural.....	29
3.2.2. Influencia del módulo de elasticidad en la carpeta asfáltica y de la subbase granular sobre los parámetros de diseño estructural .....	34
3.2.3. Comportamiento de los parámetros de diseño estructural ante la variación de los espesores de la estructura de pavimento. ....	39

3.3.	Grado de sensibilidad de las variables de los parámetros de diseño estructural.....	44
4.	Conclusiones.....	46
	Referencias Bibliográficas.....	49

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Deformaciones y deflexiones admisibles para los modelos estructurales.</i> .....	17
Tabla 2 <i>Rango de variación espesor de capa</i> .....	20
Tabla 3 <i>Rangos de variación módulo de elasticidad capas de pavimento</i> .....	20
Tabla 4 <i>Parámetros constantes en el modelo estructural de pavimento</i> .....	21
Tabla 5 <i>Análisis de convergencia para el modelo 1 de la geometría 1</i> .....	28
Tabla 6 <i>Resultados deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR de los modelos estructurales variando el módulo de elasticidad de CA y BG</i> .....	30
Tabla 7 <i>Diferencia porcentual de la variación de EBG para la deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR.</i> .....	30
Tabla 8 <i>Porcentaje de variación respecto a deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR cambiando el ECA.</i> .....	31
Tabla 9 <i>Resultados deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR obtenidos por la variación de los módulos de elasticidad de la CA y la SBG</i> .....	35
Tabla 10 <i>Porcentaje de variación respecto a deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR cambiando el ESBG.</i> .....	36
Tabla 11 <i>Resultados de deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR obtenidos por la variación de los espesores de pavimento.</i> .....	40

Tabla 12 *Diferencia porcentual de la variación de espesores de pavimento para la deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR* ..... 41

Tabla 13 *Escala para definir grado de sensibilidad*..... 45

Tabla 14 *Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de  $\Delta z$*  ..... 45

Tabla 15 *Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de  $\epsilon_r$*  ..... 46

Tabla 16 *Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de  $\epsilon_z$*  ..... 46

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Modelo estructural de referencia</i> .....	22
Figura 2 <i>Geometría del terraplén</i> .....	23
Figura 3 <i>Asignación de materiales</i> .....	24
Figura 4 <i>Condiciones de contorno</i> .....	24
Figura 5 <i>Asignación de malla</i> .....	25
Figura 6 <i>Pos-procedimiento estructura de pavimento en terraplén, programa GiD®</i> .....	26
Figura 7 <i>Deflexión superficial variando el módulo de elasticidad de la BG en función del módulo de elasticidad de la CA</i> .....	32
Figura 8 <i>Deformación horizontal en el fondo de la CA en función del módulo de elasticidad de la CA variando el módulo de elasticidad de BG</i> .....	33
Figura 9 <i>Deformación vertical de en la superficie de la SR en función del módulo de elasticidad de la CA variando el de la BG</i> .....	34
Figura 10 <i>Deflexión superficial variando el módulo de elasticidad de la SBG en función del módulo de elasticidad de la CA</i> .....	37
Figura 11 <i>Deformación horizontal en el fondo de la CA en función del módulo de elasticidad de la CA variando el módulo de elasticidad de SBG</i> .....	38
Figura 12 <i>Deformación vertical de en la superficie de la SR en función del módulo de elasticidad de la CA variando el de la SBG</i> .....	39
Figura 13 <i>Deflexión superficial variando los espesores de pavimento en función del módulo de elasticidad de la CA</i> .....	42

Figura 14 *Deformación horizontal en el fondo de la CA en función del módulo de elasticidad de la CA variando los espesores del pavimento.* ..... 43

Figura 15 *Deformación vertical en la superficie de la SR en función del módulo de elasticidad de la CA variando los espesores del pavimento.* ..... 44

## Glosario

**Code\_Bright:** es un programa de elementos finitos que es implementado para el análisis de fenómenos acoplados a problemas mecánicos, hidráulicos y térmicos en medios geológicos.

**Estructura de pavimentos:** es un conjunto de capas superpuestas una sobre otra de forma horizontal, tiene como fin soportar cargas vehiculares y transmitir las a las capas inferiores disipando la energía.

**GiD:** es una interfaz gráfica que se utiliza para la definición, preparación y visualización de todos los datos relacionados con las simulaciones numéricas incluyendo la geometría, materiales, condiciones, información sobre la solución y otros parámetros.

**Materiales marginales granulares (MGMs):** son aquellos materiales que no cumplen completamente con las especificaciones impuestas por el país, pero presentan un potencial adecuado para usarse con éxito en algunas aplicaciones.

**Pavimento flexible:** se compone de una carpeta asfáltica, una base y una subbase granular. Está conformada por materiales menos rígidos, más deformables y débiles en comparación con los utilizados en el pavimento rígido.

## Resumen

**Título:** Modelación elástica tridimensional de una estructura de pavimento flexible compuesta por materiales granulares marginales\*

**Autor:** Karen Julieth Valbuena Martínez\*\*

**Palabras Clave:** Pavimento flexible, simulación numérica, parámetros de diseño estructural, variables de diseño.

**Descripción:** El propósito de este proyecto es presentar el grado de sensibilidad de algunas variables tanto de diseño como de modelación que influyen en el comportamiento mecánico de estructuras de pavimento flexible. Para la evaluación del grado de sensibilidad se evaluó la respuesta mecánica en términos de tres parámetros de diseño estructural (deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del concreto asfáltico y deformación vertical en la parte superior de la subrasante). Se simularon 108 estructuras de pavimento, resultantes de una parametrización de dos variables de diseño tanto espesores como módulos de elasticidad de las capas estructurales (concreto asfáltico, base y subbase). Las simulaciones realizadas implementaron el método de elementos finitos como metodología para la solución del modelo constitutivo que permite la obtención de la respuesta mecánica en las estructuras de pavimento. Este proceso se realizó a través del programa Code\_Bright® y la ayuda del pre y post procesador llamado GiD®. Dentro de las simulaciones fue posible realizar un análisis de convergencia que mostró el tamaño de celda óptimo, que el caso fue de 0,8 m, lo que permitió un enmallado acorde a la obtención de calidad de los resultados con respecto al costo computacional. Dentro de la evaluación del nivel de sensibilidad se demostró la importancia que tienen las variables de diseño evaluadas; sin embargo, los espesores de capa son los que afectan en mayor medida la respuesta de la estructura de pavimento flexible.

---

\* Modelación elástica tridimensional de una estructura de pavimento flexible compuesta por materiales granulares marginales

\*\*Karen Julieth Valbuena Martínez. Facultad de Físico-mecánico. Escuela de Ingeniería Civil. Ingeniería Civil. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes. Doctorado en Ingeniería del Terreno Cartográfica y Geofísica. Codirector: Brayán Andrés Velásquez Bueno. Ingeniero Civil.

### Abstract

**Title:** Three-dimensional elastic modeling of a flexible pavement structure composed of marginal granular materials \*

**Author(s):** Karen Julieth Valbuena Martínez\*\*

**Key Words:** Flexible pavement, numerical simulation, structural design parameters, design variables.

**Description:** The purpose of this project is to present the degree of sensitivity of certain variables, both in design and modeling, that influence the mechanical behavior of flexible pavement structures. To assess the degree of sensitivity, the mechanical response was evaluated in terms of three structural design parameters (surface deflection, horizontal deformation at the bottom of the asphalt concrete, and vertical deformation at the top of the subgrade). A total of 108 pavement structures were simulated, resulting from a parametrization of two design variables, namely thicknesses and elastic moduli of the structural layers (asphalt concrete, base, and subbase). The simulations implemented the finite element method as a methodology for solving the constitutive model, allowing for the determination of the mechanical response in pavement structures. This process was carried out using the Code\_Bright® software and the assistance of the pre- and post-processor GiD®. Within the simulations, a convergence analysis was conducted, revealing that the optimal cell size for the case was 0.8 m. This facilitated the meshing process that was in line with achieving quality results concerning computational cost. In the assessment of sensitivity, it was demonstrated that the evaluated design variables are important, with layer thicknesses significantly impacting flexible pavement structures.

---

\* Three-dimensional elastic modeling of a flexible pavement structure composed of marginal granular materials

\*\* Karen Julieth Valbuena Martínez. Faculty of Physics-mechanical. School of Civil Engineering. Civil Engineering. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes. Doctorate in Cartographic and Geophysical Terrain Engineering. Co-director: Brayan Andrés Velásquez Bueno. Civil engineer.

## Introducción

En Colombia, según la información suministrada por CONPES 3857 (2016) las vías terciarias constituyen cerca del 70% de la malla vial y cerca del 94% se encuentran sin pavimentar y en mal estado. Lamentablemente la infraestructura de estas vías presenta muchas falencias; esto se debe a que son de difícil acceso y se encuentran en zonas alejadas, constituyendo grandes costos de construcción ya que se presentan limitaciones a la hora de conseguir los insumos para su reparación y/o construcción que cumplan con todas las especificaciones técnicas del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Teniendo en cuenta esta problemática, se propuso una alternativa en el diseño del pavimento flexible como lo es la potencial implementación de materiales granulares marginales (MGM).

Teniendo en cuenta este contexto, los MGM son materiales que se definen como aquellos materiales que, a pesar de no cumplir con algunos aspectos estipulados en la especificación, tienen el potencial de ser utilizados con éxito en algunas aplicaciones (Li, Wilson, & Larkin, 2017). Con esto se quiere decir que, al momento de utilizar estos materiales, los costos de construcción se reducirían ya que son más asequibles y potencialmente utilizables en vías terciarias ya que presentan un bajo nivel vehicular. Esto constituye una base importante en la implementación de nuevos diseños de pavimento flexible garantizando economía y durabilidad. Por ello es importante realizar un análisis de enfoque mecánico-empírico, ya que este método permite analizar el comportamiento que tiene la estructura de pavimento en cada una de sus capas cuando es sometido a la carga producida por el paso vehicular con mayor exactitud y control sobre algunas de las variables que se tienen en cuenta a la hora de realizar el análisis y diseño del pavimento.

Por otra parte, la metodología multicapa elástica, presenta una visión completa sobre la respuesta estructural del pavimento expresada en términos de deflexión y deformación. En primer lugar, se tiene en cuenta que cada material presenta un comportamiento elástico lineal, lo que determina la capacidad estructural del pavimento en cuanto a la fatiga y el ahuellamiento determinado a partir de las deflexiones totales, deformaciones horizontales en tensión y deformaciones vertical en compresión, dando una mejor visión a la hora de tomar decisiones que eviten el sobredimensionamiento y cumplir en su totalidad con los requerimientos de diseño. Igualmente, los programas multicapa elásticos tienen mayor preferencia con respecto a los elementos finitos debido a su simplicidad de manejo y en el entendimiento de las ecuaciones con las que se obtienen los estados de esfuerzo y deformación. Sin embargo, los programas de elementos finitos son mejores para intentar reproducir el comportamiento de los materiales que conforman un pavimento. Uno de los modelos utilizados por estos programas es el modelo elástico lineal y no lineal para el caso de las capas asfálticas.

Con este análisis se busca evaluar diferentes alternativas para el diseño de pavimentos flexibles en las vías terciarias de Colombia, en donde se busca utilizar como material los MGM en las capas de base y subbase granular. El proyecto busca parametrizar dos variables de diseño como lo son espesores de capa y módulos de elasticidad de las capas estructurales del pavimento y a través de la modelación numérica con los programas Code\_Bright® y GiD® poder determinar el nivel de influencia de cada variable de diseño reflejado en el nivel de sensibilidad. Esta evaluación se realiza determinando el enmallado óptimo con respecto a la calidad de los resultados y al costo computacional que conlleva la combinación de los programas.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Realizar un análisis de sensibilidad de variables elásticas implementadas en el estudio de una estructura de pavimento flexible compuesta por MGMs por medio de simulaciones numéricas mediante la técnica de elementos finitos.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Evaluar la influencia del número de elementos y condiciones de frontera en la respuesta esfuerzo-deformación de un modelo de referencia.

Comparar la influencia de posibles espesores de capas en una estructura típica de pavimento flexible conformada con MGMs determinada por desplazamientos y deformaciones.

Evaluar el comportamiento de estructuras de pavimento flexible conformadas con MGMs ante la variación de rigidez en las capas que constituyen cada estructura.

## 2. Metodología

Esta investigación consistió en evaluar los parámetros de diseño estructural que tiene la estructura del pavimento ante las cargas proporcionadas por los vehículos y la calidad de los materiales priorizando la base y la subbase que están conformadas por MGM. Como primera medida, se hizo una revisión bibliográfica con la que se busca tener un contexto sobre los parámetros de diseño estructural de pavimentos flexibles y la metodología de elementos finitos a través de programas de cómputo con el propósito de fundamentar el enfoque de la investigación.

Como segundo punto, se definió y organizó los datos de entrada de las estructuras, los modelos estructurales y los puntos críticos para la evaluación de las estructuras de pavimento flexible. Como tercer paso, se realizaron los modelos por medio de simulaciones tridimensionales con la técnica de elementos finitos en los softwares GiD® y Code-Bright. A continuación, se organizaron los datos obtenidos y se validaron con los programas para verificar que modelo es el óptimo para la investigación. Por último, se analizó la influencia de la diferenciación de variables de diseño (espesores y propiedades de capa) y variables de simulación (tamaño y número de elementos en el enmallado) sobre el comportamiento de las capas en la estructura de pavimento flexible, adicional a ello se realizó una comparación para revisar que los resultados obtenidos cumplieran con los valores admisibles de fatiga y ahuellamiento. Estos valores fueron obtenidos por medio de diversas ecuaciones desarrolladas en instituciones de investigación las cuales se encuentran descritas en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Deformaciones y deflexiones admisibles para los modelos estructurales.*

$\Delta_{zadm}$ (mm)	1,649	Instituto del asfalto
$\epsilon_{radm}$	3,32E-04	Ley de fatiga Nottingham
$\epsilon_{zadm}$	1,18E-03	Criterio deformación admisible subrasante Shell 85%

*Nota.* Esta tabla muestra los valores admisibles utilizados para la comparación, estos fueron obtenidos por medio de diversas ecuaciones desarrolladas en instituciones de investigación.

**2.1 Parámetros de respuestas estructurales en el pavimento flexible**

Cada vez que la carga de un neumático es aplicada a una estructura de pavimento flexible, esta se flexiona originando esfuerzos y deformaciones en cada una de las capas que lo conforman. La magnitud de estos depende del tipo de carga y la configuración de cada uno de los ejes de los vehículos que lo transitan. La magnitud y la ubicación de cada uno de estos parámetros determina el grado de deterioro de la estructura de pavimento. Es por esto que se deben considerar los materiales ya que permiten caracterizar las respuestas del pavimento mediante modelos constitutivos, es decir, permiten determinar los niveles de esfuerzos por medio de la rigidez de cada una de las capas con los que se vaya a trabajar, además también permite diseñar la estructura de pavimento por fatiga generada en la base de la carpeta asfáltica y deformación permanente generalmente se produce por la deformación de las bases y la subrasante tomando en cuenta la deformación a tensión en la parte inferior de la carpeta asfáltica y la deformación a compresión sobre la subrasante (Coria et al., 2018, p17)

A continuación, se presentan las respuestas derivadas de la aplicación de cargas y que se han denominado parámetros de respuesta estructural.

### ***2.1.1 Deflexión***

La carga de un neumático aplicada a la superficie de pavimento hará que el pavimento se deforme verticalmente, permitiendo evaluar el estado y la capacidad estructural del pavimento. La magnitud de esta deflexión es proporcional a la rigidez total del pavimento en función del módulo de elasticidad y espesor, la rigidez de la subrasante. Cuanto mayor sea la deflexión más susceptible es el pavimento a presentar fallas de tipo estructural (Coria et al., 2018, p20).

### ***2.1.2 Deformaciones horizontales por tensión***

Este tipo de deformación se produce en un plano horizontal y puede ser tanto a compresión como a tensión dependiendo del número y ubicación de la carga de los neumáticos. Los esfuerzos de tensión que se ejercen en la parte inferior de la carpeta asfáltica conducen a la aparición de daños por fatiga y agrietamientos (Coria et al., 2018, p19).

### ***2.1.3 Deformaciones verticales o por compresión***

La carga de un neumático produce esfuerzos verticales, esta respuesta produce compresión en los materiales de la estructura de pavimento que si es permanente puede verse como roderas plásticas o surcos en la superficie del pavimento (Coria et al., 2018, p19).

## **2.2 Metodología de elementos finitos**

Actualmente se ha venido desarrollando una nueva metodología de estudio para el pavimento la cual emplea programas de elementos finitos para la determinación de esfuerzos y deformaciones. Estos programas emplean ecuaciones constitutivas para el cálculo de esfuerzos y deformaciones las cuales suponen que el material es un continuo (no se tiene en cuenta el

comportamiento individual de los componentes del material, sino su comportamiento global a nivel macro mecánico) (Rondón y Reyes, 2007, p.12).

Para el caso de los pavimentos, algunas de las ventajas del empleo de programas de elementos finitos radican en que pueden llegar a tener en cuenta que los materiales granulares no tratados que conforman pavimentos exhiben un comportamiento no lineal, dependiente de la condición de esfuerzos, y comportamiento viscoso en las capas asfálticas y en la subrasante. Son capaces de modelar diferentes geometrías, condiciones de frontera, criterios de falla y carga cíclica (Rondón y Reyes, 2007, p.12).

En el mercado existen diversos programas que utilizan la técnica de los elementos finitos. Para este estudio se utilizará el software Code\_Bright® que es implementado para el análisis de fenómenos acoplados a problemas mecánicos, hidráulicos y térmicos en medios geológicos, el cuál fue desarrollado por el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña. Aunque Code\_Bright® utiliza el sistema GiD® para el pre-procesamiento y post- procesamiento de datos. GiD® es una interfaz gráfica que se utiliza para la definición, preparación, y visualización de todos los datos relacionados con las simulaciones numéricas. Estos datos incluyen la definición de la geometría, materiales, condiciones, información sobre la solución, y otros parámetros (Rondón y Reyes, 2007, p.12). Para efectos de este análisis se decide denominar GiD® a la combinación de los dos programas.

### **2.3 Parámetros de diseño**

Para el análisis de sensibilidad desarrollado, fue necesario establecer parámetros de entrada, los cuales fueron requeridos para la ejecución de las simulaciones. Cada estructura de pavimento está compuesta por cuatro capas respectivamente que son: concreto asfáltico (CA), base

granular (BG), subbase granular (SBG) y subrasante (SR). Los parámetros que presentaron cambios en el diseño de la estructura de pavimento fueron los espesores de las capas CA ( $h_{CA}$ ), BG ( $h_{BG}$ ) y SBG ( $h_{SBG}$ ), además del módulo de elasticidad de las capas CA ( $E_{CA}$ ), BG ( $E_{BG}$ ) y SBG ( $E_{SBG}$ ). Teniendo en cuenta los espesores de capas fue posible establecer diferentes configuraciones geométricas (C1, C2, C3, C4) tal como se muestra en la Tabla 2, mientras que para los módulos de elasticidad se establecen valores como se muestra en la Tabla 3, que generaron diferentes combinaciones posibles. Sin embargo, algunos valores, como la relación de Poisson ( $\nu$ ), el módulo elástico de la subrasante ( $E_{SR}$ ), la carga del neumático (P), la presión de contacto entre el neumático y el pavimento ( $\sigma$ ), el radio del área de carga (r), y la separación de la carga entre los neumáticos (y) permanecieron constantes como se observa en la Tabla 4.

**Tabla 2**

*Rango de variación espesor de capa*

<i>Espesor de capa [m]</i>					
<b>Geometría</b>	$h_{CA}$	$h_{BG}$	$h_{SBG}$	$h_{SR}$	$h_{TOTAL}$
<b>C1</b>	0,1	0,25	0,25	-	0,6
<b>C2</b>	0,07	0,2	0,2	-	0,47
<b>C3</b>	0,05	0,15	0,15	-	0,35
<b>C4</b>	0,03	0,1	0,1	-	0,23

*Nota.* Esta tabla muestra los rangos de variación de los espesores de capa utilizados para la elaboración de los terraplenes.

**Tabla 3** *Rangos de variación módulo de elasticidad capas de pavimento*

<i>Módulo de elasticidad [MPa]</i>		
$E_{CA}$	$E_{BG}$	$E_{SBG}$
<b>3250</b>	250	200
<b>2500</b>	200	150
<b>1500</b>	150	100

*Nota.* Modulo de elasticidad utilizado en las capas de pavimento.

**Tabla 4**

*Parámetros constantes en el modelo estructural de pavimento*

Parámetros	Valor
$\vartheta_{CA}$	0,30
$\vartheta_{BG}$	0,35
$\vartheta_{SBG}$	0,35
$\vartheta_{SR}$	0,35
$E_{SR}$ (MPa)	80,00
$r$ (m)	0,108
$y$ (m)	0,324
$P$ (KN)	20,50
$\sigma$ (KPa)	562,00

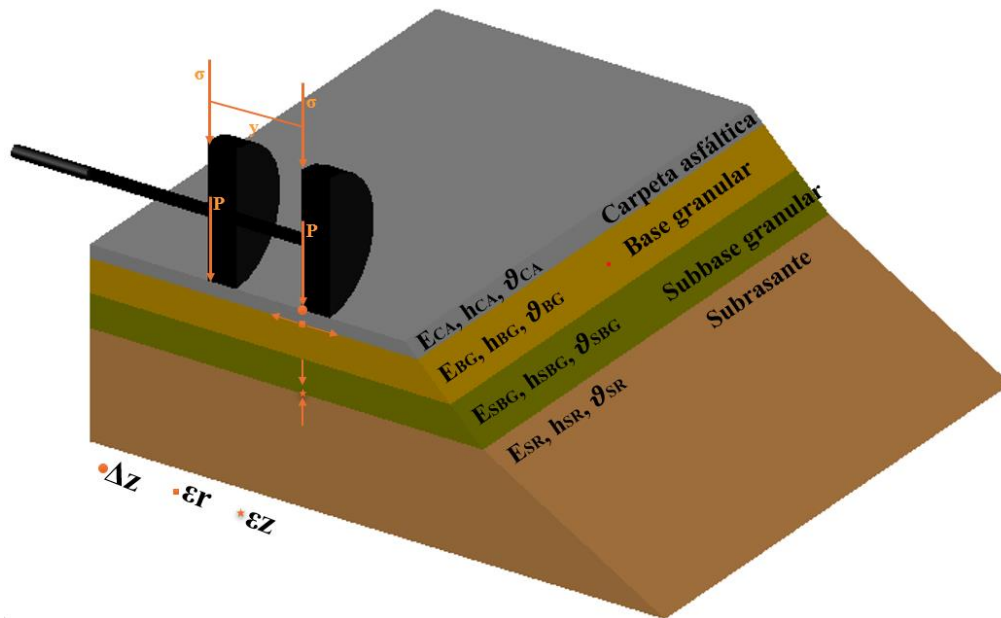
*Nota.* Parámetros que permanecieron constantes durante todo el estudio realizado.

## 2.4 Modelos de referencia

El estudio consideró un tipo de sección para la idealización de estructuras de pavimento flexibles la cual fue llamada modelo 1 que se presenta en la Figura 1, donde se presenta una geometría que fue utilizada en el trabajo de investigación de Páez (2023), esta simula uno de los carriles de la estructura de pavimento con una inclinación de 2% de las capas por efecto de bombeo y se presenta un terraplén con una inclinación en la SR de 33° y en la CA, BG y SBG de 45°, originando que sea un modelo más aproximado a la realidad. El modelo presenta dos llantas del eje sencillo de la rueda doble para el análisis y la ubicación de los puntos de análisis de la deflexión de la superficie ( $\Delta z$ ), deformación por tracción horizontal en la parte inferior de la capa de concreto asfáltico ( $\epsilon_r$ ) y deformación por compresión vertical en la parte superior de la capa de subrasante ( $\epsilon_z$ ).

**Figura 1**

*Modelo estructural de referencia*

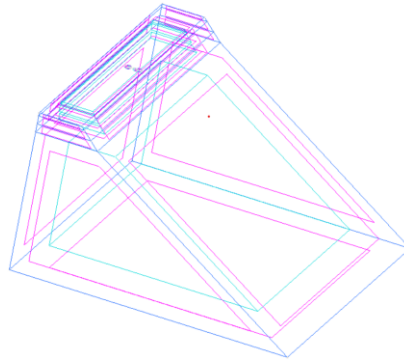


*Nota.* La figura representa el diseño del terraplén utilizado para hacer las simulaciones para cada modelo.

Buscando una mejor perspectiva de la realidad, se utilizó el programa GiD®. El programa GiD® permite dibujar la geometría que utilizó el modelo de la estructura de pavimento en forma de terraplén como se muestra en la Figura 1. Los parámetros utilizados en el diseño de dicha estructura fueron los establecidos en el numeral 1.3.

### 2.4.1 Definición de geometría

Teniendo las medidas de los terraplenes que se van a diseñar, se procede a elaborar la geometría por medio de las herramientas de punto y línea. Terminada ya la geometría se procede a colocar las superficies y los volúmenes respectivos para cada capa como se muestra en la Figura 2.

**Figura 2***Geometría del terraplén*

*Nota.* La figura representa el esqueleto dibujado en el programa GiD®.

**2.4.2 Condiciones de contorno y asignación de materiales**

En este ítem se procede a colocar todos los atributos y condiciones que llevará el diseño entre estos están:

Las ventanas de datos del problema que permiten al usuario ingresar todos los datos generales que GiD® necesita para realizar una simulación

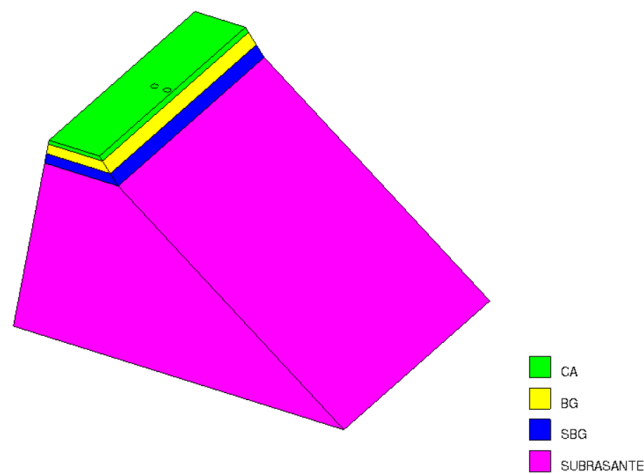
Las propiedades de los materiales que incluyen datos mecánicos de los suelos, datos hidráulicos y térmicos, propiedades de fase y excavación de construcción. En la Figura 3 se encuentran los diferentes tipos de materiales asignados.

Condiciones de frontera. Se encuentran los puntos en los cuales fueron aplicadas las cargas de las llantas y las condiciones de frontera que se establecieron a partir de las restricciones laterales que impiden los desplazamientos, asemejándolo a las condiciones que sufriría la estructura en la realidad. La Figura 4 ilustra las diferentes condiciones de fronteras de un modelo tipo.

Intervalos de tiempo. El primero intervalo abarca todos los datos ingresados hasta ahora, incluyendo los datos del problema definido, los materiales y las condiciones y el segundo sería después de colocar la carga.

**Figura 3**

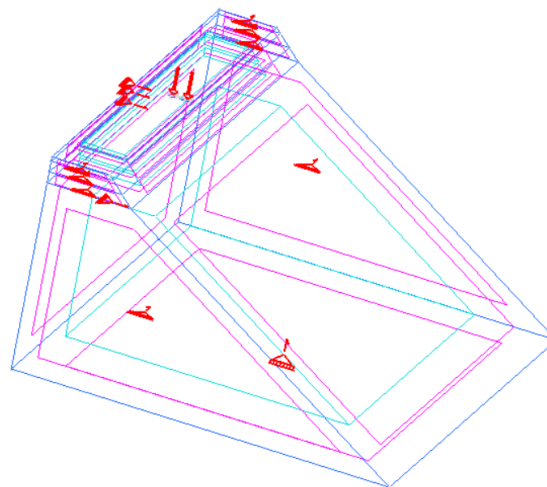
*Asignación de materiales*



*Nota.* La figura representa la asignación de materiales en el programa GiD®.

**Figura 4**

*Condiciones de contorno*



*Nota.* La figura representa la asignación de contornos en el programa GiD®.

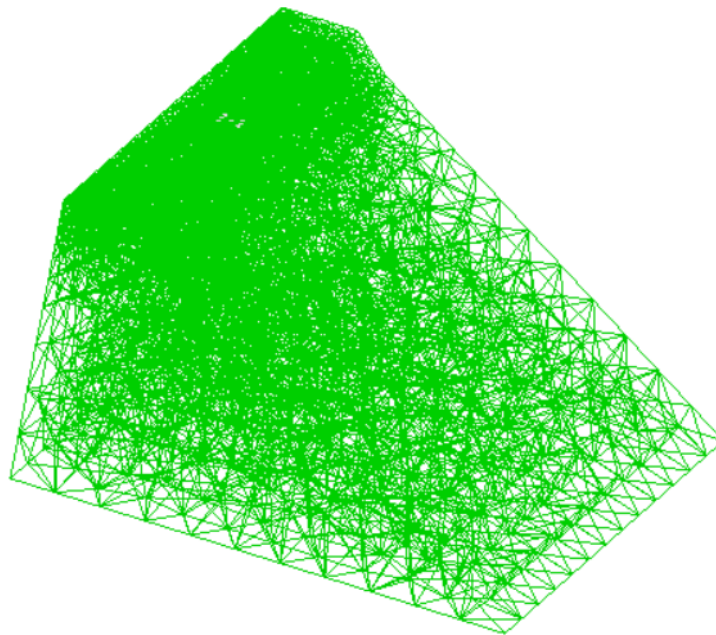
### 2.4.3 Asignación de enmallado

Una vez definido el modelo con la geometría, condiciones de frontera, materiales e intervalos de tiempos de análisis, se procede a generar la malla que consiste en discretizar la geometría en nodos y elementos. Durante este proceso, las condiciones y los materiales asignados a las entidades geométricas se transfieren a los nodos y elementos.

La transición de la malla está controlada por la relación de tamaño entre elementos adyacentes de diferentes tamaños. En la Figura 5 se puede ver la asignación de malla la cual fue escogida después de realizar un análisis de convergencia cuyo objetivo principal fue establecer la mejor opción en términos de tiempo 4.37 min que finalmente refleja el costo computacional que estos modelos conllevan.

#### **Figura 5**

*Asignación de malla*



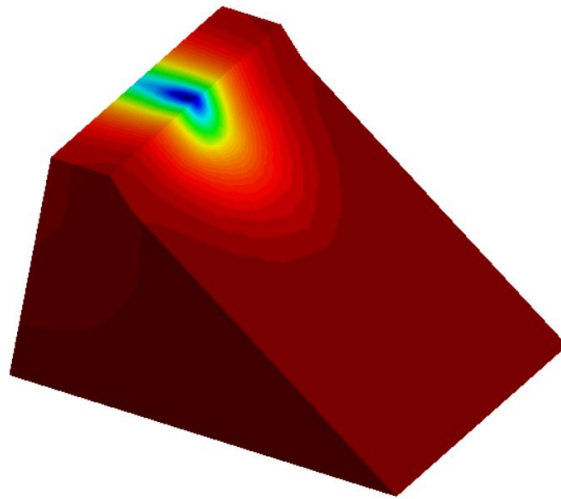
*Nota.* La figura representa la asignación de malla en el programa GiD®

#### 2.4.4 Post proceso

Por último, se procede a correr el programa donde se muestran los diferentes parámetros que afectan la estructura del pavimento. Esto se puede ver en la Figura 6.

#### Figura 6

*Pos-procedimiento estructura de pavimento en terraplén, programa GiD®*



*Nota.* La figura representa el pos-procedimiento de la estructura de pavimento después de correr el programa el programa GiD®.

### 3. Resultados y discusión

Las Teniendo en cuenta los diferentes módulos de elasticidad y la variación de espesores se generaron cerca de 108 estructuras de pavimento utilizadas para la realización de simulaciones en el software GiD®. Al obtener los diferentes resultados y ver la cantidad de visualizaciones, se optó por trabajar con el modelo 1 que presentó los mejores parámetros de diseño para el análisis a realizar. El modelo estructural de referencia se encuentra en la Figura 1 y está conformado por

$E_{CA}=3250\text{MPa}$ ,  $E_{BG}=250\text{MPa}$ ,  $E_{SBG}=200\text{MPa}$  y  $E_{SR}=80\text{MPa}$  y la geometría C1 con una  $h_{TOTAL}=0.6\text{m}$ . En el siguiente link se encontrará la información completa de todas las simulaciones organizadas en una base de datos, donde adicionalmente se evaluó que cada estructura cumpliera con los criterios de diseño de pavimento flexible para evitar la fatiga y el ahuellamiento mediante el control de deflexión superficial ( $\Delta z$ ), deformación horizontal en la base del concreto asfáltico ( $\epsilon_r$ ), y deformación vertical en la parte superior de la subrasante ( $\epsilon_z$ ) de tal manera que pueda ser utilizada para las futuras investigaciones:  
<https://drive.google.com/drive/folders/1dg8KzyIAAgoS5Ubp4f4O5Jik4tJlu9orY>

Para evaluar la influencia de estas variables, se organizó en forma de Tablas y graficas que contiene la comparación de los espesores y los módulos de elasticidad con respecto a los parámetros de diseño estructural: deflexión superficial ( $\Delta z$ ), deformación horizontal en la base del concreto asfáltico ( $\epsilon_r$ ), y deformación vertical en la parte superior de la subrasante ( $\epsilon_z$ ). De esta forma se puede tener una mejor interpretación de los resultados para realizar un análisis de tendencia de las variables y la sensibilidad de cada parámetro de diseño ante la variación, lo cual permitió sacar conclusiones como la definición de grado de sensibilidad y nivel de importancia.

### **3.1 Determinación del tamaño de elementos óptimo para el enmallado**

Teniendo como base los parámetros que se van a utilizar para la elaboración de las simulaciones, se procede a realizar un análisis de convergencia con los posibles tamaños para los elementos que conforman el enmallado a generar. Este análisis se realizó con tamaños de 0,38 m - 0,40 m - 0,50 m - 0,65 m - 0,80 m - 0,90 m y 1 m respectivamente. Se evaluó el tiempo de ejecución, la cantidad de elementos generados y el porcentaje de variación que presentaban los modelos al comparar las respuestas con respecto a la deflexión superficial (parámetro de diseño

estructural). Se adoptó el enmallado con mayor precisión, este fue el enmallado de 0,38m ya que corresponde al menor tamaño en el que el programa de elementos finitos encontró convergencia de solución para el modelo constitutivo. Este análisis se realizó para cada una de las configuraciones geométricas dando resultados similares y permitiendo una decisión unánime de usar un tamaño de enmallado de 0,8 m. En la Tabla 5, se puede ver los resultados obtenidos para el modelo 1 de la primera configuración geométrica.

**Tabla 5**

*Análisis de convergencia para el modelo 1 de la geometría 1*

Modelo	Tamaño elementos	# elementos	Tiempo		% ERROR respecto a la malla 0,38
			min	horas	
1	0,38	46,385	101,36	1,68928056	0%
1	0,4	40420	80,89	1,34820833	1,079887%
1	0,5	23478	21,94	0,36564167	3,413837%
1	0,65	14836	8,83	0,14714833	2,492780%
1	0,8	11314	4,37	0,07281694	3,165279%
1	0,9	10,258	5,27	0,08777778	3,291748%
1	1	9,516	4,24	0,07066833	4,337353%

*Nota.* La Tabla se observa el análisis de convergencia realizado para obtener la mejor opción de enmallado.

Realizado el análisis se optó por trabajar con la malla que tiene un tamaño de elemento de 0,8 m ya que tiene una buena relación de tiempo de procesamiento y costo computacional con respecto a la diferencia porcentual que representa la calidad de las respuestas obtenidas.

### **3.2 Comportamiento de los parámetros de diseño estructural ante la variación del módulo de elasticidad de las capas estructurales de pavimento**

#### ***3.2.1. Influencia del módulo de elasticidad del concreto asfáltico y base granular sobre los parámetros de diseño estructural***

Los parámetros que se asignaron de manera constante para la realización de este estudio están estipulados en la Tabla 3, además de los mencionados a continuación:

$$E_{SBG}=200 \text{ MPa}$$

$$h_{CA}= 0,10 \text{ m}$$

$$h_{BG}=0,25 \text{ m}$$

$$h_{SBG}=0,25 \text{ m}$$

Los módulos de elasticidad para la base granular varió de 250 MPa a 150 MPa y el módulo de elasticidad para la carpeta asfáltica varió de 3250 MPa a 1500 MPa. La deformación y deflexión obtenida bajo el punto más crítico de la impronta de carga se puede observar en las Tablas 6, 7 y 8, donde cada una presenta 3 tendencias que permiten tener una mejor visualización de la variación en términos de módulo de elasticidad para las capas ya mencionadas. El grado de variación para cada variable está establecido en la Tabla 7 y 8 respectivamente; el valor tomado como base fue el correspondiente a la estructura de referencia.

**Tabla 6**

*Resultados deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR de los modelos estructurales variando el módulo de elasticidad de CA y BG*

ECA(MPa)	EBG(MPa)	$\Delta z(\text{mm})$	$\epsilon_r$	$\epsilon_z$
<b>3250</b>	250	0,3141	2,365E-05	9,858E-05
	200	0,3252	2,631E-05	9,985E-05
	150	0,3409	2,969E-05	1,008E-04
<b>2500</b>	250	0,3264	2,693E-05	1,017E-04
	200	0,3388	3,038E-05	1,032E-04
	150	0,3564	3,484E-05	1,044E-04
<b>1500</b>	250	0,3523	3,315E-05	1,069E-04
	200	0,3673	3,845E-05	1,088E-04
	150	0,3889	4,559E-05	1,107E-04

*Nota.* La Tabla se observa los diferentes resultados deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR de los modelos estructurales variando el módulo de elasticidad de CA y BG.

**Tabla 7**

*Diferencia porcentual de la variación de EBG para la deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR.*

ECA(MPa)	EBG(MPa)	$\Delta z(\text{mm})$	$\epsilon_r$	$\epsilon_z$
<b>3250</b>	250	0,00%	0,00%	0,00%
	200	3,53%	11,23%	1,29%
	150	8,53%	25,52%	2,30%
<b>2500</b>	250	0,00%	0,00%	0,00%
	200	3,78%	12,81%	1,47%
	150	9,16%	29,37%	2,74%
<b>1500</b>	250	0,00%	0,00%	0,00%
	200	4,26%	15,99%	1,77%
	150	10,37%	37,53%	3,49%

*Nota.* La Tabla se observa la diferencia porcentual de la variación de EBG para la deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR.

**Tabla 8**

*Porcentaje de variación respecto a deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR cambiando el ECA.*

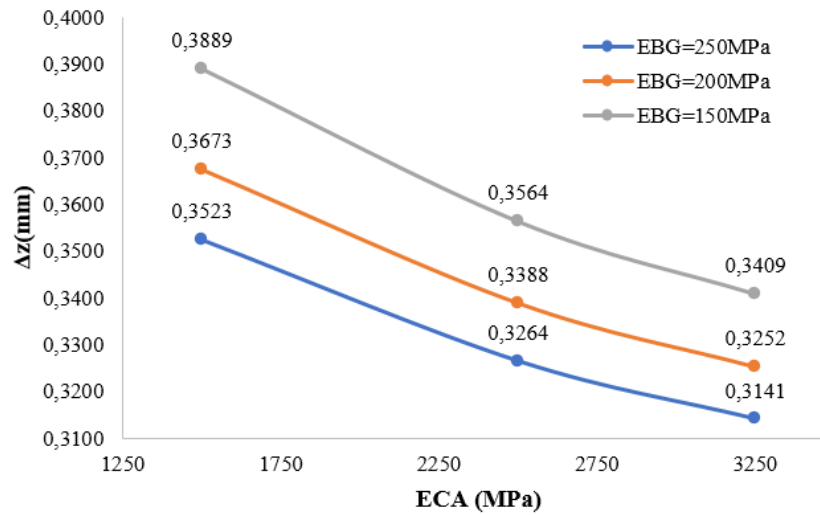
<b>EBG(MPa)</b>	<b>ECA(MPa)</b>	<b><math>\Delta z(\text{mm})</math></b>	<b><math>\epsilon_r</math></b>	<b><math>\epsilon_z</math></b>
<b>250</b>	3250	0,00%	0,00%	0,00%
	2500	3,93%	13,85%	3,13%
	1500	12,18%	40,14%	8,48%

*Nota.* La Tabla se observa la Porcentaje de variación respecto a deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR cambiando el ECA.

En la Figura 7 se muestran las deflexiones superficiales en función de E\_CA, para ello se tuvo como base la respuesta mecánica de tres posibles estructuras de pavimentos, determinadas por la variación de E\_BG, mostrando una tendencia decreciente, ya que al aumentar el módulo de elasticidad de las capas CA y BG la deflexión disminuye significativamente. Como se puede observar en la gráfica el menor módulo de elasticidad en ambas capas, muestra un aumento significativo en la deflexión.

**Figura 7**

*Deflexión superficial variando el módulo de elasticidad de la BG en función del módulo de elasticidad de la CA*

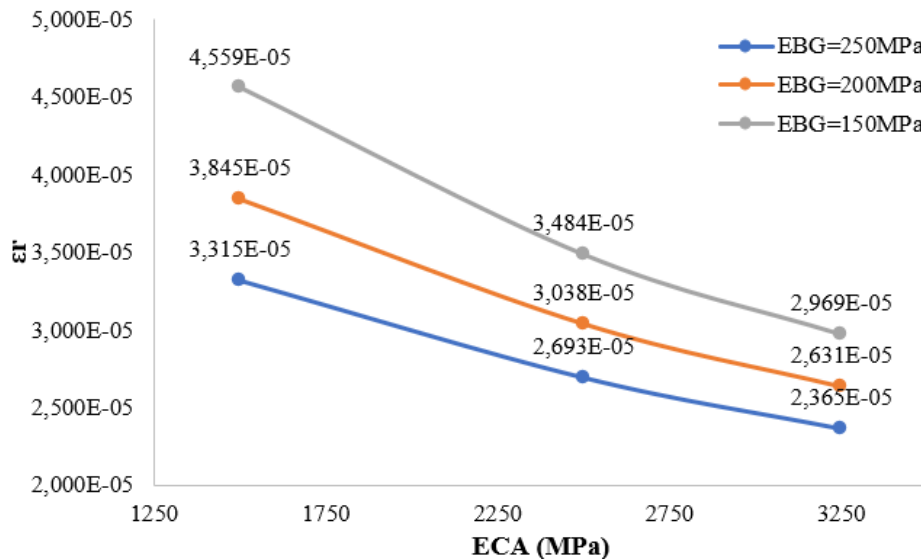


*Nota.* La Figura representa los resultados obtenidos de la deflexión superficial variando el módulo de elasticidad de la BG en función del módulo de elasticidad de la CA

De igual forma en la Figura 8, se observa como la deformación horizontal en función del módulo de elasticidad de la CA y variando el módulo de elasticidad de la BG presentan una tendencia decreciente, ya que, al aumentar el módulo de elasticidad de ambas capas, la deformación por tensión en el fondo de la CA disminuye.

**Figura 8**

*Deformación horizontal en el fondo de la CA en función del módulo de elasticidad de la CA variando el módulo de elasticidad de BG*

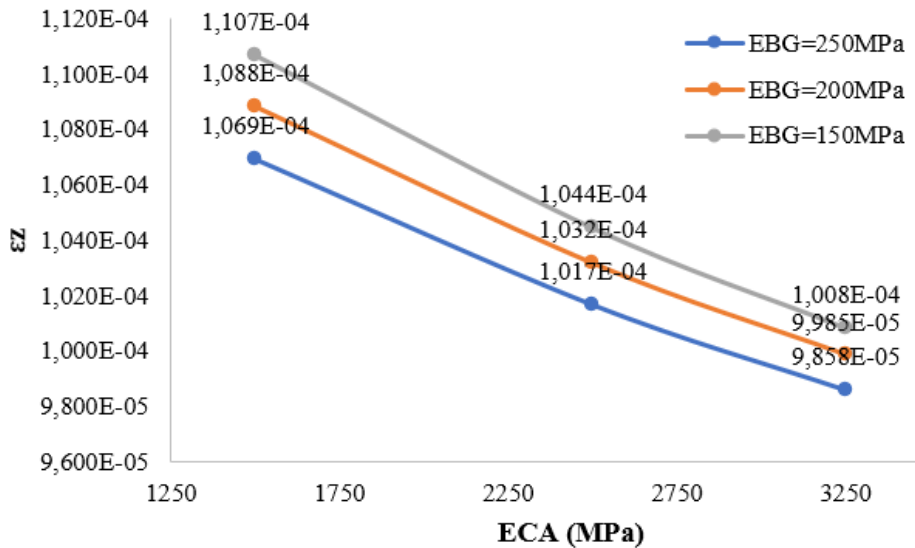


*Nota.* La Figura representa los resultados de la deformación horizontal en el fondo de la CA en función del módulo de elasticidad de la CA variando el módulo de elasticidad de BG

En la Figura 9 se observan los valores de deformación vertical en función del módulo de elasticidad de la CA, en él se puede ver una tendencia decreciente, ya que a medida que el módulo de elasticidad aumenta en las capas de CA y BG, la deformación por compresión tiende a disminuir sobre la subrasante.

**Figura 9**

*Deformación vertical de en la superficie de la SR en función del módulo de elasticidad de la CA variando el de la BG*



*Nota.* La Figura representa los resultados la deformación vertical de en la superficie de la SR en función del módulo de elasticidad de la CA variando el de la BG

**3.2.2. Influencia del módulo de elasticidad en la carpeta asfáltica y de la subbase granular sobre los parámetros de diseño estructural**

Para este ítem también permanecerán constantes los parámetros estipulados en la Tabla 3, igualmente los mencionados a continuación:

$E_{BG}=250 \text{ MPa}$

$h_{CA}= 0,10 \text{ m}$

$h_{BG}=0,25 \text{ m}$

$h_{SBG}=0,25 \text{ m}$

El módulo de elasticidad de la subbase granular varió de 200 MPa a 100 MPa y el de la carpeta asfáltica de 3250 MPa a 1500 MPa. La información obtenida en el punto más crítico entre la estructura de pavimento y la impronta de carga deja ver los siguientes resultados de deflexión y deformación, estos resultados se pueden observar en la Tabla 9 y el porcentaje de variación se verá reflejado en la Tabla 10. De igual manera para tener una mejor visualización de estos, en la Figura 10, 11 y 12 se encuentra representada dicha información.

**Tabla 9**

*Resultados deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR obtenidos por la variación de los módulos de elasticidad de la CA y la SBG*

<b>ECA(MPa)</b>	<b>ESBG(MPa)</b>	<b><math>\Delta z(\text{mm})</math></b>	<b><math>\epsilon_r</math></b>	<b><math>\epsilon_z</math></b>
<b>3250</b>	200	0,31409	2,365E-05	9,858E-05
	150	0,32423	2,379E-05	1,131E-04
	100	0,34050	2,401E-05	1,388E-04
<b>2500</b>	200	0,32645	2,693E-05	1,017E-04
	150	0,33719	2,706E-05	1,168E-04
	100	0,35444	2,727E-05	1,438E-04
<b>1500</b>	200	0,35233	3,315E-05	1,069E-04
	150	0,36415	3,318E-05	1,233E-04
	100	0,38318	3,324E-05	1,525E-04

*Nota.* La Tabla se observa los resultados de deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR obtenidos por la variación de los módulos de elasticidad de la CA y la SBG

**Tabla 10**

*Porcentaje de variación respecto a deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR cambiando el ESBG.*

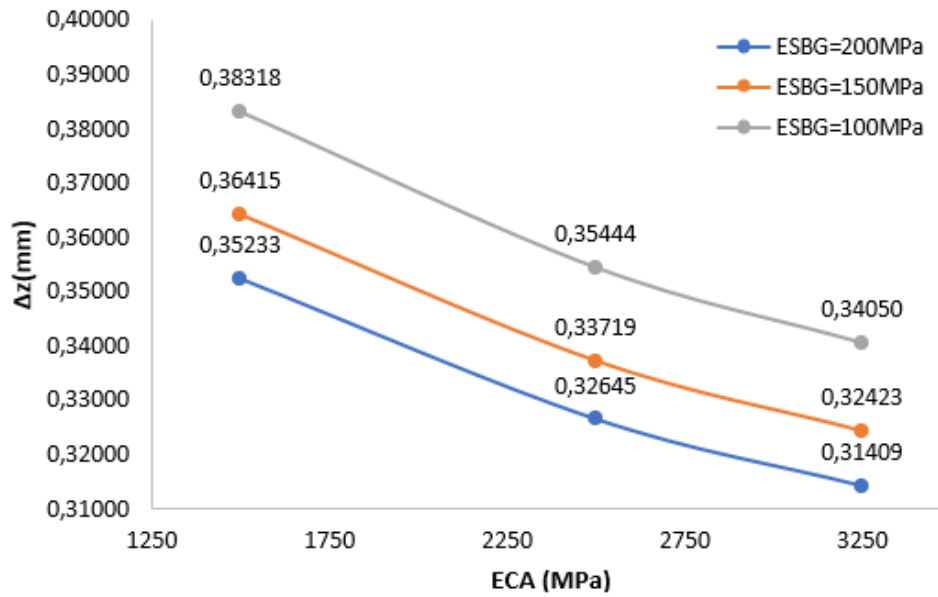
<b>ECA(MPa)</b>	<b>ESBG(MPa)</b>	<b><math>\Delta z(\text{mm})</math></b>	<b><math>\epsilon_r</math></b>	<b><math>\epsilon_z</math></b>
<b>3250</b>	200	0,00%	0,00%	0,00%
	150	3,23%	0,59%	14,71%
	100	8,41%	1,51%	40,80%
<b>2500</b>	200	0,00%	0,00%	0,00%
	150	3,29%	0,48%	14,93%
	100	8,58%	1,24%	41,42%
<b>1500</b>	200	0,00%	0,00%	0,00%
	150	3,35%	0,11%	15,34%
	100	8,76%	0,29%	42,58%

*Nota.* La Tabla se observan los porcentajes de variación respecto a deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR cambiando el ESBG.

En la Figura 10, se puede observar la deflexión superficial en función de la variación del módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica. Para ello se tuvo como base tres posibles representaciones de la estructura de pavimento variando el módulo de elasticidad de la SBG, en él se puede observar una tendencia decreciente, ya que a medida que aumenta el módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica, disminuye el valor de deflexión total para el pavimento.

**Figura 10**

*Deflexión superficial variando el módulo de elasticidad de la SBG en función del módulo de elasticidad de la CA*

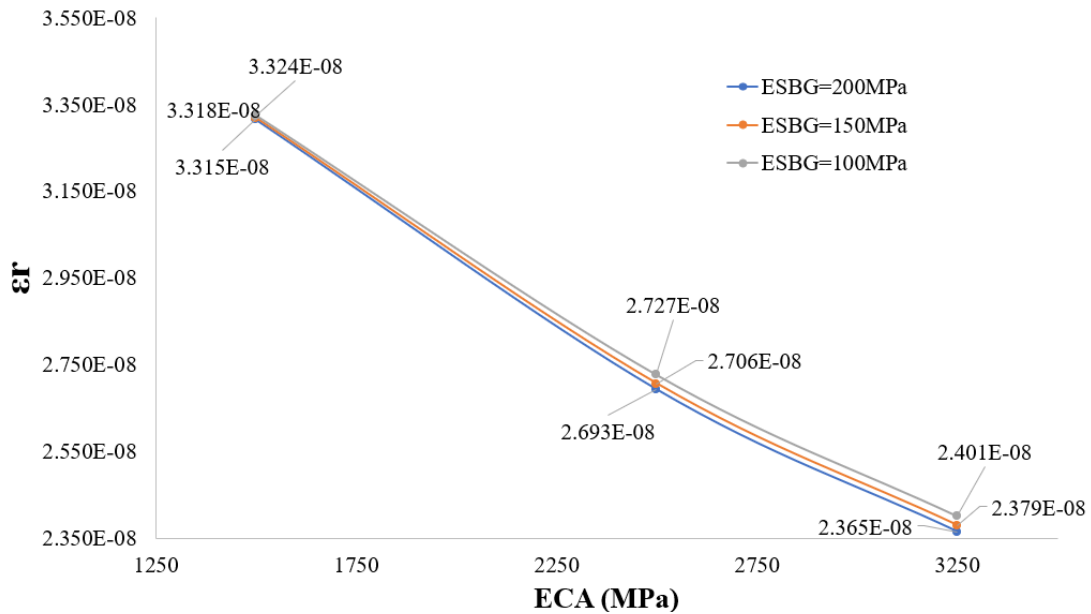


*Nota.* La Figura representa los resultados obtenidos de la deflexión superficial variando el módulo de elasticidad de la SBG en función del módulo de elasticidad de la CA

En la Figura 11 se observa las deformaciones horizontales en función del módulo de elasticidad de la CA, de igual forma en la gráfica se ven tres posibles estructuras de pavimento con la variación del módulo de elasticidad de la SBG, reflejando una tendencia decreciente, donde nos da a entender que a medida que se aumenta el módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica y la SBG, las deformaciones por tensión en el concreto tienden a disminuir.

**Figura 11**

*Deformación horizontal en el fondo de la CA en función del módulo de elasticidad de la CA variando el módulo de elasticidad de SBG*

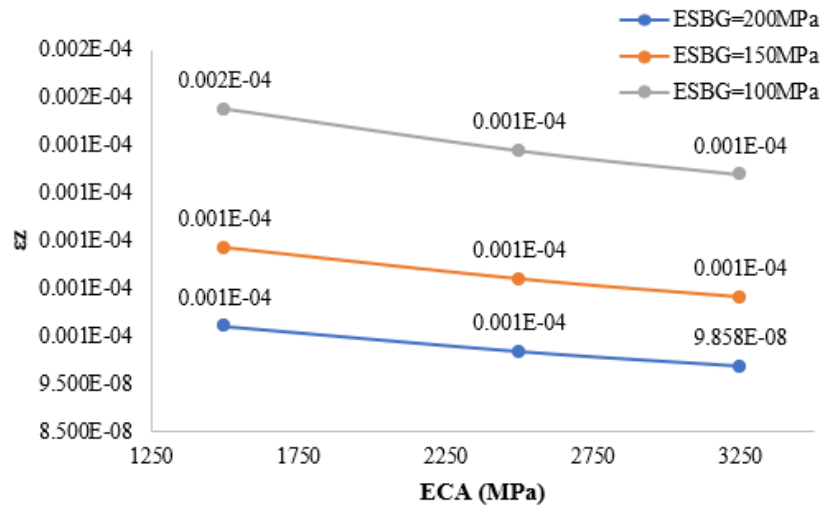


*Nota.* La Figura representa los resultados obtenidos de la deformación horizontal en el fondo de la CA en función del módulo de elasticidad de la CA variando el módulo de elasticidad de SBG

En la Figura 12 se puede observar las deformaciones verticales en función del módulo de elasticidad de la CA, de igual forma se encuentran representadas las tres posibles estructuras de pavimento variando el módulo de elasticidad de la SBG, reflejando una tendencia decreciente, dando a entender que a medida que aumentan los módulos de elasticidad de dichas capas, disminuye la deformación por compresión en la subrasante.

**Figura 12**

*Deformación vertical de en la superficie de la SR en función del módulo de elasticidad de la CA variando el de la SBG*



*Nota.* La Figura representa los resultados obtenidos de la deformación vertical de en la superficie de la SR en función del módulo de elasticidad de la CA variando el de la SBG

**3.2.3. Comportamiento de los parámetros de diseño estructural ante la variación de los espesores de la estructura de pavimento.**

De igual manera, como en los análisis anteriores se van a tener como base los parámetros registrados en la Tabla 3 que permanecerán constantes. Adicional a los datos de la Tabla 3 se tendrán también otros parámetros constantes para alcanzar un análisis de mayor rigurosidad; estos son:

$$E_{BG}=250 \text{ MPa}$$

$$E_{SBG}=200 \text{ MPa}$$

Para este ítem se varió la  $h_{TOTAL}$  en función de las cuatro configuraciones geométricas estipuladas. Las deformaciones y deflexiones obtenidas bajo la impronta de carga de cada llanta para este caso se observan en la Tabla 11 y el porcentaje de variación de  $h_{TOTAL}$  en la Tabla 12. De igual forma para tener una mejor perspectiva en la Figuras 13, 14 y 15, se puede observar de mejor manera los resultados obtenidos.

**Tabla 11**

*Resultados de deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR obtenidos por la variación de los espesores de pavimento.*

ECA(MPa)	$h_{TOTAL}(m)$	$\Delta z(mm)$	$\epsilon_r$	$\epsilon_z$
<b>3250</b>	0,6	0,31409	2,365E-05	9,858E-05
	0,47	0,32872	1,404E-05	1,197E-04
	0,35	0,34816	5,422E-05	1,579E-04
	0,23	0,39455	4,824E-05	2,699E-04
<b>2500</b>	0,6	0,32645	2,693E-05	1,017E-04
	0,47	0,34104	1,604E-05	1,256E-04
	0,35	0,36138	6,216E-05	1,656E-04
	0,23	0,41081	5,488E-05	2,809E-04
<b>1500</b>	0,6	0,35233	3,315E-05	1,069E-04
	0,47	0,34088	2,214E-05	1,231E-04
	0,35	0,38900	7,864E-05	1,952E-04
	0,23	0,44383	6,822E-05	2,992E-04

*Nota.* La Tabla se observan los resultados de deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR obtenidos por la variación de los espesores de pavimento.

**Tabla 12**

*Diferencia porcentual de la variación de espesores de pavimento para la deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR*

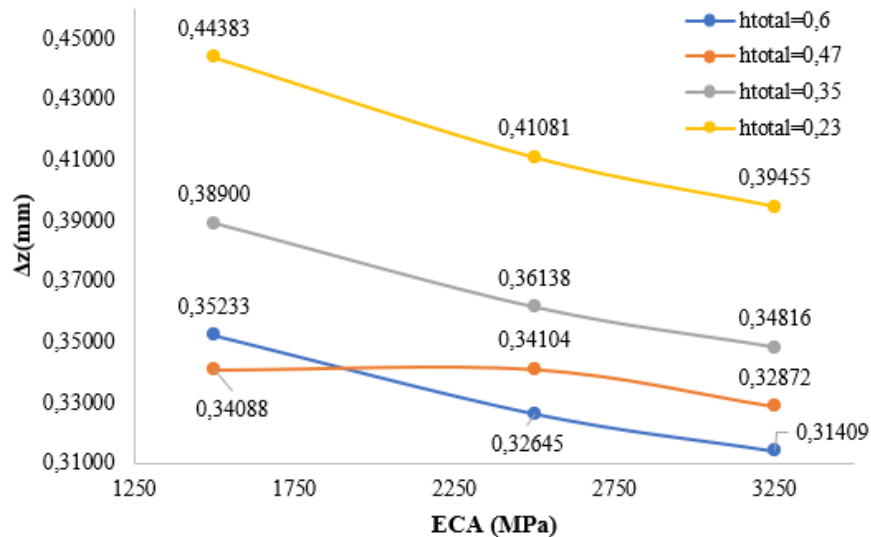
ECA(MPa)	hTOTAL(m)	$\Delta z$ (mm)	$\epsilon_r$	$\epsilon_z$
<b>3250</b>	0,6	0,00%	0,00%	0,00%
	0,47	4,66%	40,64%	21,43%
	0,35	10,85%	129,22%	60,17%
	0,23	25,62%	103,92%	173,84%
<b>2500</b>	0,6	0,00%	0,00%	0,00%
	0,47	4,47%	40,44%	23,54%
	0,35	10,70%	130,83%	62,94%
	0,23	25,84%	103,79%	176,34%
<b>1500</b>	0,6	0,00%	0,00%	0,00%
	0,47	3,25%	33,20%	15,07%
	0,35	10,41%	137,24%	82,49%
	0,23	25,97%	105,81%	179,83%

*Nota.* La Tabla se observan la diferencia porcentual de la variación de espesores de pavimento para la deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR.

En la Figura 13 se pueden ver los resultados obtenidos correspondientes a la deflexión superficial de la estructura de pavimento frente a la variación de altura total y de módulos de elasticidad de la carpeta asfáltica. En la gráfica se puede observar la representación visual de cada una de las estructuras geométricas estudiadas, en donde se ve reflejado que a medida que aumenta la deflexión, tanto el módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica como la altura total disminuyen proporcionalmente.

**Figura 13**

*Deflexión superficial variando los espesores de pavimento en función del módulo de elasticidad de la CA*

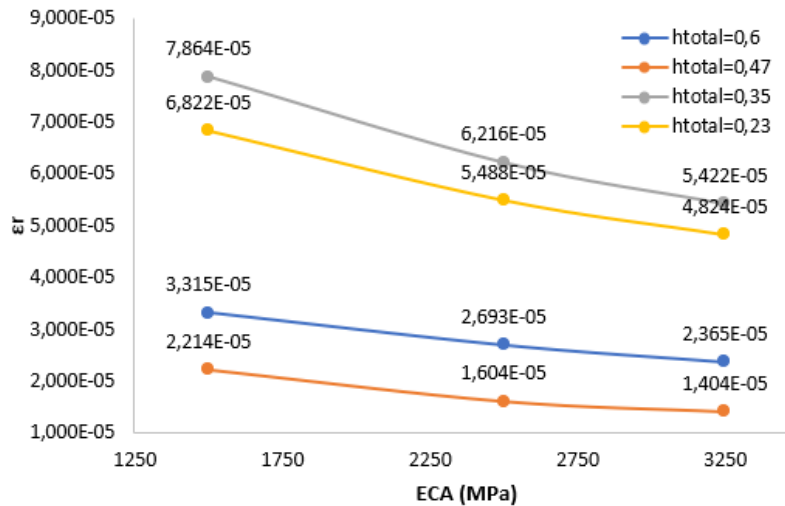


*Nota.* La Figura representa los resultados obtenidos de la deflexión superficial variando los espesores de pavimento en función del módulo de elasticidad de la CA

En la Figura 14 se ven reflejados los valores de deflexión horizontal frente a la variación de módulos de elasticidad de la carpeta asfáltica y los espesores totales. En las gráficas se puede ver que a medida que aumenta el módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica y varía el espesor total de cada una de las geometrías, los valores de  $\epsilon_r$  disminuyen presentado una tendencia decreciente.

**Figura 14**

*Deformación horizontal en el fondo de la CA en función del módulo de elasticidad de la CA variando los espesores del pavimento.*

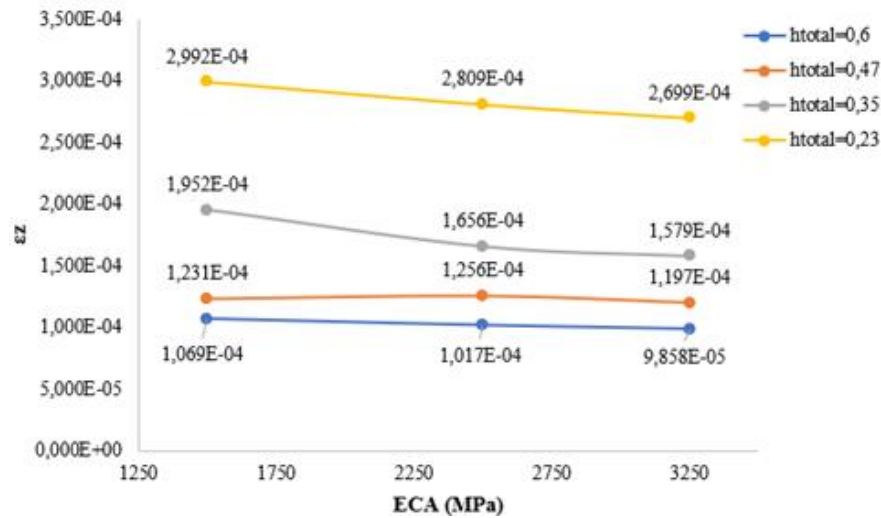


*Nota.* La Figura representa los resultados obtenidos de la deformación horizontal en el fondo de la CA en función del módulo de elasticidad de la CA variando los espesores del pavimento.

En la Figura 15 se muestra que en la altura total para las capas estructurales de 0.6m prácticamente no hay influencia del módulo de elasticidad de la CA. También se puede observar que en las otras alturas la influencia de espesores en la estructura de pavimento es mucho más relevante que la influencia del módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica en la deflexión vertical. Teniendo en cuenta esto, se puede concluir que a menor módulo de elasticidad en la carpeta asfáltica y menor altura total, hay un mayor incremento de deflexión vertical. Teniendo en cuenta este análisis se observó un comportamiento inversamente proporcional.

**Figura 15**

*Deformación vertical en la superficie de la SR en función del módulo de elasticidad de la CA variando los espesores del pavimento.*



*Nota.* La Figura representa los resultados obtenidos de la deformación vertical en la superficie de la SR en función del módulo de elasticidad de la CA variando los espesores del pavimento.

**3.3. Grado de sensibilidad de las variables de los parámetros de diseño estructural.**

Para este análisis se determinó el grado de sensibilidad para la estructura de referencia, haciendo una comparación con el mayor porcentaje de variación en términos de deflexión superficial, deformación horizontal y deformación vertical en cada uno de los parámetros de diseño estudiado (módulo de elasticidad en cada una de las capas y las alturas totales de cada estructura). El porcentaje que se obtuvo se clasificó según Higuera (2006). Esta escala de sensibilidad está representada en la Tabla 13.

**Tabla 13**

*Escala para definir grado de sensibilidad.*

<b>Grado de sensibilidad</b>	<b>% Variación</b>
<b>Baja</b>	<15
<b>Media</b>	15-30
<b>Alta</b>	>30

*Nota.* La Tabla se puede observar la escala para definir grado de sensibilidad.

Al implementar el análisis de sensibilidad de las variables que intervienen en el diseño para la estructura de pavimento flexible de acuerdo con el estudio anterior, se puede evaluar su grado de sensibilidad clasificándolas según la influencia que tienen.

Las variables analizadas en términos de deflexión superficial, deformación horizontal y deformación vertical se encuentran en la Tabla 14, Tabla 15, Tabla 16.

**Tabla 14**

*Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de  $\Delta z$*

<b>Variable de diseño</b>	<b>Máximo % variación <math>\Delta z</math></b>	<b>Grado de sensibilidad</b>
<b><math>h_{TOTAL}</math></b>	25,97%	MEDIA
<b><math>E_{BG}</math></b>	19,77%	MEDIA
<b><math>E_{SBG}</math></b>	17,00%	MEDIA
<b><math>E_{CA}</math></b>	14,58%	BAJA

*Nota.* La Tabla se puede observar el grado de sensibilidad variables de diseño en términos de  $\Delta z$

**Tabla 15**

*Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de  $\epsilon_r$*

<b>Variable de diseño</b>	<b>Máximo % variación <math>\epsilon_r</math></b>	<b>Grado de sensibilidad</b>
$h_{TOTAL}$	144,88%	ALTA
$E_{BG}$	152,97%	ALTA
$E_{SBG}$	167,60%	ALTA
$E_{CA}$	84,47%	ALTA

*Nota.* La Tabla se puede observar el grado de sensibilidad variables de diseño en términos de  $\epsilon_r$

**Tabla 16**

*Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de  $\epsilon_z$*

<b>Variable de diseño</b>	<b>Máximo % variación <math>\epsilon_z</math></b>	<b>Grado de sensibilidad</b>
$h_{TOTAL}$	178,02%	ALTA
$E_{BG}$	36,32%	ALTA
$E_{SBG}$	263,42%	ALTA
$E_{CA}$	45,15%	ALTA

*Nota.* La Tabla se puede observar el grado de sensibilidad variables de diseño en términos de  $\epsilon_z$

#### 4. Conclusiones

Con este trabajo de investigación se pudo determinar que no hubo una manera potencial de diferenciar un material granular marginal de uno convencional, es por esto que gran parte del trabajo realizado cumple tanto para materiales granulares marginales como para los convencionales debido a que las variables de diseño utilizadas corresponden a un módulo de elasticidad y espesores de capa que se pueden tener en los dos tipos de materiales, es por ello que

para esta investigación se tuvieron en cuenta variables de diseño para los materiales granulares marginales en la estructura de las capas granulares, idealizando la implementación de dichos materiales en las estructuras de pavimento típicas.

Las simulaciones numéricas que se utilizan al momento de realizar diseños y análisis de estructuras de pavimentos flexibles, deben ir acompañadas de un enmallado adecuado ya que es un factor importante a la hora de revisar los resultados, puesto que al tener un valor de enmallado más pequeño la precisión de los datos es mayor, siendo esenciales a la hora de garantizar la calidad, seguridad y durabilidad de las vías ya que permite tener una mejor visualización del comportamiento que esta va a tener de acuerdo con las diferentes variables aplicadas de una manera rápida y eficaz.

Teniendo en cuenta los resultados y chequeos obtenidos de las 108 simulaciones estudiadas, se sugiere que uno de los factores que afectan en mayor medida a la estructura de pavimento son los espesores de capas ya que es un factor clave afectando el desempeño y la capacidad estructural del pavimento. Es por ello, que las estructuras que presentan un menor espesor de capa tienden a tener un mayor nivel de deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del concreto asfáltico y deformación vertical en la parte superior de la subrasante. Teniendo en cuenta lo anterior, las estructuras de pavimento que presentan déficit en su espesor son más vulnerables a presentar fallas de ahuellamiento que generalmente se produce por la deformación de las bases y la subrasante, fatiga generada en la base de la carpeta asfáltica y otros problemas que reducen la vida útil de las vías y generan un incremento a la hora de realizar mantenimientos y reparaciones.

De igual manera como se observa en los resultados, la rigidez de los materiales de las capas granulares afectan significativamente el comportamiento de la estructura de pavimento ya que

estas proporcionan el soporte y distribución de las cargas del tránsito a lo largo del pavimento, reduciendo así la tensión de la carpeta asfáltica y aumentando su vida útil. Cabe aclarar que la rigidez de la base granular genera un mayor impacto en la respuesta estructural, ya que es la capa más cercana a la carpeta asfáltica, influyendo en la capacidad de carga y en la estabilidad del pavimento. Como se puede observar en las simulaciones que tienen módulos de elasticidad más bajos en la base granular, el nivel de deflexión y deformación es mayor.

La variable más crítica que afecta la capacidad de carga, el desempeño y la durabilidad del pavimento es el espesor de capas. Por ello es indispensable tener un control adecuado del espesor en el diseño y la construcción, siendo esto fundamental para asegurar la calidad y la vida útil del pavimento. Haciendo un estudio adecuado para diseñar el espesor de la estructura de pavimento, se asegura un mejor control de la capacidad de carga que podría soportar la vía, indicando una mayor resistencia sin sufrir daños estructurales ni deformaciones excesivas, previniendo de esta manera fallas que afecten la transitabilidad de los vehículos.

### Referencias Bibliográficas

#### Ejemplo

- Cáceres, Ó. D. & Rodríguez, A. D. (2021). Estimación de la resistencia monotónica en materiales granulares marginales como alternativa para la construcción de vías. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/38106>.
- Castañeda Y. y Salamanca C. (2016). Análisis del comportamiento de una estructura de pavimento flexible en una vía de tráfico pesado, caso particular vía urbana en la ciudad de Bogotá barrio santa catalina. Universidad la Gran Colombia. Bogotá, Colombia.
- Consejo nacional de política económica y social CONPES (2016). Documento CONPES 3857. [https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3857\\_RedTerciaria.pdf](https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3857_RedTerciaria.pdf).
- Coria C., Hernández R. y Garnica P, (2018). Teoría para calcular esfuerzos, deformaciones y deflexiones en pavimentos flexibles: un enfoque mecanicista. Instituto Mexicano de transporte, México, Documento técnico N° 72 ISSN 0188-7114
- Higuera Sandoval C. H. (2006). Análisis de sensibilidad de las variables de diseño de un pavimento flexible y su incidencia en la deflexión. Escuela de transporte y Vías. Facultad de Ingeniería. 15(21), 77-86. ISSN: 0121-1129. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=413940754009>
- Higuera-Sandoval, C. H. (2012). Comportamiento estructural de un pavimento flexible, esfuerzos, deformaciones y deflexiones. Revista Ingenio, 5(1), 8–15. <https://doi.org/10.22463/2011642X.2000>

- Higuera C. y Nova D. (2013). Comportamiento estructural de un pavimento flexible, esfuerzo – deformación y deflexiones. Revista Usta Tunja  
[usthttp://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/lingenieur/article/view/857](http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/lingenieur/article/view/857)
- Instituto Nacional de Vías (2007). Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito. Bogotá: Gobierno de Colombia.  
<https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/987-manual-de-diseno-de-pavimentos-asfalticos-para-vias-con-bajos-volumenes-de-transito>.
- Li, W., Wilson, D., & Larkin, T. (2017). Marginal material evaluation and selection using analytic hierarchy process model. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 64-85.
- Olivella S., Vaunat J., Rodríguez – Dono A. (2023). Manual de Code\_Bright, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.  
[https://deca.upc.edu/en/projects/code\\_bright/downloads/users\\_guide/view](https://deca.upc.edu/en/projects/code_bright/downloads/users_guide/view)
- GiD simulation, (2021). GiD simulation. <https://www.gidsimulation.com/>
- Páez M. J. (2023). Análisis de sensibilidad de variables elásticas sobre estructuras de pavimentos conformados por materiales granulares marginales a partir de simulaciones numéricas. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Santander.
- Rincón - Morantes J., Álvarez A. E. y Reyes – Ortiz O. (2022). Estimación de la rigidez de MGM no ligados mediante ensayos CBR dinámico. *Ingeniería y desarrollo*, vol. 40, no. 1, pp. 2145-9371. <http://www.scielo.org.co/pdf/inde/v40n1/2145-9371-inde-40-01-92.pdf>.
- Rodríguez A. y Cáceres O. (2021). Estimación de la resistencia monotónica de los MGM como alternativas en la construcción de vías. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.

Rondón Quintana, HA, & Reyes Lizcano, FA (2007). Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: tendencias, alcances y limitaciones. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 17-2, pp. 41-65.

Sánchez F. (2016). Módulo 2: esfuerzos y deformaciones en pavimentos asfálticos. <https://es.slideshare.net/castilloaroni/mdulo-2-esfuerzos-y-deformaciones-en-pavimentos-asfálticos-fernando-sánchez-sabogal>.