

Análisis de sensibilidad de variables de diseño sobre estructuras de pavimento conformados por  
materiales granulares marginales a partir de simulaciones numéricas

María José Páez Arenas

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

Doctor en ingeniería

Codirector

Brayan Andrés Velásquez Bueno

Estudiante de maestría en ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de ingeniería Civil

Pregrado

Bucaramanga

Año 2023

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo principalmente a Dios, quien ha sido mi guía en el caminar de mi vida, bendiciéndome y dándome fuerzas para continuar con cada una de mis metas sin desfallecer. A mis padres Hilda y Jesús, que son el motor de mi vida, quienes con su amor, valores, esfuerzo y paciencia me han ayudado a cumplir todos mis sueños.

### **Agradecimientos**

A Dios por la vida, por la paciencia y sabiduría que me ha brindado durante este proceso.

A mis padres por haberme dejado la mejor herencia que se le puede dar a los hijos que es  
el estudio.

A mis docentes de Escuela de Ingeniería Civil quienes han sido la base para mi vida profesional, especialmente a mi Director de tesis Ph.D Vladimir Ernesto Merchán por guiar esta investigación, por sus conocimientos y apoyo.

A mi Codirector, el Ingeniero Brayan Andrés Velásquez, por su amistad, dedicación y apoyo moral e intelectual.

En general, a todos quienes contribuyeron de manera directa o indirecta con un granito de arena para culminar esta meta.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	18
1. Objetivos.....	20
1.1 Objetivo General.....	20
1.2 Objetivos Específicos.....	20
2. Metodología .....	21
2.1 Metodologías de diseño de pavimentos flexibles .....	22
2.1.1. Métodos De Diseño Analíticos, Mecanicistas o Racionales.....	22
2.1.2. Metodología de elementos finitos.....	22
2.2. Parámetros de diseño .....	23
2.3. Modelo estructural de referencia .....	25
2.3. Determinación del programa de modelamiento.....	27
3. Resultados.....	33
3.1. Comportamiento de la deflexión y deformación ante la variación del módulo de elasticidad de las capas del pavimento .....	34
3.1.1 Variación en el módulo de la base granular y del concreto asfáltico.....	34
3.1.2 Variación en el módulo de elasticidad de la subbase granular y del concreto asfáltico .....	39
3.1.3. Comportamiento de la deflexión y deformación ante la variación de los espesores del pavimento.....	44
3.2. Grado de Sensibilidad De Las Variables De Los Parámetros De Diseño.....	49
4. Conclusiones .....	52

Referencias Bibliográficas ..... 55

Apéndices..... 57

### Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Rango de variación espesor de capas.....	24
Tabla 2. Rango de variación del módulo de las capas del pavimento. ....	25
Tabla 3. Parámetros constantes en el modelo estructural de pavimento.....	25
Tabla 4. Diferencia entre los resultados de deflexión entre los programas. ....	29
Tabla 5. Diferencia entre los resultados de deflexión entre los programas. ....	31
Tabla 6. Resultados deflexiones y deformación para los modelos estructurales variando los módulos de elasticidad de BG y CA. ....	35
Tabla 7. Grado de sensibilidad ante la variación de $E_{BG}$ en términos de deflexión y deformación. .....	35
Tabla 8. Grado de sensibilidad ante la variación de $E_{CA}$ en términos de deflexión y deformación. .....	36
Tabla 9. Resultados deflexiones y deformación para los modelos estructurales variando el $E_{SBG}$ y $E_{CA}$ . ....	40
Tabla 10. Grado de sensibilidad ante la variación de $E_{SBG}$ en términos de deflexión y deformación. .....	40
Tabla 11. Resultados de deflexiones y deformaciones para los modelos estructurales variando los espesores del pavimento y el módulo de elasticidad del CA. ....	45
Tabla 12. Grado de sensibilidad ante la variación de $h_{total}$ en términos de deflexión y deformaciones. ....	46

Tabla 13. Escala para definir grado de sensibilidad. ....	49
Tabla 14. Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de $\Delta z$ . ....	50
Tabla 15. Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de $\epsilon_r$ . ....	50
Tabla 16. Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de $\epsilon_z$ . ....	51

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Modelo estructural de referencia 1 Fuente: Elaboración propia .....	26
Figura 2. Modelo estructural de referencia 2 .....	26
Figura 3. Preprocesamiento estructura de pavimento en terraplén, programa CB-GiD®. ....	28
Figura 4. Posprocesamiento estructura de pavimento en terraplen, programa CB-GiD®. ....	28
Figura 5. Comparación de la deflexión en función de la profundidad entre los softwares Pitra Pave® y CB-GiD®. ....	29
Figura 6. Modelación de la estructura de pavimento con geometría rectangular en el programa CB- GiD®. ....	30
Figura 7. Comparación de la deflexión en función de la profundidad entre los softwares Pitra Pave® y CB-GiD®. ....	31
Figura 8. Deflexión total en función del módulo de elasticidad del CA, variando el módulo de elasticidad de la BG .....	37
Figura 9. Deformación por tensión en el fondo del CA en función del módulo de elasticidad del CA, variando el módulo de elasticidad de la BG. ....	38
Figura 10. Deformación vertical de compresión actuante sobre la subrasante en función del módulo de elasticidad del CA, variando el módulo de elasticidad de la BG. ....	39
Figura 11. Deflexión total en función del módulo de elasticidad del CA, variando el módulo de elasticidad SBG. ....	42

Figura 12. Deformación por tensión en el fondo del CA en función del módulo de elasticidad del CA, variando el módulo de elasticidad SBG. ....	43
Figura 13. Deformación vertical de compresión actuante sobre la subrasante en función del módulo de elasticidad del CA, variando el módulo de elasticidad SBG. ....	44
Figura 14. Deflexión en función del módulo de elasticidad del CA, variando los espesores del pavimento.....	47
Figura 15. Deformación por tensión en el fondo del CA en función del módulo de elasticidad del CA, variando los espesores del pavimento. ....	48
Figura 16. Deformación vertical de compresión actuante sobre la subrasante en función del módulo de elasticidad del CA, variando los espesores del pavimento. ....	49

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Página principal de la base de datos, donde se encuentra el motor de búsqueda para las estructuras simuladas y los principales resultados. ....	57

## Glosario

**Capas de pavimento:** “Capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Constituido por, capa base, capa de subbase, capa de subrasante.” (Cruz Rodríguez, 2019)

**Code\_Bright®:** Programa de Método de Elemento Finito (FEM) capaz de realizar análisis acoplados termo-hidromecánicos (THM) en medios geológicos. Desarrollado en el Departamento de Ingeniería Civil y Medioambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) y trabajos combinados con el pre-procesador GiD, con el acompañamiento del Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE).

**Deflexiones ( $\delta$ ):** “Es el grado en el que un elemento estructural se desplazó bajo la aplicación de una fuerza o una carga.” (Cruz Rodríguez, 2019)

**Deformaciones unitarias ( $\epsilon$ ):** “Se puede definir como la relación existente entre la deformación total y la longitudinal inicial del elemento, la cual permitirá determinar la deformación del elemento sometido a esfuerzos de tensión o compresión axial.” (Cruz Rodríguez, 2019)

**Esfuerzos ( $\sigma$ ):** “Es la fuerza que actúa sobre un cuerpo para deformarlo.” (Cruz Rodríguez, 2019)

**GiD®:** Procesador universal, de uso fácil y adaptación para simulaciones numéricas en ciencia e ingeniería. Diseñado para cubrir todas las necesidades comunes en el campo de simulaciones numéricas de pre a post-procesamiento. (GiD, 2023)

**Materiales granulares marginales (MGM):** “Los materiales marginales son aquellos que no cumplen por completo con las especificaciones de los materiales viales normales que se usarán en un país o región, pero que aún tienen el potencial para usarse con éxito en algunas aplicaciones.” (Brunschwig, 1989)

**MEPDG:** “Guía de diseño de pavimentos Mecanico-Empirico, es una herramienta completa para el análisis y diseño de pavimentos. MEPDG ha sido el resultado de varios años de investigación en los Estados Unidos.” (Castillo, 2017)

**Método de elementos finitos (MEF):** “El Método de Elementos Finitos (MEF) es una herramienta versátil a disposición de los investigadores para el análisis del comportamiento de materiales y estructuras sometidas a diversos estados de carga. Su mayor ventaja consiste en la posibilidad de simular de forma realista la respuesta de un sistema bajo diversos estímulos mecánicos sin tener que recurrir a métodos experimentales que pueden ser en algunos casos excesivamente costosos o incluso imposibles de realizar debido a la propia naturaleza del fenómeno estudiado.” (Ramírez, 2012)

**Pavimento Flexible:** “Está formado por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la sub-base”. (Cruz Rodríguez, 2019)

**Pitra Pave®:** “Es un software de multicapa elástica general para el análisis estructural de pavimentos flexibles, el cual permite obtener esfuerzos, deformaciones y deflexiones ante determinadas cargas.” ((LanammeUCR), Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, 2023)

**Relación de poisson:** “El coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) es un parámetro

característico de cada material que indica la relación entre las deformaciones longitudinales que sufre el material en sentido perpendicular a la fuerza aplicada y las deformaciones longitudinales en dirección de la fuerza aplicada sobre el mismo.”  
(Cruz Rodríguez, 2019)

**Teoría multicapa elástica:** “Es un método matemático para calcular las respuestas (deformación unitaria, esfuerzos y deflexiones) en una estructura con múltiples capas de espesor finito; exceptuando la última capa, la cual se supone con espesor y extensión infinita.” (Cruz Rodríguez, 2019)

## Resumen

**Título:** Análisis de sensibilidad de variables de diseño sobre estructuras de pavimentos conformados por materiales granulares marginales a partir de simulaciones numéricas \*\*

**Autor:** María José Páez Arenas<sup>††</sup>

**Palabras Clave:** pavimento flexible, diseño de pavimentos, materiales granulares marginales, modelamiento de pavimentos flexibles.

**Descripción:** El propósito de este estudio es presentar un análisis de sensibilidad de algunas variables que influyen en el comportamiento mecánico de estructuras de pavimento flexible, particularmente cuando algunas de sus capas estructurales se encuentran conformadas por materiales granulares marginales evaluando la respuesta mecánica en términos de deflexión total, deformación horizontal por tensión en el concreto asfáltico y deformación vertical por compresión en la subrasante. Las variables objeto de estudio fueron espesores y módulos de elasticidad en las capas de concreto asfáltico, base y subbase. La investigación utiliza la teoría multicapa elástica y el método de elementos finitos como metodologías para el cálculo de la respuesta mecánica en las estructuras de pavimento evaluadas a través del modelamiento con los programas Pitra Pave® y Code\_Bright® respectivamente, este último en conjunto con el software GiD® que se acopla como

---

\*\* Análisis de sensibilidad de variables de diseño sobre estructuras de pavimentos conformados por materiales granulares marginales a partir de simulaciones numéricas

<sup>††</sup> Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Pregrado. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes. Doctor en Ingeniería. Codirector: Brayan Andres Velásquez Bueno. Estudiante de maestría en ingeniería

pre y post procesador. Con el análisis de los datos recolectados a partir de las simulaciones numéricas se pudo evaluar el nivel de sensibilidad e importancia que tienen los diferentes parámetros evaluados y definir aquellos que afectan en mayor grado la estructura de pavimento flexible como los espesores de capa, para en futuros trabajos poder generar de manera más eficiente herramientas para la estimación de modelos estructurales que cumplan con los criterios de diseño necesarios.

### Abstract

**Title:** Sensitivity analysis of design variables on pavement structures made up of marginal granular materials from numerical simulations<sup>‡‡</sup>

**Author(s):** María José Páez Arenas<sup>§§</sup>

**Key Words:** flexible pavement, pavement design, marginal granular materials, modeling of flexible pavements.

**Description:** The purpose of this study is to present a sensitivity analysis of some variables that influence the mechanical behavior of flexible pavement structures, particularly when some of their structural layers are made up of marginal granular materials, evaluating the mechanical response in terms of total deflection, horizontal tension deformation in the asphalt concrete and vertical compression deformation in the subgrade. The variables under study were thicknesses and moduli of elasticity in the asphalt concrete, base and subbase layers. The research uses the elastic multilayer theory and the finite element method as methodologies for calculating the mechanical response in the pavement structures evaluated through modeling with the Pitra Pave® and Code\_Bright® programs respectively, the latter in conjunction with the software GiD® that is coupled as a pre and post processor. With the analysis of the data collected from the numerical simulations, it was possible to evaluate the level of sensitivity and importance of the different parameters evaluated and define those that most affect the flexible pavement structure, such as

---

<sup>‡‡</sup> Degree Work

<sup>§§</sup> Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes. Engineering doctor. Codirector: Brayán Andrés Velásquez Bueno. Master's student in Engineering

layer thicknesses, for future purposes, works to be able to more efficiently generate tools for the estimation of structural models that meet the necessary design criteria.

## **Introducción**

La infraestructura vial colombiana está conformada por una red vial estimada de 205.745 Km de carretera, de los cuales el 69 % (142.284 Km) de la red vial corresponde a vías terciarias, y solo el 10% se considera en buen estado (Ministerio de Transporte, 2021). Las carreteras terciarias presentan falencias e irregularidades debido a que la etapa de construcción de estructuras de pavimento en zonas rurales suele ser costosa y desafiante, ya que en la mayoría de los casos se tienen limitaciones al momento de conseguir materiales granulares que cumplan con las especificaciones técnicas del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Debido a esta situación, se han propuesto alternativas en el diseño de pavimentos flexibles, como la implementación de materiales granulares marginales (MGM).

Los MGM son materiales que a pesar de no cumplir todos los criterios de calidad establecidos en las especificaciones para la conformación de capas estructurales de pavimento (e.g., INVIAS) podrían ser utilizados a futuro para vías de bajo tráfico si se mejora su comportamiento mecánico mediante el uso de cementantes alternativos de bajo costo u otras técnicas de mejoramiento, garantizando el nivel de servicio. Lo que podría originar una reducción del costo en fase de construcción, especialmente en intervenciones de vías de bajo nivel de tránsito. Esta situación constituye un pilar fundamental en la proyección de nuevos diseños en pavimentos flexibles, más económicos, pero manteniendo la durabilidad. Por lo tanto, se hace necesario analizar este tipo de posibilidades mediante enfoques mecánico-empíricos, ya que estos métodos permiten evaluar el comportamiento de cada una de las capas estructurales que conforman la estructura del pavimento flexible ante las cargas producidas por el paso de vehículos con una

mayor precisión y control sobre alguna de las variables mecánicas de respuesta usadas para el análisis y diseño.

Por otra parte, la metodología multicapa elástica, ofrece una visión amplia de la respuesta estructural del pavimento, expresada en términos de deflexiones, deformaciones y esfuerzos. Se parte del principio de que cada material presenta un comportamiento elástico lineal, lo que a su vez determina la capacidad estructural del pavimento frente a fenómenos como la fatiga del concreto asfáltico y el ahuellamiento de materiales no ligados determinados a partir de variables como deflexiones totales, deformaciones horizontales en tensión y deformaciones verticales en compresión, facilitando la toma de decisiones al momento de establecer estructuras para evitar el subdimensionamiento y cumplir con todos los requerimientos de diseño.

Este estudio se enfoca en evaluar diferentes alternativas de estructuras de pavimento flexible para la red vial terciaria en Colombia, en donde las capas estructurales de base y subbase granular podrían estar conformadas por MGM. De esta forma, se simularon algunas posibles combinaciones de parámetros elásticos lineales, lo que permitió realizar un análisis de sensibilidad para comprender cómo la variación en el módulo de rigidez y los cambios en las configuraciones geométricas influyen sobre la respuesta mecánica de las estructuras.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General.**

Desarrollar un análisis de sensibilidad de variables de diseño sobre estructuras de pavimento constituida por materiales granulares marginales.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Realizar un análisis de la influencia de los posibles espesores de las diferentes capas que conforman la estructura de pavimento.

Evaluar la influencia de las variables en desplazamientos y deformaciones de la estructura de pavimento.

Analizar el comportamiento de la estructura de pavimento ante las variaciones de rigidez de las diferentes capas que la conforman.

Desarrollar una base de datos a partir de simulaciones numéricas para el análisis del comportamiento mecánico de una estructura de pavimento.

## 2. Metodología

La investigación consistió en evaluar las respuestas que experimentan las estructuras de pavimento ante las cargas generadas por el tráfico y la calidad de los materiales, principalmente de las capas de la base y subbase. Inicialmente, se designaron los materiales granulares utilizados como MGM debido a que no cumplían con los requisitos establecidos según el INVIAS. Para ser más específicos, el Contenido de Finos requerido era del 50%, mientras que el material presentó un 22%. El Índice de Plasticidad exigido era del 3% para la base y 6% para la subbase, pero el material mostró un valor del 11%. Además, en cuanto al Desgaste en la Máquina de los Ángeles, se esperaba que fuera del 40% para la base y del 50% para la subbase, pero se obtuvo un valor de 60.73%.

Para ello, en primer lugar, se realizó una revisión bibliográfica donde se contextualiza sobre diferentes métodos de diseño para evaluar la deformación y deflexión en pavimentos flexibles a través de programas computacionales con el propósito de fundamentar el enfoque del estudio. En segundo lugar, se definieron y organizaron los datos de entrada de todas las estructuras de pavimento a implementar, así como los modelos estructurales y puntos de evaluación más significativos para realizar el análisis. En tercer lugar, se modelaron las estructuras de pavimento por medio de los softwares Pitra Pave®, Code\_ Bright® y GiD®. La información obtenida fue organizada en una base de datos, para luego realizar la validación de los programas y seleccionar el que se adecuara de manera óptima a la investigación. Finalmente, se analizó la influencia en la variación de los parámetros de diseño sobre el comportamiento de las estructuras de pavimento flexible.

## **2.1 Metodologías de diseño de pavimentos flexibles**

### **2.1.1. Métodos De Diseño Analíticos, Mecanicistas o Racionales**

Estos métodos de diseño consideran que las capas que conforman la estructura del pavimento están sometidas a esfuerzos, deformaciones y deflexiones que influyen en el comportamiento de este. Los estados son calculados suponiendo que el pavimento flexible es un sistema multicapa elástico lineal compuesto por capas con espesor finito, exceptuando la última capa (subrasante), la cual se supone con espesor y extensión infinita. Para el cálculo de esfuerzos y deformaciones, se emplean programas de computador disponibles desde la década de los 60's. En estos programas se introducen la carga, la presión de contacto, las propiedades mecánicas de los materiales (por lo general el módulo elástico y la relación de Poisson) y el espesor de las capas del pavimento con el fin de obtener los estados de esfuerzo, deformación y deflexión. Una vez calculados estos estados, se comparan con los parámetros admisibles calculados en función del tránsito estimado para el periodo de diseño estructural. En un procedimiento de ensayo y error (aumentando o disminuyendo por lo general los espesores de capas) se dimensionan las capas que conformarán la estructura de pavimento (Rondón Quintana, 2007).

Algunos de los programas que se utilizan comercialmente son: Pitra Pave®, 3D-Move®, Weslea®, Bisar®, EverStress®, entre otros. Para la investigación se implementará el software Pitra Pave® de LanammeUCR ((LanammeUCR), Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, 2023).

### **2.1.2. Metodología de elementos finitos.**

En los últimos años se han venido desarrollando metodologías para el estudio y análisis de pavimentos, empleando el método elementos finitos. Estos métodos emplean ecuaciones

constitutivas para el cálculo de esfuerzos, deformaciones y deflexiones, 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 macromecánico) (Rondón Quintana, 2007).

Para el caso de los pavimentos, algunas de las ventajas del empleo de programas de elementos finitos radican en que pueden 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. Adicionalmente, son capaces de modelar diferentes geometrías, condiciones de frontera, criterios de falla y carga cíclica.

En el mercado existen diversos programas de elementos finitos, pero para el estudio se utilizará el software Code\_Bright® que es implementado para el análisis de fenómenos acoplados, de tipo mecánicos, hidráulicos y térmicos en medios geológicos, el cuál fue desarrollado por el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya (Universitat Politècnica de Catalunya., 2012). 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 (Leiva, 2022).

Para efectos de interpretación y organización se decide denominar CB-GiD® a la combinación de los dos programas.

## **2.2. Parámetros de diseño**

Para el análisis de sensibilidad desarrollado, fue necesario establecer los valores de las variables de entrada, las cuales fueron requeridas en la ejecución de las simulaciones. Cada

estructura de pavimento está compuesta por tres capas estructurales: concreto asfáltico (CA), base granular (BG) y subbase granular (SBG). Los parámetros de diseño que presentaron cambio diferenciando cada estructura de pavimento fueron el espesor del CA ( $h_{CA}$ ), el espesor de la BG ( $h_{BG}$ ) y el espesor de la SBG ( $h_{SBG}$ ), así como también el módulo dinámico del CA (ECA), el módulo resiliente de la BG (EBG) y el módulo resiliente de la SBG (ESBG). Con la variación de espesores fue posible establecer diferentes configuraciones geométricas (C1, C2, C3, C4) tal y como se indica en la Tabla 1, mientras que para los módulos se establecieron valores como lo muestra la Tabla 2, que generarían diferentes combinaciones posibles. Sin embargo, algunos valores, como la relación de Poisson ( $\mu$ ), el módulo resiliente de la subrasante ( $E_{SBG}$ ), 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 neumáticos ( $y$ ) permanecieron constantes, como se observan en la Tabla 3.

**Tabla 1.** Rango de variación espesor de capas.

<i>Espesor de capa [m]</i>					
<i>Geometría</i>	$h_{CA}$	$h_{BG}$	$h_{SBG}$	$h_{SBR}$	$h_{TOTAL}$
<b><i>C1</i></b>	0,10	0,25	0,25	-	0,6
<b><i>C2</i></b>	0,07	0,20	0,20	-	0,47
<b><i>C3</i></b>	0,05	0,15	0,15	-	0,35
<b><i>C4</i></b>	0,03	0,10	0,10	-	0,23

**Nota.** El software Pitra Pave® establece el espesor de la capa de subrasante ( $h_{SBR}$ ) como infinito.

**Tabla 2.** *Rango de variación del módulo de las capas del pavimento.*

<i>Módulos [MPa]</i>		
<b>E<sub>CA</sub></b>	<b>E<sub>BG</sub></b>	<b>E<sub>SBG</sub></b>
<b>3250</b>	250	200
<b>2500</b>	200	150
<b>1500</b>	150	100

**Tabla 3.** *Parámetros constantes en el modelo estructural de pavimento.*

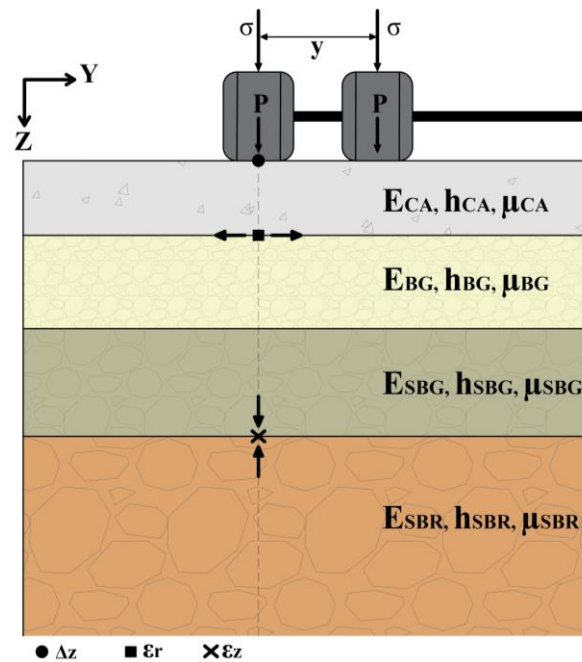
<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<b>μ<sub>CA</sub></b>	0,30
<b>μ<sub>BG</sub></b>	0,35
<b>μ<sub>SBG</sub></b>	0,35
<b>μ<sub>SBR</sub></b>	0,35
<b>E<sub>SBR</sub> (MPa)</b>	80,00
<b>r(m)</b>	0,108
<b>y(m)</b>	0,324
<b>P(KN)</b>	20,50
<b>σ(KPa)</b>	562,00

### 2.3. Modelo estructural de referencia

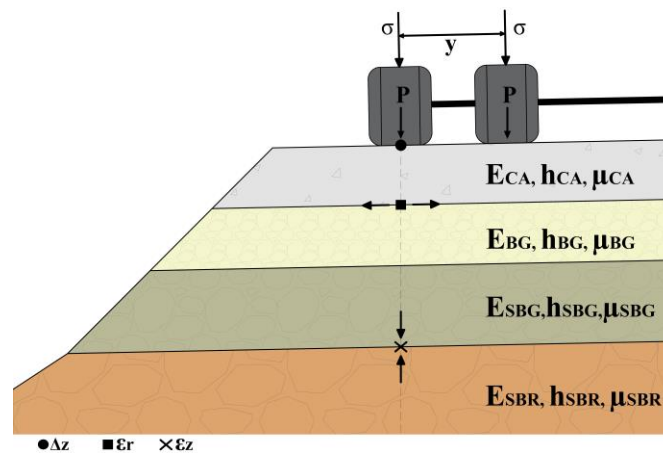
El estudio consideró dos diferentes tipos de secciones para la idealización de estructuras de pavimento flexibles, las cuales fueron llamadas modelo 1 y modelo 2 y se presentan en la Figura 1 y Figura 2, respectivamente. El primer modelo presenta una geometría de extensión semi-infinita del sistema multicapa elástico, sin ningún tipo de inclinación en las capas del pavimento. El segundo modelo se muestra en la Figura 2, donde se adaptó la geometría presentada por Leiva y Solano (2022). En este modelo, se 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 SBR de 33° y en la CA, BG y SBG de 45°. Ambos modelos presentan dos llantas del eje

sencillo 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 del concreto asfáltico ( $\epsilon_r$ ) y deformación por compresión vertical en la superficie de la subrasante ( $\epsilon_z$ ).

**Figura 1.** Modelo estructural de referencia 1 Fuente: Elaboración propia



**Figura 2.** Modelo estructural de referencia 2



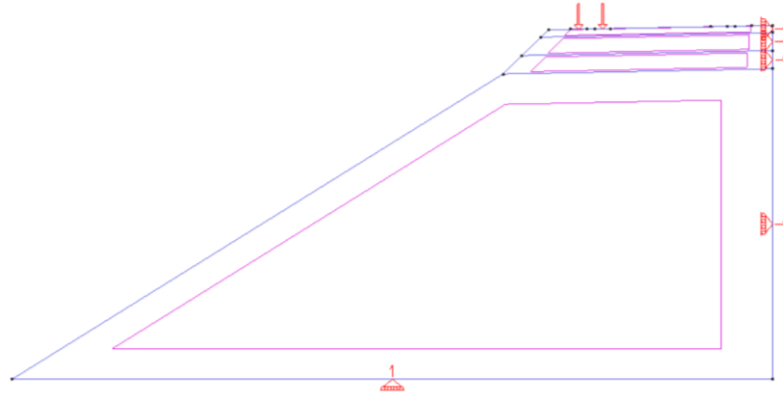
### **2.3. Determinación del programa de modelamiento**

Buscando generar resultados más acordes con la realidad se implementa el programa CB-GiD® que funciona bajo la metodología de elementos finitos, por lo cual se realizó una validación de estos resultados antes de continuar con el análisis de sensibilidad. Como validador se utiliza el programa Pitra Pave® que utiliza una metodología multicapa elástica y es usado en el diseño de estructuras de pavimento. La comprobación de los resultados fue realizada en términos de deflexión total.

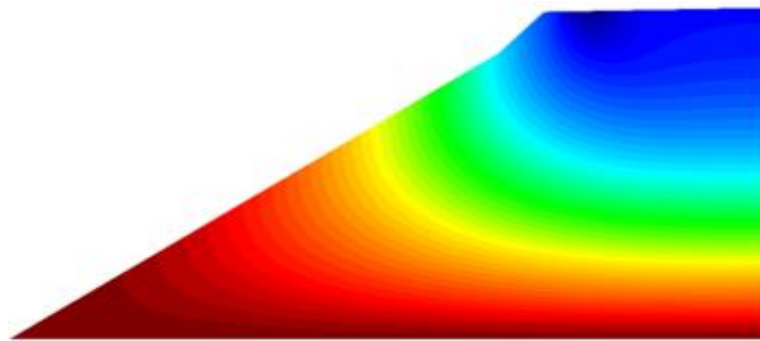
En primera instancia, se definieron las geometrías de los modelos. En el caso de Pitra Pave® se maneja una interfaz de una estructura de pavimento flexible como la que se observa en Figura 1. En cambio, como el programa CB-GiD® permite dibujar la geometría se utilizó el modelo de la estructura de pavimento en forma de terraplén, como se observa en Figura 2. Los parámetros de diseño y el nivel de variación definidos en el numeral 2.2 fueron establecidos en igualdad de condiciones para los dos programas, con el objetivo de obtener resultados comparables.

En la Figura 3, se observa la geometría y condiciones de frontera del pavimento flexible en el programa GiD®, donde se observan las capas estructurales del pavimento con espesores finitos, los puntos en los cuales fue aplicada la carga de las llantas y las de condiciones frontera que se establecieron en el modelo a partir de la implementación de restricciones laterales que impiden los desplazamientos, asemejándolo a las condiciones que sufriría la estructura en la realidad. En la Figura 4 se aprecia una variación en la escala de colores en relación con los desplazamientos en toda la estructura con respecto a la profundidad.

**Figura 3.** Preprocesamiento estructura de pavimento en terraplén, programa CB-GiD®.



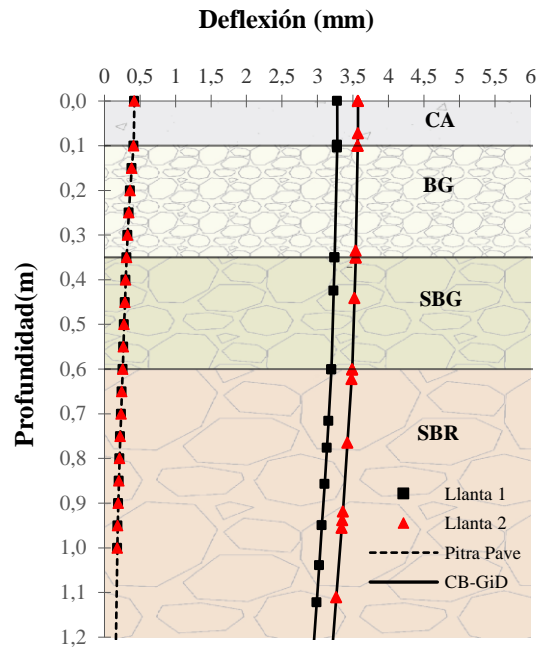
**Figura 4.** Posprocesamiento estructura de pavimento en terraplén, programa CB-GiD®.



En la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos para las deflexiones de la estructura de pavimento en los dos programas, utilizando como parámetros los módulos ( $E_{CA}=3250$  MPa,  $E_{BG}=250$  MPa,  $E_{SBG}=200$  MPa) y espesores de capa ( $h_{CA}=0,10$  m,  $h_{BG}=0,25$  m,  $h_{SBG}=0,25$  m).

En la Tabla 4, se pueden ver las diferencias porcentuales en términos de desplazamiento para las llantas 1 y 2 de los dos modelos de estudio en cada programa.

**Figura 5.** Comparación de la deflexión en función de la profundidad entre los softwares *Pitra Pave*® y *CB-GiD*®.



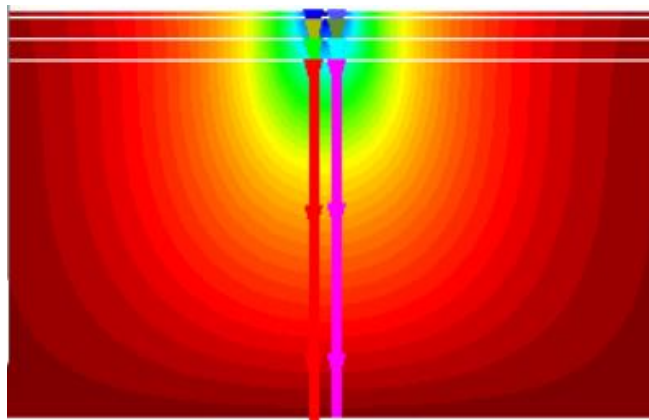
**Tabla 4.** Diferencia entre los resultados de deflexión entre los programas.

Impronta	Pitra Pave®	CB-GiD®	Diferencia (%)
Llanta 1	0,421	3,277	87%
Llanta 2	0,421	3,569	88%

Debido a las diferencias porcentuales que se presentaron en la modelación de estructuras de pavimento bajo esas condiciones geométricas, se optó por representar el modelo 1 en *CB-GiD*®,

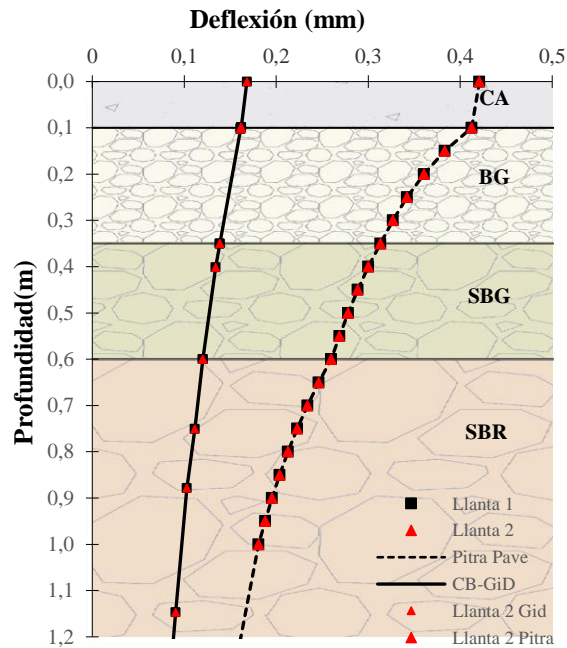
donde se usaron los mismos parámetros de la comparación anterior, pero con un medio horizontal, sin inclinación, donde el carril tendría extensión horizontal infinita y la capa SBR espesor infinito. El modelo se observa en la Figura 6.

**Figura 6.** *Modelación de la estructura de pavimento con geometría rectangular en el programa CB-GiD®.*



En la Figura 7 y Tabla 5 se evidencia la diferencia porcentual entre las deflexiones totales encontradas en los modelos simulados por cada programa. Aunque se definieron los mismos parámetros y se intentó generar la misma geometría que utiliza Pitra Pave® en CB-GiD®, no se obtuvo los resultados esperados.

**Figura 7.** Comparación de la deflexión en función de la profundidad entre los softwares *Pitra Pave*® y *CB-GiD*®.



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 5.** Diferencia entre los resultados de deflexión entre los programas.

Impronta	Pitra Pave®	CB-GiD®	Diferencia (%)
Llanta 1	0,421	0,168	60%
Llanta 2	0,421	0,168	60%

Teniendo en cuenta la magnitud en la diferencia de resultados entre los programas, se decidió implementar para el análisis de sensibilidad el programa Pitra Pave®, ya que es un software que presenta funcionalidad, eficiencia y compatibilidad.

### 3. Resultados

La variación de espesores y módulos de elasticidad generaron 108 estructuras de pavimento simuladas mediante el software Pitra Pave®, como se definió anteriormente. Debido a la cantidad y complejidad de visualización de la información recolectada, se seleccionó la estructura con los mayores parámetros de diseño para el análisis tipo. El modelo estructural de referencia del pavimento flexible se encuentra definido en la Figura 1 y está conformado por  $E_{CA}=3250$  MPa,  $E_{BG}=250$  MPa,  $E_{SBG}=200$  MPa,  $E_{SBR}=80$  MPa y la geometría de la C1 con un  $h_{total}=0,6$  m. Sin embargo, la información completa con el resto de las simulaciones fue organizada en una base de datos para futuras investigaciones y se encuentra cargada en el siguiente enlace: <https://drive.google.com/drive/folders/1R-ja-P0ZexQMhZpiOLV2bQZWMS3w-anL>

La base de datos contiene como se puede apreciar en el Anexo 1 un panel principal en el cual se pueden buscar los resultados de las estructuras de pavimento simuladas que surgieron de las combinaciones establecidas para los parámetros y las gráficas de deflexión ( $\Delta_z$ ), deformación por tracción actuante en el fondo del CA ( $\epsilon_r$ ) y deformación vertical de compresión actuante sobre la parte superior de la SBR ( $\epsilon_z$ ) de cada una.

Para visualizar la información de las variables se organizó en forma de tablas y graficas que contienen las comparaciones entre espesores y módulos con respecto a cada parámetro de respuesta del pavimento flexible. De esta forma se analiza la tendencia de las variables y la sensibilidad en cada parámetro de diseño ante la variación, lo cual permitió sacar conclusiones como la definición del grado de sensibilidad y nivel de importancia.

### **3.1. Comportamiento de la deflexión y deformación ante la variación del módulo de elasticidad de las capas del pavimento**

#### **3.1.1 Variación en el módulo de la base granular y del concreto asfáltico**

Los parámetros que se consideran constantes para el presente estudio están establecidos en la Tabla 3. Además de estos, permanecieron sin variación:

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

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

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

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

El  $E_{BG}$  varió de 250 MPa a 150 MPa y  $E_{CA}$  varió de 3250 MPa a 1500 MPa. La deflexión y deformación obtenida bajo de la impronta de la llanta se puede observar en la Tabla 6 y en las Figuras 7, 8 y 9. Cada figura presenta tres líneas de tendencias que permiten visibilizar la variación en términos de  $E_{BG}$  y  $E_{CA}$ .

El grado de variación de cada variable  $E_{BG}$  y  $E_{CA}$  se encuentra establecido en la Tabla 7 y Tabla 8. Para medir este nivel de variación se tomó como punto de control los datos correspondientes a la estructura de referencia.

**Tabla 6.** Resultados deflexiones y deformación para los modelos estructurales variando los módulos de elasticidad de BG y CA.

<b>E<sub>CA</sub></b> <b>(MPa)</b>	<b>E<sub>BG</sub></b> <b>(MPa)</b>	<b>Δz</b> <b>(mm)</b>	<b>ε<sub>r</sub></b>	<b>ε<sub>z</sub></b>
<b>3250*</b>	250*	0,421	2,28E-04	1,85E-04
	200	0,446	2,54E-04	1,92E-04
	150	0,482	2,87E-04	2,00E-04
<b>2500</b>	250*	0,438	2,54E-04	1,91E-04
	200	0,466	2,86E-04	1,99E-04
	150	0,505	3,28E-04	2,07E-04
<b>1500</b>	250*	0,476	3,03E-04	2,01E-04
	200	0,507	3,50E-04	2,09E-04
	150	0,554	4,14E-04	2,19E-04

\*Valores modelo de referencia

**Tabla 7.** Grado de sensibilidad ante la variación de E<sub>BG</sub> en términos de deflexión y deformación.

<b>E<sub>CA</sub></b>	<b>E<sub>BG</sub></b>	<b>Δz</b> <b>(mm)</b>	<b>ε<sub>r</sub></b>	<b>ε<sub>z</sub></b>
<b>3250*</b>	250*	0%	0%	0%
	200	5,94%	11,40%	3,78%

**Continuación Tabla 7.**

	<b>150</b>	<b>14,49%</b>	<b>25,88%</b>	<b>8,11%</b>
<b>2500</b>	250*	0%	0%	0%
	200	6,39%	12,60%	4,19%
	150	15,30%	29,13%	8,38%
	250*	0%	0%	0%
<b>1500</b>	200	6,51%	15,51%	3,98%
	150	16,39%	36,63%	8,96%

\*Valores modelo de referencia

**Tabla 8.** *Grado de sensibilidad ante la variación de  $E_{CA}$  en términos de deflexión y deformación.*

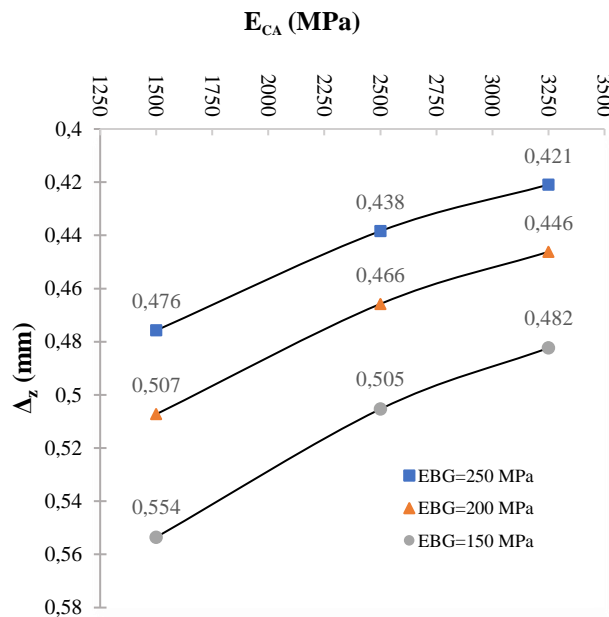
<b><math>E_{BG}</math></b>	<b><math>E_{CA}</math></b>	<b><math>\Delta_z</math></b>	<b><math>\epsilon_r</math></b>	<b><math>\epsilon_z</math></b>
<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(mm)</b>		
<b>250*</b>	3250	0%	0%	0%
	2500	4,15%	11,41%	3,01%
	1500	13,02%	32,70%	8,45%

\*Valores modelo de referencia

En la Figura 8 se observan las  $\Delta_z$  en función del  $E_{CA}$ . En la gráfica se presentan tres posibles respuestas mecánicas en diferentes estructuras de pavimento, definidas cada una por cada variación del  $E_{BG}$ , mostrando una generalidad de tendencia decreciente, esto significa que a medida que el módulo de elasticidad aumenta en las capas de CA y BG, las deflexiones totales disminuyen

significativamente. Como evidencia de ello, la estructura que presenta el menor  $E_{CA}$  y el menor  $E_{BG}$  presenta la mayor deflexión total en el comparativo con las demás estructuras.

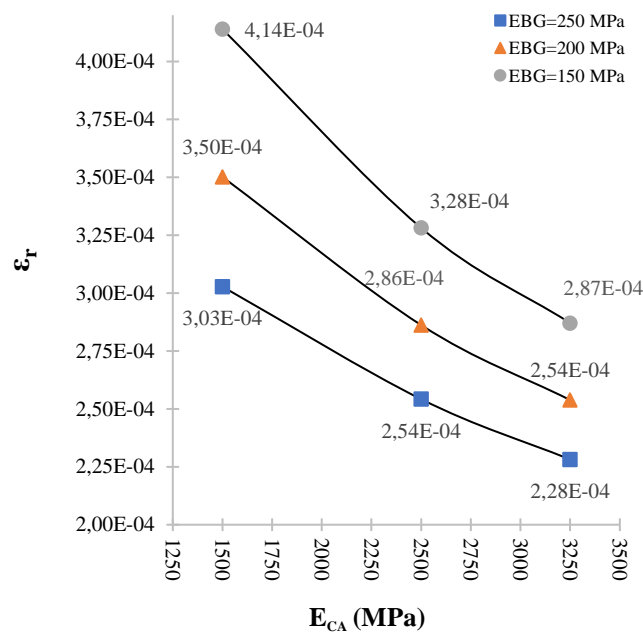
**Figura 8.** Deflexión total en función del módulo de elasticidad del CA, variando el módulo de elasticidad de la BG



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 9 se observa las  $\epsilon_r$  en función del  $E_{CA}$ , con variación en  $E_{BG}$ . Las gráficas presentan una tendencia decreciente, esto significa que a medida que el módulo de elasticidad aumenta en el CA y la BG, la deformación por tensión en el fondo del CA disminuye.

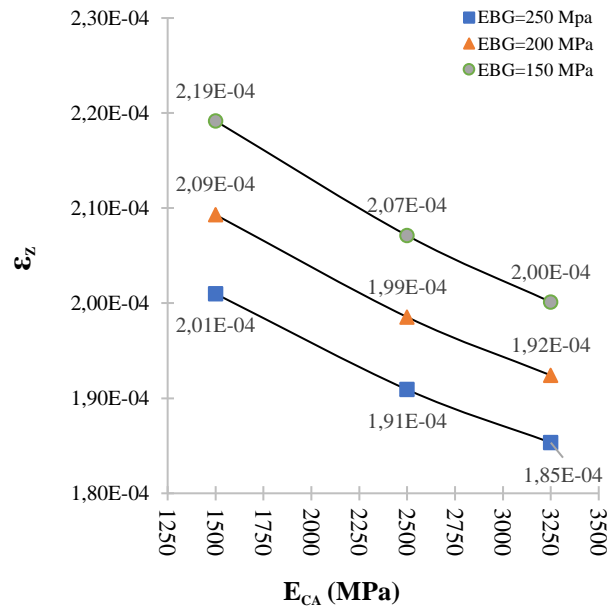
**Figura 9.** Deformación por tensión en el fondo del CA en función del módulo de elasticidad del CA, variando el módulo de elasticidad de la BG.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 10 se observa  $\epsilon_z$  en función de  $E_{CA}$ . La variación de  $E_{BG}$  conlleva a tendencia decreciente, lo que significa que a medida que el módulo de elasticidad aumenta en las capas de CA y BG, la deformación por compresión sobre la subrasante tiende a disminuir.

**Figura 10.** Deformación vertical de compresión actuante sobre la subrasante en función del módulo de elasticidad del CA, variando el módulo de elasticidad de la BG.



### 3.1.2 Variación en el módulo de elasticidad de la subbase granular y del concreto asfáltico

Los parámetros que se consideran constantes para el presente estudio están establecidos en la Tabla 3. Además de estos parámetros, permanecieron sin variación los definidos a continuación:

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

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

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

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

El  $E_{BG}$  varió de 200 MPa a 100 MPa y  $E_{CA}$  varió de 3250 MPa a 1500 MPa. La deflexión y deformación obtenida bajo la impronta de la llanta se puede observar en la Tabla 9 y el porcentaje de variación de cada estructura se presenta en la Tabla 10. La información de las tablas se encuentra representada en la Figura 11, Figura 12 y Figura 13.

**Tabla 9.** Resultados deflexiones y deformación para los modelos estructurales variando el  $E_{SBG}$  y  $E_{CA}$ .

$E_{CA}$	$E_{SBG}$	$\Delta_z$	$\epsilon_r$	$\epsilon_z$
(MPa)	(MPa)	(mm)		
<b>3250*</b>	200*	0,421	2,28E-04	1,85E-04
	150	0,439	2,32E-04	2,14E-04
	100	0,467	2,38E-04	2,63E-04
<b>2500</b>	200*	0,438	2,54E-04	1,91E-04
	150	0,457	2,58E-04	2,20E-04
	100	0,487	2,64E-04	2,72E-04
<b>1500</b>	200*	0,476	3,03E-04	2,01E-04
	150	0,496	3,06E-04	2,33E-04
	100	0,527	3,11E-04	2,88E-04

\*Valores modelo de referencia

**Tabla 10.** Grado de sensibilidad ante la variación de  $E_{SBG}$  en términos de deflexión y deformación.

$E_{CA}$	$E_{SBG}$	$\Delta_z$	$\epsilon_r$	$\epsilon_z$
(MPa)	(MPa)	(mm)		
<b>3250*</b>	200*	0%	0%	0%

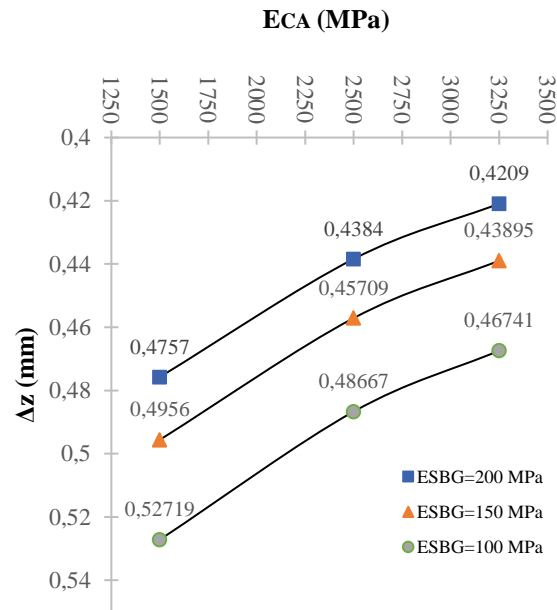
**Continuación Tabla 10.**

	<b>150</b>	<b>4,30%</b>	<b>1,75%</b>	<b>15,68%</b>
	100	11,05%	4,39%	42,16%
	200*	0%	0%	0%
<b>2500</b>	150	4,27%	1,57%	15,18%
	100	11,02%	3,94%	42,41%
	200*	0%	0%	0%
<b>1500</b>	150	4,20%	1,00%	15,90%
	100	10,80%	2,60%	43,30%

\*Valores modelo de referencia

En la Figura 11 se observa las  $\Delta_z$  en función del  $E_{CA}$ . En la Figura se presentan 3 series de datos correspondientes a la variación de  $E_{SBG}$ , las cuales presentan una tendencia decreciente debido a que al aumentar  $E_{SBG}$  y  $E_{CA}$ , disminuye la deflexión total en la estructura del pavimento.

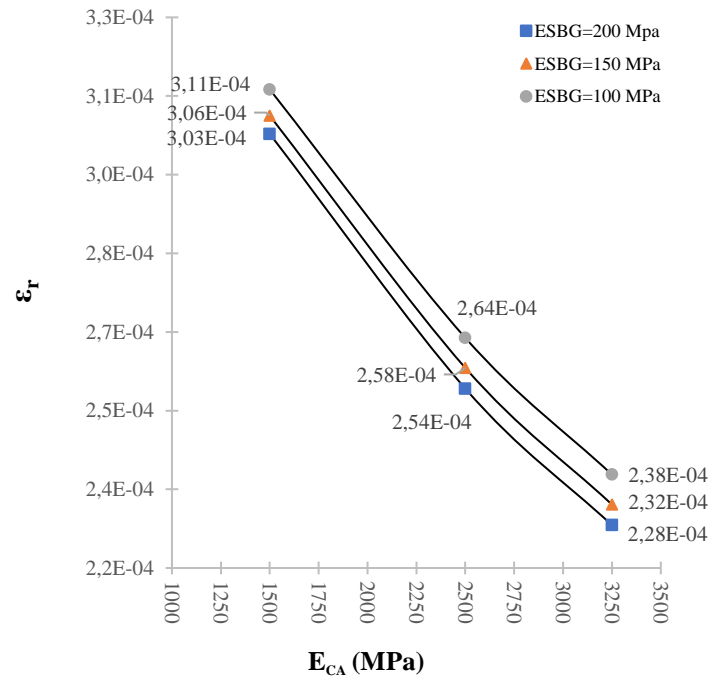
**Figura 11.** *Deflexión total en función del módulo de elasticidad del CA, variando el módulo de elasticidad SBG.*



Fuente: Elaboración propia

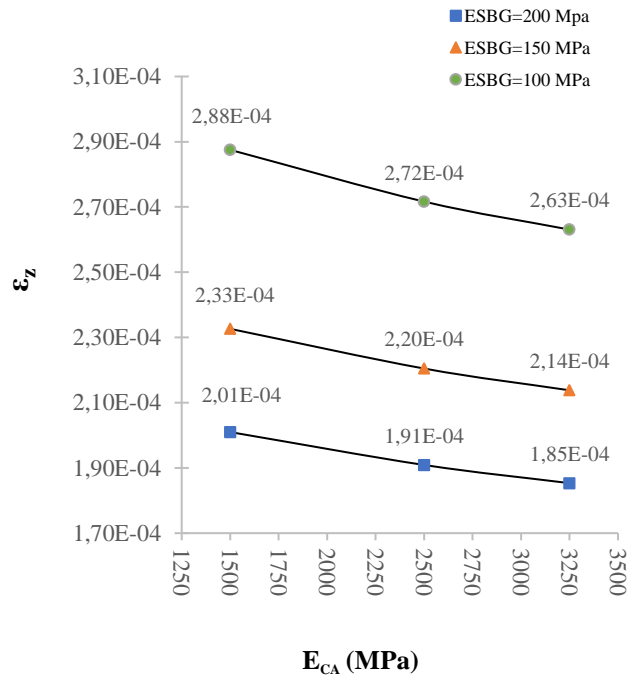
En la Figura 12 se presenta la  $\epsilon_r$  en función del ECA; en la gráfica se presenta la variación del  $E_{SBG}$ . La tendencia de cada serie de datos es decreciente; esto significa que a medida que el módulo de elasticidad aumenta en la CA y SBG, la deformación por tensión en el CA tiende a disminuir, es decir, que son inversamente proporcionales.

**Figura 12.** Deformación por tensión en el fondo del CA en función del módulo de elasticidad del CA, variando el módulo de elasticidad SBG.



En la Figura 13 se observa  $\epsilon_z$  en función de  $E_{CA}$ . La variación de  $E_{SBG}$  presenta una tendencia decreciente. Es decir, que a medida que el módulo aumenta en la CA y BG, la deformación por compresión sobre la subrasante tiende a disminuir.

**Figura 13.** Deformación vertical de compresión actuante sobre la subrasante en función del módulo de elasticidad del CA, variando el módulo de elasticidad SBG.



**3.1.3. Comportamiento de la deflexión y deformación ante la variación de los espesores del pavimento.**

En la Tabla 3, se pueden encontrar los diferentes valores de parámetros que permanecieron constantes. Sin embargo, para realizar esta evaluación fue necesario mantener otras variables como constantes y con ello lograr un estudio de mayor rigurosidad; dichas variables fueron:

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

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

El espesor total de la estructura de pavimento varió en función de las cuatro configuraciones geométricas definidas, como se observa en la Tabla 1. La deflexión y deformación obtenida debajo de la impronta de la llanta para este caso se puede observar en la Tabla 11 y el

porcentaje de variación de  $h_{total}$  se ve reflejado en la Tabla 12. La representación de los resultados se encuentra en la Figura 14, Figura 15 y Figura 16.

**Tabla 11.** Resultados de deflexiones y deformaciones para los modelos estructurales variando los espesores del pavimento y el módulo de elasticidad del CA.

$E_{CA}$ (MPa)	$h_{total}$ (m)	$\Delta_z$ (mm)	$\epsilon_r$	$\epsilon_z$
<b>3250*</b>	0,60*	0,421	2,28E-04	1,85E-04
	0,47	0,509	2,79E-04	2,79E-04
	0,35	0,613	3,03E-04	4,31E-04
	0,23	0,773	2,45E-04	7,78E-04
<b>2500</b>	0,60*	0,438	2,54E-04	1,91E-04
	0,47	0,526	3,02E-04	2,85E-04
	0,35	0,629	3,14E-04	4,40E-04
	0,23	0,786	2,23E-04	7,91E-04
<b>1500</b>	0,60*	0,476	3,03E-04	2,01E-04
	0,47	0,562	3,36E-04	2,97E-04
	0,35	0,662	3,15E-04	4,56E-04
	0,23	0,810	1,68E-04	8,16E-04

\*Valores modelo de referencia

**Tabla 12.** Grado de sensibilidad ante la variación de  $h_{total}$  en términos de deflexión y deformaciones.

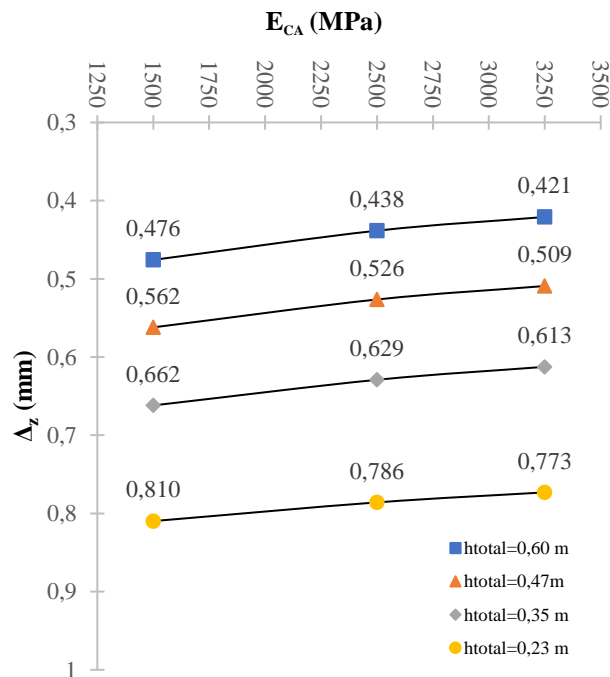
$E_{CA}$ (MPa)	$h_{total}$ (m)	$\Delta_z$ (mm)	$\epsilon_r$	$\epsilon_z$
<b>3250*</b>	0,60*	0%	0%	0%
	0,47	20,98%	22,37%	50,81%
	0,35	45,52%	32,89%	132,97%
	0,23	83,68%	7,46%	320,54%
<b>2500</b>	0,60*	0%	0%	0%
	0,47	20,07%	18,90%	49,21%
	0,35	43,50%	23,62%	130,37%
	0,23	79,27%	12,20%	314,14%
<b>1500</b>	0,60*	0%	0%	0%
	0,47	18,14%	10,89%	47,76%
	0,35	39,14%	3,96%	126,87%
	0,23	70,23%	44,55%	305,97%

\*Valores modelo de referencia

En la Figura 14 se encuentran relacionados los valores obtenidos que corresponden a  $\Delta_z$  de la estructura de pavimento ante la variación de  $E_{CA}$  y  $h_{total}$ . En la gráfica se presentan las cuatro tendencias ante la variación de los parámetros, donde se puede concluir que la disminución tanto  $E_{CA}$  y  $h_{total}$  reflejan un aumento en  $\Delta_z$ , haciendo que estos parámetros sean inversamente proporcionales. En la figura 13 también se evidencia la fuerte influencia que presenta el espesor

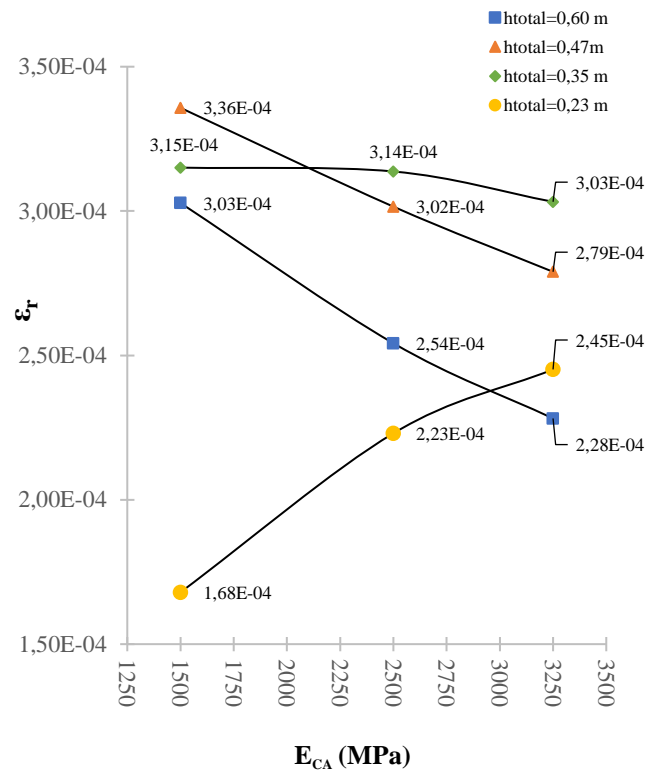
total de la estructura de pavimento por encima del módulo de elasticidad del CA, esto se ve reflejado en los valores obtenidos en  $\Delta_z$ , si se pasa del  $h_{total}=0,23$  m a un  $h_{total}=0,6$  m con cualquiera de los  $E_{CA}$  estudiados, la  $\Delta_z$  tiende a reducir en promedio un 44,36%. En cambio, sí se pasa de un  $E_{CA}=1500$  MPa a un  $E_{CA}=3500$  MPa sin importar el  $h_{total}$ , la  $\Delta_z$  tiende a disminuir en promedio un 8,24%.

**Figura 14.** Deflexión en función del módulo de elasticidad del CA, variando los espesores del pavimento.



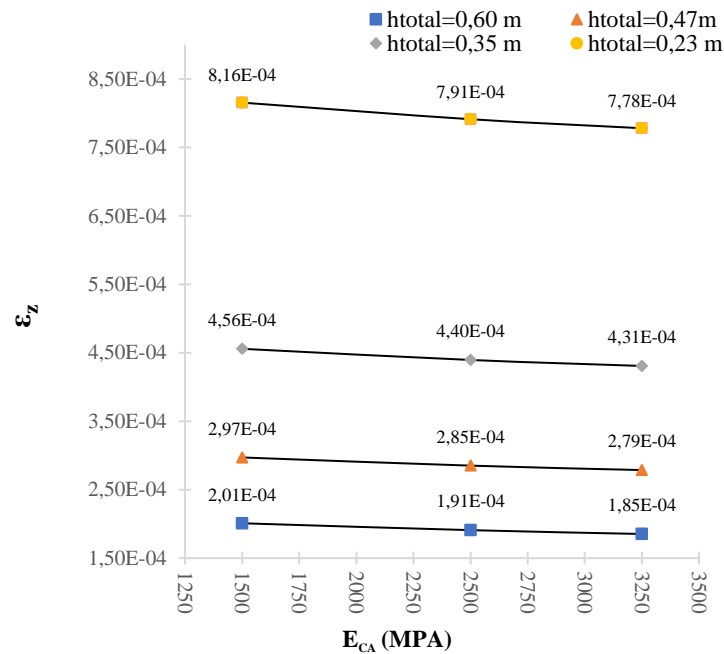
En la Figura 15 se relacionan los valores de  $\epsilon_r$  ante la variación de  $E_{CA}$  y  $h_{total}$ . Las gráficas  $h_{total}=0,60$  m,  $h_{total}=0,47$  m y  $h_{total}=0,35$  m, presentan una tendencia decreciente de  $\epsilon_r$  ante el aumento de  $E_{CA}$  y  $h_{total}$ . En cambio, la estructura  $h_{total}=0,23$  m presenta una tendencia creciente debido a que cuando el espesor del CA es inferior a 5 cm y su módulo de elasticidad disminuye, las tensiones tienden a aumentar por la falta de la capacidad de distribución de cargas.

**Figura 15.** Deformación por tensión en el fondo del CA en función del módulo de elasticidad del CA, variando los espesores del pavimento.



En la Figura 16 se presenta  $\epsilon_z$  ante la variación de  $E_{CA}$  y  $h_{total}$ . Las respuestas estructurales presentan una tendencia decreciente. Con lo que se concluye que a menor  $E_{CA}$  y  $h_{total}$  se presentará un mayor incremento de  $\epsilon_r$ , mostrando un comportamiento inversamente proporcional. Los valores obtenidos para la respuesta  $\epsilon_z$ , muestran la gran influencia que presenta el  $h_{total}$ . Al pasar del  $h_{total}=0,23$  m a un  $h_{total}=0,6$  m con cualquiera de los  $E_{CA}$  estudiados, la  $\epsilon_r$  tiende a reducir en promedio un 75,81%; en cambio si se pasa de un  $E_{CA}=1500$  MPa a un  $E_{CA}=3500$  MPa sin importar el  $h_{total}$ , la  $\epsilon_r$  tiende a disminuir en promedio un 6,04%.

**Figura 16.** Deformación vertical de compresión actuante sobre la subrasante en función del módulo de elasticidad del CA, variando los espesores del pavimento.



### 3.2. Grado de Sensibilidad De Las Variables De Los Parámetros De Diseño

Para la investigación se determinó el grado de sensibilidad de la estructura de referencia comparando el mayor porcentaje de variación en términos de  $\Delta z$ ,  $\epsilon_r$  y  $\epsilon_z$  en cada parámetro de diseño estudiado ( $E_{CA}$ ,  $E_{BG}$ ,  $E_{SBG}$  y  $h_{total}$ ). Higuera (2007) presenta una escala que fue utilizada para la clasificación de los porcentajes obtenidos. La escala de sensibilidad está representada en la

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

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

Al realizar el análisis de sensibilidad de las variables que intervienen en el diseño de la estructura de un pavimento flexible como se presentó anteriormente, se pudo evaluar su grado de sensibilidad clasificándolas y organizándolas de mayor a menor por la influencia que presentan.

En la Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16 se presentan las variables analizadas en términos de  $\Delta z$ ,  $\epsilon_r$  y  $\epsilon_z$  respectivamente. En el análisis de los tres criterios de diseño la variable más influyente fue  $h_{total}$ .

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

Variable de diseño	Máximo % Variación $\Delta z$	Grado de sensibilidad
$h_{total}$	83,68%	ALTA
$E_{BG}$	16,39%	MEDIA
$E_{CA}$	13,06%	BAJA
$E_{SBG}$	11,05%	BAJA

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

Variable de diseño	Máximo % Variación $\Delta z$	Grado de sensibilidad
$h_{total}$	44,55%	ALTA
$E_{BG}$	36,72%	ALTA
$E_{CA}$	32,70%	ALTA
$E_{SBG}$	4,39%	BAJA

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

<b>Variable de diseño</b>	<b>Máximo % Variación <math>\Delta z</math></b>	<b>Grado de sensibilidad</b>
<b><math>h_{total}</math></b>	320,54%	ALTA
<b><math>E_{SBG}</math></b>	43,28%	ALTA
<b><math>E_{BG}</math></b>	9,05%	BAJA
<b><math>E_{CA}</math></b>	8,45%	BAJA

#### **4. Conclusiones**

Con las simulaciones numéricas realizadas para evaluar la influencia del espesor y las propiedades mecánicas de las capas que componen una estructura de pavimento, se logró visualizar órdenes de magnitud de las variables utilizadas en el diseño de pavimentos. Estos análisis permitieron establecer claramente cómo estas variables afectan el comportamiento mecánico de la estructura, lo que proporciona una base sólida para la toma de decisiones en la construcción y diseño de pavimentos, especialmente en casos donde no se ha realizado un mejoramiento mecánico de los materiales granulares simples.

Además, este enfoque basado en simulaciones numéricas demuestra la importancia de la innovación tecnológica y el uso de herramientas avanzadas en la ingeniería civil para optimizar el la durabilidad y desempeño de las carreteras, contribuyendo así a la seguridad vial y la sostenibilidad de la infraestructura rural y urbana.

Los resultados de deflexión obtenidos en el programa de elementos finitos (CB-GiD®) en comparación con los que utilizan la teoría multicapa elástica (Pitra Pave®), presentan una gran diferencia en sus resultados. Esto se debe a que cada técnica de análisis tiene sus propias limitaciones y suposiciones, así como también el método constitutivo para cada modelo. Con la investigación realizada se puede concluir que algunas de las posibles razones por la que los resultados pudieron diferir parten desde un supuesto modelo 2D en elementos finitos, así como consideraciones en los bulbos de esfuerzos por parte de cada software y consideraciones particulares al definir modelos como geometría o las condiciones de frontera.

Es necesario destacar la importancia de reconocer que ningún programa puede garantizar resultados precisos, ya que existe incertidumbre en las suposiciones que maneja. Por lo tanto,

siempre se debe realizar una revisión crítica de los resultados obtenidos en cualquier programa de diseño y ajustarlos en función de la experiencia y conocimiento de los ingenieros.

Las simulaciones numéricas en el diseño y análisis de las estructuras de pavimento flexible son esenciales para garantizar la calidad, durabilidad y seguridad de las carreteras, debido a que permiten analizar y predecir el comportamiento de la estructura bajo la influencia de las diferentes variables de diseño de una manera rápida y eficiente.

Los resultados obtenidos de las 108 simulaciones permiten concluir que el espesor de las capas granulares es un factor clave que afecta la capacidad de carga, y el desempeño del pavimento. Las estructuras que tenían los espesores más bajos presentaban mayor incremento en las deformaciones y deflexiones totales. Es por esto, que si el pavimento presenta un espesor inadecuado se pueden presentar ahuellamiento en SBR, fatiga en el CA y otros problemas que reducen la vida útil del pavimento y aumentar los costos de mantenimiento y reparación.

La calidad de los materiales de la base granular como de la subbase granular afectan significativamente el comportamiento de la estructura de pavimento, como se observa en los resultados obtenidos. Las capas proporcionan el soporte y disipan las cargas de tránsito a lo largo del pavimento flexible, reduciendo el esfuerzo de tensión de la capa del asfalto y aumentando su vida útil. Sin embargo, la calidad de la base granular tiene una tendencia a generar mayor impacto en la respuesta estructural comparado con la subbase granular. Esto se debe a que es la capa más cercana a la capa de la concreto asfáltico, por lo que hace que influya en la capacidad de carga y en la estabilidad del pavimento. Los modelos estructurales que tenían los módulos más bajos en la base granular presentaban mayor incremento en la deflexión y deformaciones, ocasionando que fuera menos probable cumplir con los criterios de diseño.

El espesor del pavimento es la variable más crítica, la cual afecta la capacidad de carga, desempeño y durabilidad de una estructura de pavimento. El control adecuado del espesor durante el diseño y la construcción es fundamental para asegurar la calidad y la vida útil esperada en la infraestructura vial. Teniendo un espesor adecuado del pavimento se podría controlar la capacidad de carga que la carretera podría soportar, ya que, a mayor espesor de la carpeta asfáltica, menores deformaciones en la estructura de pavimento, y así prevenir agrietamientos prematuros y generar una inestabilidad del suelo de la subrasante.

Para la investigación se estableció un módulo de la subrasante de 80 MPa. Este valor ayudó a que las estructuras de pavimento utilizadas presentaran mayor resistencia y capacidad de carga. Debido a que un módulo de subrasante más alto mejora la resistencia estructural del pavimento ya que la vía puede soportar vehículos más pesados y un tráfico más intenso sin experimentar daños significativos, también ayuda a generar una reducción en las deformaciones y una distribución de cargas, lo que reduce el desgaste y el daño localizado.

### Referencias Bibliográficas

- (LanammeUCR), Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. (05 de 07 de 2023).  
*Software de multicapa elástica para análisis de pavimentos flexibles*. Obtenido de  
Software de multicapa elástica para análisis de pavimentos flexibles:  
[https://www.lanamme.ucr.ac.cr/index.php?option=com\\_content&view=article&id=362&Itemid=466#:~:text=PITRA%20PAVE%20es%20un%20software,y%20deflexiones%20ante%20determinadas%20cargas.&text=Esfuerzos%20normales%20en%20fibra%20inferior%20de%20capa%20asf%C3%A1lt](https://www.lanamme.ucr.ac.cr/index.php?option=com_content&view=article&id=362&Itemid=466#:~:text=PITRA%20PAVE%20es%20un%20software,y%20deflexiones%20ante%20determinadas%20cargas.&text=Esfuerzos%20normales%20en%20fibra%20inferior%20de%20capa%20asf%C3%A1lt)
- Brunschwig, G. (1989). *Materiales marginales: estado del arte (págs. 110)*. París, Francia: Asociación Internacional Permanente de Congresos de Carreteras.
- Castillo, C. P. (2017). *Solución a la teoría de multicapa elástica y software de cálculo de las respuestas del pavimento Pitra Pave*. lanamme: Universidad de Costa Rica.
- Cruz Rodríguez, J. &. (2019). *Análisis comparativo de software multicapa elástico para evaluación mecánica de pavimentos flexibles (Tesis de maestría)*. Ibagué: Universidad Cooperativa de Colombia.
- GID, s. (2023). *What's GID*. Obtenido de GID simulations.
- Higuera, C. (2005). *Esfuerzos, deformaciones y deflexiones en pavimentos flexibles y rígidos*. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Higuera, C. (2006). *Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimento para carreteras*. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Higuera, C. (2007). *Mecánica de pavimentos: principios básicos*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

- Leiva, O. &. (2022). *Modelación numérica de estructuras de pavimento con inclusión de capas de materialegranulares marginales, sobre una sección vial típica en terraplén, involucrando efectos de la succión*. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander.
- Ministerio de Transporte. (2021). *Anuario Nacional de Transporte*. Bogotá: Gobierno de Colombia.
- Orobio, A. &. -0.-1.-1. (2015). Análisis de costos de construcción asociados al diseño racional de pavimentos con diferentes modelos de fatiga. *Revista de ingeniería y construcción*, 177-188.
- Ramírez, J. F. (2012). *Algorithm for the prediction of the reactive forces developed in the socket of transfemoral amputees*. DYNA.
- Reyes Lizcano, F. A. (2003). *Diseño racionalde pavimentos*. Bogotá: Universidad Javeriana.
- Rondón Quintana, H. &. (2007). Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: tendencias, alcances y limitaciones. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* , 41-65.
- SAAL, R. &. (1960.). *Kolloid-Zeitschrift MI*.
- Universitat Politècnica de Catalunya. (2012). *CODE\_BRIGHT 2021 User'sGuide*. . Barcelona.

Apéndices

Apéndice A. Página principal de la base de datos, donde se encuentra el motor de búsqueda para las estructuras simuladas y los principales resultados.

