Evaluación de la sensibilidad de variables de diseño en el comportamiento estructural de pavimento flexible para vías terciarias a partir de simulaciones numéricas

Fernanda Del Pilar Gonzalez Guarnizo

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
Maestría en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicomecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Ingeniería Civil
Bucaramanga
2025

Dedicatoria

A Dios, por regalarme la vida y brindarme la oportunidad de alcanzar este logro.

A mi madre y padre, a mi hermana y hermano, por brindarme ese amor incondicional, estar siempre para mí, apoyarme en cada meta que me propongo y motivarme a sacar la mejor versión de mí todos los días.

A mi perrito Cosmos, mi fiel compañero que siempre está conmigo y que me acompañó durante todo este proceso con su amor puro y leal.

Agradecimientos

A Dios, por guiarme y brindarme sabiduría en cada paso de este camino.

A mi director y codirector de trabajo de grado, por su valiosa orientación y apoyo incondicional en este proyecto.

A mi familia y amigos, por apoyarme y motivarme en cada etapa de mi vida.

A todos los docentes que contribuyeron a mi formación como Ingeniera Civil.

Tabla de contenido

Pág.

Introducción 12

1. Objetivos 14

1.1. Objetivo General 14

1.2. Objetivos específicos 14

2. Metodología 15

2.1. Parámetros de respuesta estructural 16

2.1.1. Deflexión superficial 16

2.1.2. Deformación horizontal por tensión 17

2.1.3. Deformación vertical por compresión 17

2.2. Metodología de elementos finitos 17

2.3. Variables de diseño 18

2.3.1. Espesores de capa 19

2.3.2. Módulo de elasticidad 19

2.3.3. Ángulo de inclinación del talud 19

2.4. Modelo estructural de referencia 20

2.5. Modelado Numérico y Simulación Computacional con GiD® y Code_Bright® 21

2.5.1. Definición de la geometría del modelo 21

2.5.2. Asignación de propiedades del material 22

2.5.3. Definición de condiciones de carga y contorno 22

2.5.4. Generación del mallado 22

2.5.5. Postproceso 22

2.5.6. Análisis de resultados 23

3. Resultados 24

3.1. Comportamiento de los parámetros de diseño estructural ante la variación del módulo de elasticidad y espesores de las capas estructurales de pavimento 25

3.1.1. Influencia del módulo de elasticidad y espesores de capa del concreto asfáltico sobre los parámetros de diseño estructural 25

3.1.2. Influencia del módulo de elasticidad y espesores de capa de la base granular sobre los parámetros de diseño estructural 29

3.1.3. Influencia del módulo de elasticidad y espesores de capa de la subbase granular sobre los parámetros de diseño estructural 33

3.2. Comportamiento de los parámetros de diseño estructural ante la variación del ángulo de inclinación y espesores de las capas estructurales de pavimento 37

3.2.1. Influencia del ángulo de inclinación y espesores de capa del concreto asfáltico sobre los parámetros de diseño estructural 37

3.3. Comportamiento de los parámetros de diseño estructural ante la variación del módulo de elasticidad de la subrasante 41

3.3.1. Influencia del módulo de elasticidad de la subrasante y concreto asfaltico sobre los parámetros de diseño estructural 41

3.4. Grado de sensibilidad de las variables de los parámetros de diseño estructural 46

4. Conclusiones 48

Referencias Bibliográficas 52

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1. Deformaciones y deflexiones admisibles para los modelos estructurales. 16

Tabla 2. Parámetros constantes en el modelo estructural de pavimento. 20

Tabla 3. 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 y espesores de capa de CA. 26

Tabla 4. Variación porcentual de la variación de h_{CA} para la deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR. 26

Tabla 5. Porcentaje de variación respecto a la deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR cambiando el E_{CA}. 27

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 y espesores de capa de BG. 30

Tabla 7. Variación porcentual de la variación de h_{BG} para la deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR. 30

Tabla 8. Porcentaje de variación respecto a la deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR cambiando el E_{BG}. 31

Tabla 9. 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 y espesores de capa de SBG. 34

Tabla 10. Variación porcentual de la variación de h_{SBG} para la deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR. 34

Tabla 11. 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 E_{SBG}..... 35

Tabla 12. 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 ángulo de inclinación y espesores de capa de CA. 38

Tabla 13. Variación porcentual de la variación de h_{CA} para la deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR. 38

Tabla 14. 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 θ. 39

Tabla 15. 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 SR y CA. 42

Tabla 16. Variación porcentual de la variación de E_{CA} para la deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR. 42

Tabla 17. 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 E_{SR}. 43

Tabla 18. Escala para definir grado de sensibilidad. 46

Tabla 19. Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de Δz. 47

Tabla 20. Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de εr. 47

Tabla 21. Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de εz. 47

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1. Modelo estructural de referencia. 21

Figura 2. Deflexión superficial en función del módulo de elasticidad de CA variando el espesor de capa de CA. 27

Figura 3. Deformación horizontal en el fondo de CA en función del módulo de elasticidad de CA variando el espesor de capa de CA. 28

Figura 4. Deformación vertical de en la superficie de la SR en función del módulo de elasticidad de CA variando el espesor de capa de CA. 29

Figura 5. Deflexión superficial en función del módulo de elasticidad de BG variando el espesor de capa de BG. 31

Figura 6. Deformación horizontal en el fondo de CA en función del módulo de elasticidad de BG variando el espesor de capa de BG. 32

Figura 7. Deformación vertical de en la superficie de la SR en función del módulo de elasticidad de BG variando el espesor de capa de BG. 33

Figura 8. Deflexión superficial en función del módulo de elasticidad de SBG variando el espesor de capa de SBG. 35

Figura 9. Deformación horizontal en el fondo de CA en función del módulo de elasticidad de SBG variando el espesor de capa de SBG. 36

Figura 10. Deformación vertical de en la superficie de la SR en función del módulo de elasticidad de SBG variando el espesor de capa de SBG. 37

Figura 11. Deflexión superficial en función del ángulo de inclinación variando el espesor de capa de CA. 39

Figura 12. Deformación horizontal en el fondo de CA en función del ángulo de inclinación variando el espesor de capa de CA. 40

Figura 13. Deformación vertical en la superficie de la SR en función del ángulo de inclinación variando el espesor de capa de CA. 41

Figura 14. Deflexión superficial en función del módulo de elasticidad de SR variando el módulo de elasticidad de CA. 43

Figura 15. Deformación horizontal en el fondo de CA en función del módulo de elasticidad de SR variando el módulo de elasticidad de CA. 44

Figura 16. Deformación vertical de en la superficie de la SR en función del módulo de elasticidad de SR variando el módulo de elasticidad de CA..... 45

Resumen

Título: Evaluación de la sensibilidad de variables de diseño en el comportamiento estructural de pavimento flexible para vías terciarias a partir de simulaciones numéricas*

Autor: Fernanda Del Pilar Gonzalez Guarnizo **

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

Descripción:

Este proyecto tiene como finalidad evaluar el nivel de sensibilidad de ciertas variables de diseño y modelación que influyen en el comportamiento mecánico de las estructuras de pavimento flexible. Para determinar el grado de sensibilidad, se evaluó la respuesta mecánica a partir de tres parámetros de diseño estructural: la deflexión superficial, la deformación horizontal en el fondo del concreto asfáltico y la deformación vertical en la parte superior de la subrasante. Se simularon 36 estructuras de pavimento, obtenidas a partir de la caracterización de tres variables de diseño de las capas estructurales, como son los espesores, los módulos de elasticidad, y los ángulos de inclinación caracterizando estructuras viales típicas en Colombia. Adicionalmente, se incluyeron análisis tomados de una base de datos de proyectos anteriores, con el fin de que dichas estructuras también fueran consideradas en la evaluación. Las simulaciones se ejecutaron empleando el programa Code_Bright® y el pre/post procesador GiD® que aplica el método de elementos finitos para resolver el modelo constitutivo y obtener la respuesta mecánica de las estructuras de pavimento. La evaluación del nivel de sensibilidad permitió evidenciar la importancia de las variables de diseño analizadas. Sin embargo, para asegurar un desempeño óptimo del pavimento, resulta fundamental lograr una combinación adecuada entre el módulo de elasticidad, ángulo de inclinación y el espesor de las capas estructurales.

---

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes. Ingeniero Civil, MSc, PhD. Codirector: Brayan Andrés Velásquez Bueno. Ingeniero Civil, MSc.

Abstract

Title: Evaluation of the sensitivity of design variables in the structural behavior of flexible pavement for tertiary roads from numerical simulations*

Author(s): Fernanda Del Pilar Gonzalez Guarnizo **

Keywords: Flexible pavement, numerical simulation, structural design parameters, design variables.

Description:

The purpose of this project is to evaluate the level of sensitivity of certain design and modeling variables that influence the mechanical behavior of flexible pavement structures. To determine the degree of sensitivity, the mechanical response was evaluated from three structural design parameters: surface deflection, horizontal deformation at the bottom of the asphalt concrete and vertical deformation at the top of the subgrade. Thirty-six pavement structures were simulated, obtained from the characterization of three design variables of the structural layers, such as thickness, modulus of elasticity, and slope angles, characterizing typical road structures in Colombia. Additionally, analyses taken from a database of previous projects were included, so that these structures were also considered in the evaluation. The simulations were performed using the Code_Bright® program and the GiD® pre/post processor, which applies the finite element method to solve the constitutive model and obtain the mechanical response of the pavement structures. The evaluation of the sensitivity level showed the importance of the analyzed design variables. However, to ensure optimum performance of the pavement, it is essential to achieve an adequate combination between the modulus of elasticity, angle of inclination and thickness of the structural layers.

---

* Degree Work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes. Civil Engineer, MSc, PhD. Co-director: Brayan Andrés Velásquez Bueno. Civil Engineer, MSc.

Introducción

Según los datos suministrados por el Consejo Nacional de Política Económica y Social - CONPES 3857 (2016), en Colombia, las carreteras terciarias constituyen cerca del 70% de la red vial del país, de las cuales cerca del 94% no están pavimentadas y están se encuentran en malas condiciones. Lamentablemente, la infraestructura de estas carreteras muestra varias carencias, dado que son de difícil acceso y se encuentran en zonas remotas. Esto implica elevados costos de construcción, ya que la falta de información sistematizada e inventarios viales de la red terciaria dificultan la priorización de recursos para la intervención de la red, los cuales deben cumplir con las especificaciones técnicas establecidas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) (Chamie Carrillo, 2021).

La caracterización del suelo es fundamental, ya que la resistencia del terreno influye en el diseño del pavimento para garantizar que pueda soportar las cargas generadas por el tráfico. Además, a diferencia de otro tipo de vías, es común no contar con datos de proyectos cercanos que brinden información adicional para entender mejor el tramo en estudio (Murillo, 2017).

En la actualidad, se ha implementado una metodología innovadora para el estudio y análisis de pavimentos, la cual utiliza programas de elementos finitos. Estos programas permiten la determinación de esfuerzos y deformaciones, a través de ecuaciones constitutivas donde supone que el material es continuo, es decir, no consideran el comportamiento individual de los componentes del material, sino su comportamiento global a nivel macromecánico (Rondón & Reyes, 2007). En pavimentos, dentro de los beneficios del uso de programas de elementos finitos radica 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, además estos programas son capaces de modelar diferentes geometrías, condiciones de frontera y criterios de falla (Acosta Urrea, 2005).

Es importante tener en cuenta que, para realizar esta implementación de manera efectiva, es esencial disponer de herramientas que faciliten la definición, simulación y análisis completo del problema. La interfaz gráfica de usuario interactiva GiD®, creada por el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), se emplea para la definición, preparación y representación de todos los datos vinculados a simulaciones numéricas. Esta información abarca la descripción de la geometría, los materiales, las condiciones, los datos de la solución y otros parámetros. El programa también tiene la capacidad de crear la malla de elementos finitos y escribir la información para un programa de simulación numérica en su formato adecuado para Code_Bright® (Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya [UPC], 2025). Code_Bright®, desarrollado en el Departamento de Ingeniería Geotécnica y Geociencias de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), es un programa de elementos finitos, que tiene la capacidad de efectuar análisis termo-hidro-mecánicos en medios geológicos. Trabaja con GiD®, empleándolo como plataforma de pre y post procesamiento para modelar la solución a problemas de este tipo (Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, UPC, s.f.).

Con este estudio se pretende caracterizar tres variables de diseño, tales como espesores de capa, módulos de elasticidad y ángulos de inclinación de las capas, con el fin de poder determinar el nivel de influencia de cada variable de diseño reflejado en el nivel de sensibilidad a través de la modelación numérica con los programas Code_Bright® y GiD®.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Evaluar la sensibilidad de variables de diseño (Módulo de elasticidad y espesores de capa) sobre los criterios de análisis de estructuras de pavimento flexible para vías terciarias a partir de simulaciones numéricas tridimensionales con el método de elementos finitos.

1.2. Objetivos específicos

Determinar la influencia de los espesores de capas estructurales respecto a los parámetros de análisis estructural en pavimentos flexibles para vías terciarias.

Evaluar el comportamiento mecánico de estructuras de pavimento flexible ante la variación del ángulo de inclinación en una sección típica en terraplén para las capas que conforman la estructura.

Determinar el nivel de sensibilidad de los parámetros de análisis estructural ante la variación de la rigidez en la capa subrasante.

2. Metodología

Esta investigación se enfocó en evaluar las variables de diseño de pavimentos flexibles en respuesta a las cargas de los vehículos y las características de los materiales utilizados. En un principio, se llevó a cabo una revisión bibliográfica con el objetivo de poner en contexto los fundamentos del diseño estructural de este tipo de pavimentos y la implementación de la metodología de elementos finitos a través de herramientas computacionales. A continuación, se establecieron y estructuraron las variables de diseño, que incluyen las propiedades geométricas y mecánicas de las capas estructurales, además de los puntos críticos en donde se van a evaluar las respuestas del modelo, ubicados en el centro de aplicación de la carga, correspondiente al centro de la llanta. Posteriormente, se crearon modelos tridimensiones a través de simulaciones utilizando el método de elementos finitos, empleando los programas GiD® y Code_Bright®. Se procesaron y validaron los resultados obtenidos. Finalmente, se evaluó el impacto de diversas variables de diseño, tales como el espesor, el módulo de elasticidad y los ángulos de inclinación de las capas sobre los parámetros de respuesta estructural.

Adicionalmente, se realizó una comparación para verificar que los resultados obtenidos cumplieran con los valores admisibles de deflexión total (Δz_{adm}), deformación a tracción en la base del concreto asfáltico (ε_{radm}) y deformación por compresión en la superficie de la subrasante (ε_{zadm}). Estos valores fueron determinados mediante diversas ecuaciones desarrolladas por instituciones de investigación, las cuales se encuentran descritas en la Tabla 1. Para un tránsito proyectado de 100 000 ejes equivalentes de 8,2 t durante el periodo de diseño, se aplicaron tres criterios fundamentales aceptados en Colombia. En primer lugar, la deflexión superficial admisible se estimó mediante la ecuación empírica del Instituto del Asfalto, obteniéndose un valor de

referencia. En segundo lugar, la deformación horizontal admisible en la base del concreto asfáltico se evaluó con base en la Ley de Fatiga de Nottingham, estableciéndose un límite que permite prevenir el agrietamiento por fatiga. Por último, la deformación vertical admisible en la superficie de la subrasante se determinó aplicando el criterio Shell con un nivel de confiabilidad del 85 %, lo que permitió establecer un valor orientado a controlar las deformaciones permanentes en suelos de baja capacidad. La verificación del cumplimiento de estos criterios técnicos respalda la validez del diseño estructural propuesto para pavimentos flexibles.

Tabla 1

Deformaciones y deflexiones admisibles para los modelos estructurales.

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

Nota. Los valores de deformaciones y deflexiones admisibles para los modelos estructurales fueron tomados de ecuaciones desarrolladas en instituciones de investigación.

2.1. Parámetros de respuesta estructural

A continuación, se muestran las respuestas obtenidas a partir de la aplicación de cargas, las cuales se han identificado como parámetros de respuesta estructural.

2.1.1. Deflexión superficial

La deflexión se puede definir como la respuesta elástica de la estructura del pavimento ante la aplicación de una carga generalmente producida por el tránsito. Se manifiesta por la formación

de un cuenco de deflexión donde la deflexión máxima se presenta en el punto de aplicación de la carga y va disminuyendo a medida que se aleja del punto de aplicación (Higuera - Sandoval, 2023).

2.1.2. Deformación horizontal por tensión

Este tipo de deformación se refiere a la elongación que ocurre en dirección horizontal en el fondo de la capa asfáltica al ser sometida a cargas repetidas. Esta deformación tiene una estrecha relación con el fenómeno del agrietamiento por fatiga, dado que un alto número de repeticiones de carga puede sobrepasar la resistencia del material, causando así su deterioro estructural (Guzmán Suárez, 2023).

2.1.3. Deformación vertical por compresión

La deformación vertical se puede definir como la cantidad de desplazamiento vertical que experimenta la parte superior de la subrasante, como resultado de la aplicación de cargas repetidas del tránsito vehicular. Este parámetro se utiliza como criterio de falla estructural en el diseño de pavimentos flexibles, ya que deformaciones excesivas pueden conducir a fallas como el ahuellamiento (Sánchez et al.,2020).

2.2. Metodología de elementos finitos

Desarrollar un modelo a través de algún método numérico en geotecnia demanda una serie de pasos previos a tomar. Primero, es necesario tratar el problema de manera simplificada, considerándolo tanto desde la perspectiva de los procesos como desde la perspectiva geométrica y temporal (GICO UPC, 2007).

La resolución del problema con el Método de Elementos Finitos se logra, como ya se indicó, dividiendo el problema en partes más pequeñas llamadas elementos. El problema simplificado está dividido en la geometría a resolver y, finalmente, en problemas menos complejos y más simples de modo que pueda ser fácilmente ejecutado por una computadora. Dado que el

número de elementos utilizados para resolver el problema es finito, las pequeñas partes son llamadas elementos finitos. Los elementos finitos están unidos entre sí por puntos, que se llaman nodos o puntos nodales. Al grupo de todos estos elementos y nodos se le nombra malla. La exactitud del método de los Elementos Finitos depende de la cantidad de nodos y elementos y de tamaño que tengan. Por lo tanto, cuando menor es el tamaño y mayor en número los elementos en una malla, más correctos son resultados del análisis (Gómez Rodríguez, 2017).

No obstante, para que el modelo represente adecuadamente el comportamiento del material, es necesario definir un modelo constitutivo, el cual describe la relación entre esfuerzos y deformaciones en función de las propiedades del material. En este caso, se adoptó el modelo constitutivo elástico lineal, que asume una relación proporcional entre las tensiones y las deformaciones dentro del régimen elástico del material, considerando además que este es homogéneo, isotrópico y se encuentra sometido a pequeñas deformaciones. Este modelo puede expresarse en términos de las constantes elásticas del material, como el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (ν), y se utiliza ampliamente en el análisis de estructuras bajo cargas estáticas en programas de simulación numérica (Garzón & Linero, 2010).

Para llevar a cabo esta modelación, se utilizarán las herramientas GiD® y Code_Bright®. GiD® se empleará como entorno de preprocesamiento y postprocesamiento, permitiendo la definición de la geometría, los materiales, las condiciones de frontera y la visualización de resultados. Se decide denominar GiD® a la combinación de los dos programas.

2.3. Variables de diseño

Para realizar el análisis de sensibilidad, se establecieron variables de diseño para la ejecución de las simulaciones. Cada estructura de pavimento se compone respectivamente de cuatro capas: Concreto asfáltico (CA), base granular (BG), subbase granular (SBG) y subrasante

(SR). Las variables de diseño que presentaron cambios en el diseño estructural de pavimento fueron los espesores de las capas CA (h_{CA}), BG (h_{BG}), SBG (h_{SBG}) y SR (h_{SR}), el módulo de elasticidad de las capas CA (E_{CA}), BG (E_{BG}), SBG (E_{SBG}) y SR (E_{SR}) y el ángulo de inclinación de las capas CA (θ_{CA}), BG (θ_{BG}), SBG (θ_{SBG}) y SR (θ_{SR}).

2.3.1. Espesores de capa

Con base en los espesores de las capas que conforman la estructura del pavimento, se definieron rangos de variación para cada capa, expresados en metros (m). El espesor de la subrasante fue variado considerando una altura máxima de 4,9 m. Los valores representativos utilizados se detallan a continuación:

h_{CA}= [0.05, 0.07, 0.10]

h_{BG}= [0.15, 0.20, 0.25]

h_{SBG}= [0.15, 0.20, 0.25]

2.3.2. Módulo de elasticidad

De igual manera, se establecieron valores representativos para los módulos de elasticidad de cada una de las capas, expresados en MPa, según se indica a continuación:

E_{CA}= [3250, 2500, 1500]

E_{BG}= [250, 200, 150]

E_{SBG}= [200, 150, 100]

E_{BR}= [80, 50, 30]

2.3.3. Ángulo de inclinación del talud

Se consideraron variaciones en los ángulos de inclinación estructurales. El modelo contempla un terraplén con una inclinación de 33° en la capa no estructural de la subrasante,

mientras que las capas de carpeta asfáltica, base granular y subbase granular se analizaron con inclinaciones de 45°, 37° y 27°, respectivamente.

No obstante, algunos valores, como la relación de Poisson (ϑ), la carga del neumático (P), la presión de contacto entre el neumático y el pavimento (σ), 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 2.

Tabla 2

Parámetros constantes en el modelo estructural de pavimento.

Parámetro	***Valor***
v_{CA}	*0,30*
v_{BG}	*0,35*
v_{SBG}	*0,35*
v_{SR}	*0,36*
r(m)	*0,108*
y(m)	*0,324*
P(KN)	*20,50*
σ(KPa)	*562*

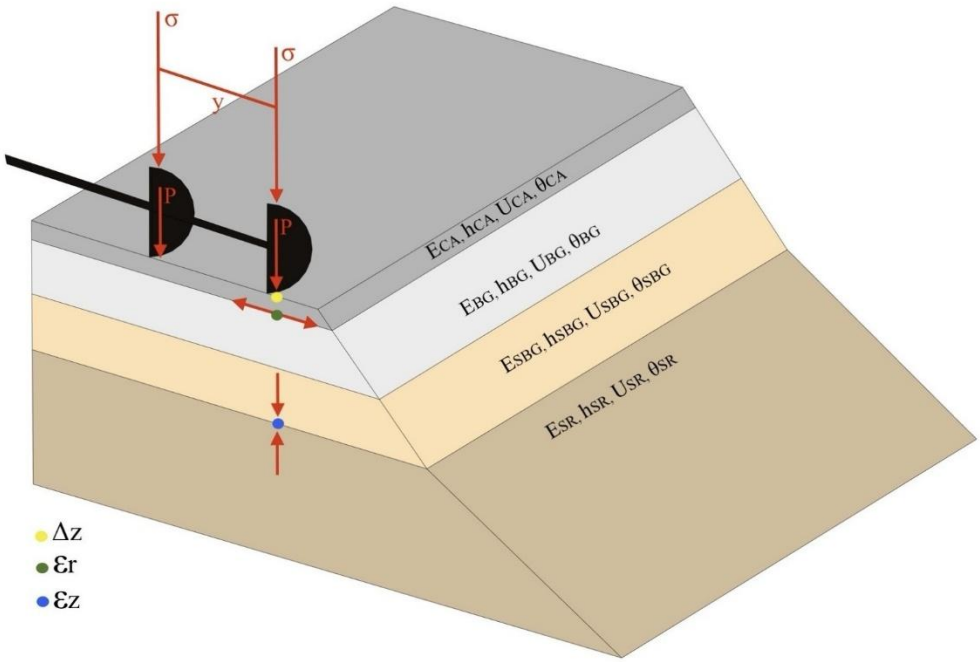
2.4. Modelo estructural de referencia

Para el estudio se empleó una sección representativa para la idealización de estructuras de pavimentos flexibles, denominada "modelo 1", ilustrada en la Figura 1. Esta configuración geométrica, tomada de una investigación previa, representa un carril del pavimento con un 2% de inclinación en las capas, simulando el efecto de bombeo. Asimismo, el modelo contempla un terraplén con una inclinación de 33° en la subrasante y de 45° en las capas de carpeta asfáltica, base granular y subbase granular. También se integran dos llantas correspondientes a un eje sencillo con ruedas dobles, utilizados para el análisis y para definir los puntos de evaluación, donde se determinan los parámetros de respuesta estructural: la deflexión superficial (Δz), la deformación

horizontal por tracción en la parte inferior del concreto asfáltico (εr) y la deformación vertical por compresión en la parte superior de la subrasante (εz).

Figura 1

Modelo estructural de referencia.



2.5. Modelado Numérico y Simulación Computacional con GiD® y Code_Bright®

2.5.1. Definición de la geometría del modelo

Se diseñaron secciones representativas del pavimento flexible considerando una inclinación del talud y capas con espesores variables. Con base en las dimensiones definidas para los terraplenes, se inicia la creación de la geometría del modelo mediante el uso de las herramientas de puntos y líneas disponibles en el entorno de trabajo. Tras completar esta fase, se incorporan las superficies y volúmenes que representan cada una de las capas, con el fin de representar de manera precisa la configuración del sistema estructural.

2.5.2. Asignación de propiedades del material

A cada capa del modelo (concreto asfáltico, base granular, subbase granular y subrasante) se les asignaron las propiedades correspondientes a los materiales. En este paso se asignó el respectivo módulo de elasticidad a cada capa estructural.

2.5.3. Definición de condiciones de carga y contorno

Se aplicó una carga representativa de un eje sencillo con ruedas dobles sobre la superficie del pavimento, y se establecieron las condiciones de contorno para simular el comportamiento real. En esta fase se identifican los factores que influyen en el funcionamiento del modelo, incluyendo entre ellos:

Información general del modelo que el software GiD® necesita a través de las ventanas de entrada de datos.

Condiciones de contorno, donde se definen los puntos de aplicación de las cargas, simulación de las llantas, y las restricciones laterales que limitan los desplazamientos.

Intervalos de tiempo de análisis, considerando un primer intervalo con todos los datos iniciales (geometría, materiales y condiciones), y un segundo intervalo que inicia tras aplicar la carga.

2.5.4. Generación del mallado

Una vez definido el modelo, se procede a la generación de la malla que discretiza la geometría en nodos y elementos. En esta etapa, las propiedades y condiciones previamente asignadas al modelo se trasladan a los elementos de la malla.

2.5.5. Postproceso

El modelo generado en GiD® se transfiere a un formato adecuado para su procesamiento en Code_Bright®, donde se lleva a cabo los análisis mecánicos en estado plano de deformación.

En esta etapa se evalúan los parámetros de respuesta estructural como la deflexión superficial, la deformación horizontal por tracción en el fondo del concreto asfáltico y la deformación vertical por compresión en la subrasante.

2.5.6. Análisis de resultados

Los resultados de las simulaciones fueron organizados en una base de datos para su análisis comparativo, lo que permitió identificar tendencias y relaciones entre las variables de diseño y los parámetros de respuesta estructural.

3. Resultados

Considerando diferentes espesores de capas, módulos de elasticidad y ángulos de inclinación, se generaron aproximadamente 36 estructuras configuraciones de estructuras de pavimento, las cuales fueron utilizadas para realizar simulaciones en el software GiD®, sin embargo, algunos análisis fueron tomados de una base de datos de proyectos anteriores (Valbuena Martínez, 2024) (Cotes & Garnica, 2024). Después de analizar los resultados obtenidos, se decidió trabajar con el modelo 1, ya que presentó los parámetros de diseño más favorables para el análisis planteado. La Figura 1 muestra el modelo estructural de referencia, compuesto por los siguientes módulos de elasticidad: E_{CA} = 3250 MPa, E_{BG} = 250 MPa, E_{SBG} = 200 MPa y E_{SR} = 80 MPa, los siguientes espesores de capa: h_{CA} = 0,10 m, h_{BG} = 0,25 m, h_{SBG} = 0,25 m, y h_{SR} = 4,3 m y una variación de ángulos de inclinación de 33° en la SR y 45° en las capas de CA, BG y SBG.

Con el propósito de evaluar la influencia de las variables analizadas, la información fue estructurada en forma de tablas y gráficos que presentan la comparación entre los módulos de elasticidad, espesores de capa y ángulos de inclinación, en función de los parámetros de respuesta estructural: deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del concreto asfáltico y deformación vertical en la parte superior de la subrasante. Esta disposición metodológica permite una mejor interpretación de los resultados, facilitando el análisis de tendencias y la determinación de la sensibilidad de cada variable de diseño ante las variaciones consideradas y así poder establecer conclusiones relacionadas con el grado de sensibilidad.

3.1. Comportamiento de los parámetros de diseño estructural ante la variación del módulo de elasticidad y espesores de las capas estructurales de pavimento

3.1.1. Influencia del módulo de elasticidad y espesores de capa del concreto asfáltico sobre los parámetros de diseño estructural

Los parámetros asignados de forma constante para la realización de este estudio se encuentran detallados en la Tabla 2, junto con los que se mencionan a continuación:

- h_{BG} = 0,25m
- E_{BG} = 250MPa
- h_{SBG} = 0,25m
- E_{SBG} = 200MPa

Los espesores de capas considerados para la carpeta asfáltica oscilaron entre 0,10m y 0,05m, mientras que los módulos de elasticidad correspondientes variaron desde 3250 MPa hasta 1500 MPa. Las deflexiones y deformaciones generadas en el punto más crítico de carga de la llanta se presentan en la Tabla 3, las cuales ilustran tres tendencias distintas que facilitan una comprensión más clara de la variabilidad del comportamiento estructural en función de los cambios en espesor de capa y el módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica.

El grado de variación de cada variable se encuentra especificado en las Tablas 4 y 5, respectivamente, tomando como valor de referencia el correspondiente a la estructura base del estudio.

Tabla 3

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 y espesores de capa de CA.

E_{CA} (MPa)	h_{CA} (m)	Δz (mm)	εr	εz
3250	0.10	0.3141	2.365E-05	9.858E-05
	0.07	0.3265	9.698E-06	9.354E-05
	0.05	0.3361	9.434E-06	9.679E-05
2500	0.10	0.3264	2.693E-05	1.017E-04
	0.07	0.3391	1.128E-05	9.588E-05
	0.05	0.3484	1.134E-05	9.895E-05
1500	0.10	0.3523	3.315E-05	1.069E-04
	0.07	0.3655	1.883E-05	9.974E-05
	0.05	0.3743	1.625E-05	1.024E-04

Tabla 4

Variación porcentual de la variación de h_{CA} para la deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR.

E_{CA} (Mpa)	h_{CA} (m)	Δz (mm)	εr	εz
3250	0.10	0.00%	0.00%	0.00%
	0.07	3.96%	59.00%	5.11%
	0.05	7.01%	60.12%	1.82%
2500	0.10	0.00%	0.00%	0.00%
	0.07	3.88%	58.11%	5.69%
	0.05	6.72%	57.88%	2.67%
1500	0.10	0.00%	0.00%	0.00%
	0.07	3.73%	43.19%	6.73%
	0.05	6.23%	50.99%	4.20%

Tabla 5

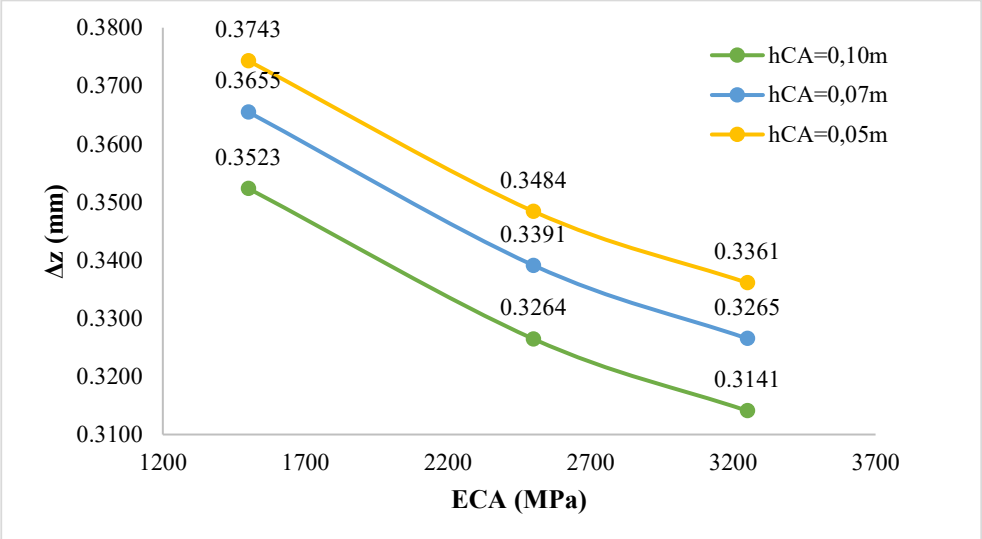
Porcentaje de variación respecto a la deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR cambiando el E_{CA}.

h_{CA} (m)	E_{CA} (MPa)	Δz (mm)	εr	εz
0.10	3250	0.00%	0.00%	0.00%
	2500	3.93%	13.85%	3.13%
	1500	12.18%	40.14%	8.48%

La Figura 2 presenta las deflexiones superficiales en función de E_{CA}. Para este análisis se consideraron tres configuraciones estructurales distintas de pavimento, definidas por variaciones de h_{CA}. Los resultados muestran una tendencia decreciente en las deflexiones conforme aumenta el valor del módulo de elasticidad y espesor del concreto asfáltico, lo que indica que un mayor módulo de elasticidad y espesor de capa puede contribuir a una disminución significativa en la deflexión.

Figura 2

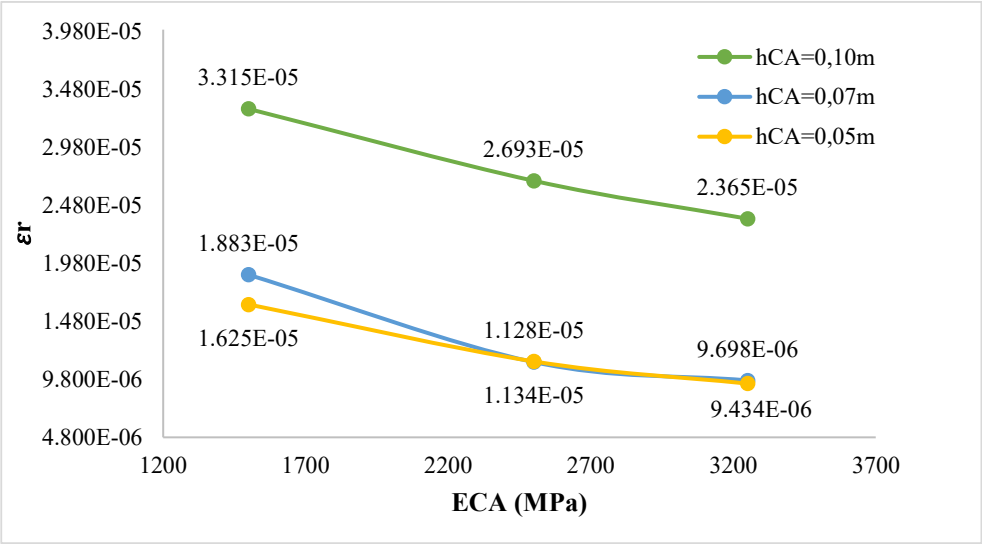
Deflexión superficial en función del módulo de elasticidad de CA variando el espesor de capa de CA.



Del mismo modo, la Figura 3 evidencia una tendencia decreciente, en donde la deformación horizontal en el fondo del concreto asfáltico tiende a disminuir a medida que aumenta E_{CA}.

Figura 3

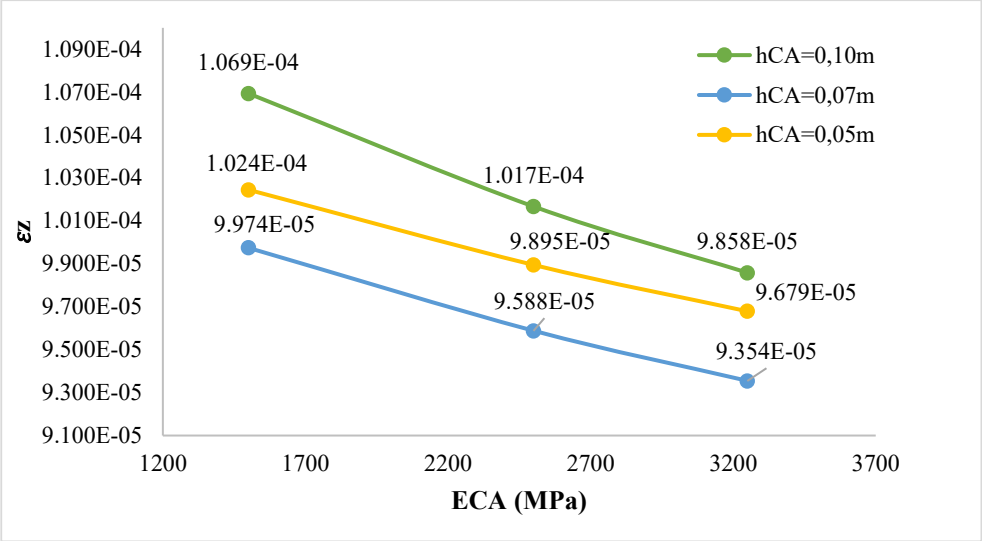
Deformación horizontal en el fondo de CA en función del módulo de elasticidad de CA variando el espesor de capa de CA.



La Figura 4 presenta los valores de deformación vertical en la superficie de la subrasante en función de E_{CA}, considerando distintos espesores de esa misma capa (h_{CA}). Se puede observar una tendencia decreciente, ya que a medida que el módulo de elasticidad del concreto asfáltico aumenta, la deformación por compresión tiende a disminuir sobre la subrasante.

Figura 4

Deformación vertical de en la superficie de la SR en función del módulo de elasticidad de CA variando el espesor de capa de CA.



3.1.2. Influencia del módulo de elasticidad y espesores de capa de la base granular sobre los parámetros de diseño estructural

Para este ítem también se mantendrán constantes los parámetros establecidos en la Tabla 2, así como los que se detallan a continuación.

- h_{CA} = 0,10m
- E_{CA} = 3250MPa
- h_{SBG} = 0,25m
- E_{SBG} = 200MPa

Los espesores de capas considerados para la base granular oscilaron entre 0,25m y 0,15m, mientras que los módulos de elasticidad correspondientes variaron desde 250 MPa hasta 150 MPa. Las deflexiones y deformaciones generadas en el punto más crítico de carga de la llanta se presentan en la Tabla 6.

El grado de variación para cada variable está establecido en la Tabla 7 y 8 respectivamente, tomando como valor de referencia aquel 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 y espesores de capa de BG.

E_{BG} (MPa)	h_{BG} (m)	Δz (mm)	εr	εz
250	0.25	0.3141	2.365E-05	9.858E-05
	0.20	0.3189	2.427E-05	1.067E-04
	0.15	0.3161	2.377E-05	1.108E-04
200	0.25	0.3252	2.631E-05	9.985E-05
	0.20	0.3299	2.695E-05	1.098E-04
	0.15	0.3268	2.603E-05	1.174E-04
150	0.25	0.3409	2.969E-05	1.008E-04
	0.20	0.3455	3.032E-05	1.136E-04
	0.15	0.3421	2.875E-05	1.269E-04

Tabla 7

Variación porcentual de la variación de h_{BG} para la deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR.

E_{BG} (Mpa)	h_{BG} (m)	Δz (mm)	εr	εz
250	0.25	0.00%	0.00%	0.00%
	0.20	1.53%	2.59%	8.24%
	0.15	0.65%	0.48%	12.40%
200	0.25	0.00%	0.00%	0.00%
	0.20	1.45%	2.41%	9.97%
	0.15	0.51%	1.06%	17.58%
150	0.25	0.00%	0.00%	0.00%
	0.20	1.35%	2.11%	12.67%
	0.15	0.36%	3.17%	25.84%

Tabla 8

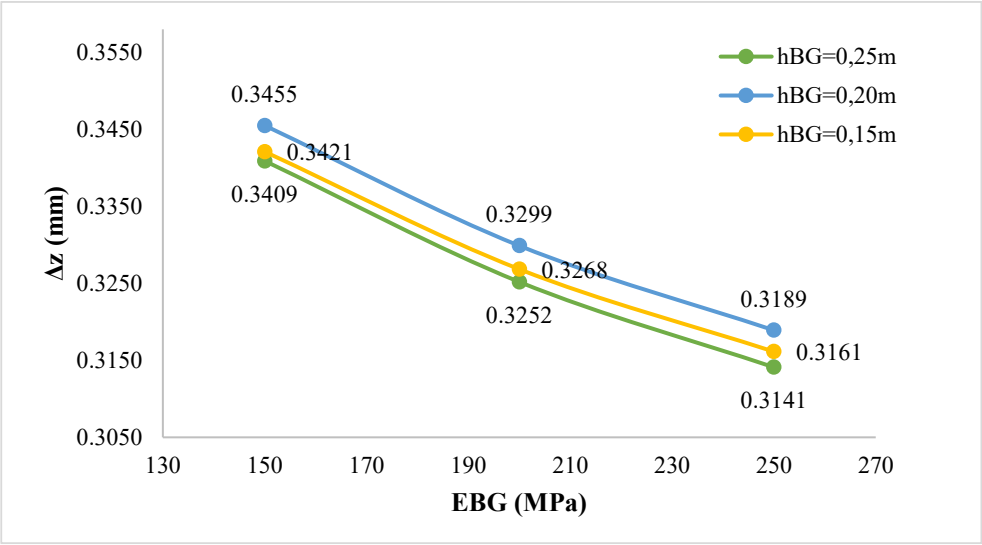
Porcentaje de variación respecto a la deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR cambiando el E_{BG}.

h_{BG} (m)	E_{BG} (MPa)	Δz (mm)	εr	εz
0.25	250	0.00%	0.00%	0.00%
	200	3.53%	11.23%	1.29%
	150	8.53%	25.52%	2.30%

La Figura 5 presenta las deflexiones superficiales en función de E_{BG}. Se consideraron tres configuraciones estructurales distintas de pavimento definidas por variaciones de h_{BG}. Los resultados muestran una tendencia decreciente en las deflexiones, un mayor módulo de elasticidad y espesor de capa de la base granular, contribuyen a una disminución en la deflexión.

Figura 5

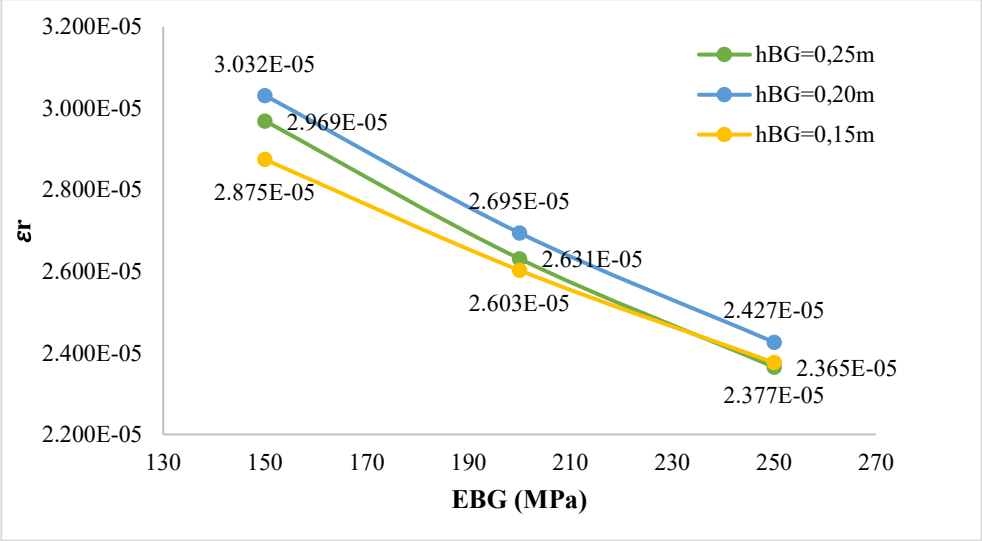
Deflexión superficial en función del módulo de elasticidad de BG variando el espesor de capa de BG.



La Figura 6 evidencia una tendencia decreciente, donde la deformación horizontal en el fondo del concreto asfáltico tiende a disminuir a medida que aumenta E_{BG}.

Figura 6

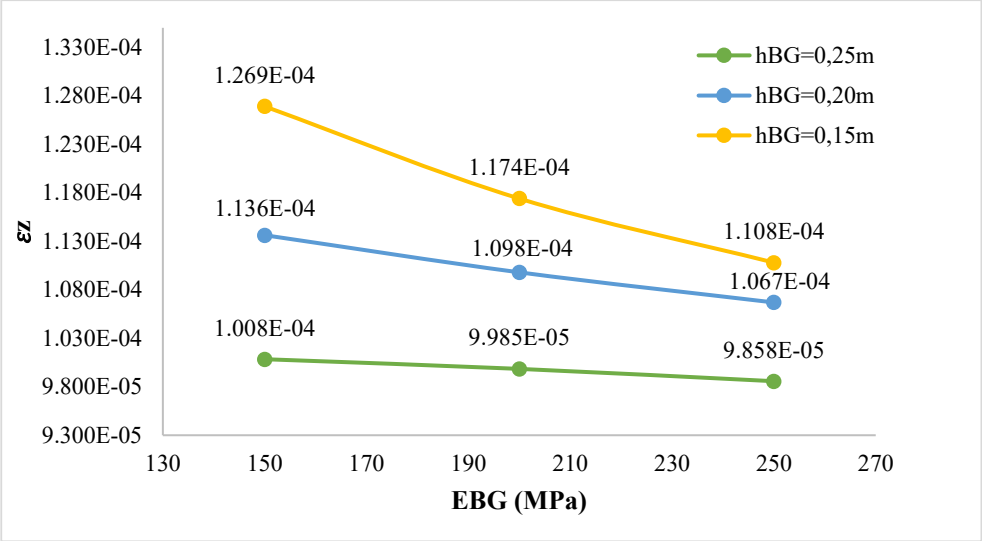
Deformación horizontal en el fondo de CA en función del módulo de elasticidad de BG variando el espesor de capa de BG.



La Figura 7 evidencia los valores de deformación vertical en la superficie de la subrasante en función de E_{BG}, considerando distintos espesores de esta capa (h_{BG}). Se puede observar una tendencia decreciente. Cuando el módulo de elasticidad de la base granular aumenta junto con el espesor de capa, la deformación por compresión tiende a disminuir sobre la subrasante.

Figura 7

Deformación vertical de en la superficie de la SR en función del módulo de elasticidad de BG variando el espesor de capa de BG.



3.1.3. Influencia del módulo de elasticidad y espesores de capa de la subbase granular sobre los parámetros de diseño estructural

Para este ítem también se mantendrán constantes los parámetros establecidos en la Tabla 2, así como los que se detallan a continuación.

- h_{CA} = 0,10m
- E_{CA} = 3250MPa
- h_{BG} = 0,25m
- E_{BG} = 250MPa

Los espesores de capas considerados para la subbase granular oscilaron entre 0,25m y 0,15m, y los módulos de elasticidad correspondientes variaron desde 200 MPa hasta 100 MPa. Las deflexiones y deformaciones generadas en el punto más crítico de carga de la llanta se presentan en la Tabla 9.

El grado de variación para cada variable está establecido en la Tabla 10 y 11 respectivamente, tomando como valor de referencia aquel correspondiente a la estructura de referencia.

Tabla 9

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 y espesores de capa de SBG.

E_{SBG} (MPa)	h_{SBG} (m)	Δz (mm)	εr	εz
200	0.25	0.3141	2.365E-05	9.858E-05
	0.20	0.3164	2.336E-05	1.011E-04
	0.15	0.3170	2.362E-05	1.008E-04
150	0.25	0.3242	2.379E-05	1.131E-04
	0.20	0.3265	2.346E-05	1.133E-04
	0.15	0.3268	2.366E-05	1.120E-04
100	0.25	0.3405	2.401E-05	1.388E-04
	0.20	0.3425	2.366E-05	1.345E-04
	0.15	0.3426	2.374E-05	1.317E-04

Tabla 10

Variación porcentual de la variación de h_{SBG} para la deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR.

E_{SBG} (MPa)	h_{SBG} (m)	Δz (mm)	εr	εz
200	0.25	0.00%	0.00%	0.00%
	0.20	0.74%	1.24%	2.60%
	0.15	0.92%	0.13%	2.27%
150	0.25	0.00%	0.00%	0.00%
	0.20	0.69%	1.40%	0.19%
	0.15	0.80%	0.58%	0.91%
100	0.25	0.00%	0.00%	0.00%
	0.20	0.58%	1.46%	3.09%
	0.15	0.61%	1.13%	5.10%

Tabla 11

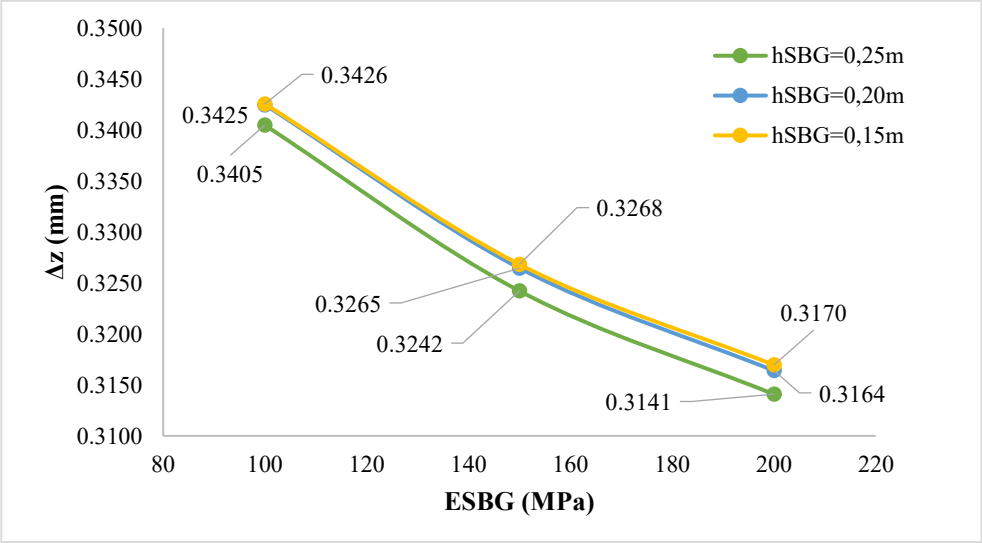
Porcentaje de variación respecto a deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR cambiando el E_{SBG}.

h_{SBG} (m)	E_{SBG} (MPa)	Δz (mm)	εr	εz
0.25	200	0.00%	0.00%	0.00%
	150	3.23%	0.59%	14.71%
	100	8.41%	1.51%	40.80%

La Figura 8 presenta las deflexiones superficiales en función de E_{SBG}. Se analizaron tres configuraciones estructurales de pavimento, diferenciadas por variaciones de h_{SBG}. Los resultados evidencian una tendencia decreciente en las deflexiones a medida que aumenta el módulo de elasticidad y espesores de capa de la subbase granular, lo que sugiere que un mayor valor de estos parámetros contribuye significativamente a la reducción de la deflexión.

Figura 8

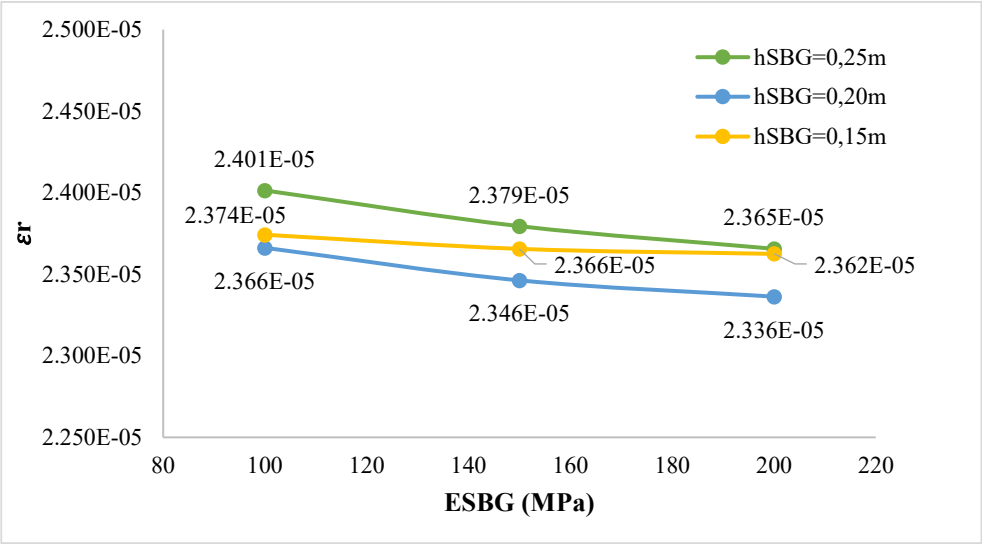
Deflexión superficial en función del módulo de elasticidad de SBG variando el espesor de capa de SBG.



De manera similar, la Figura 9 muestra una tendencia decreciente en la deformación horizontal en fondo del concreto asfáltico, la cual tiende a disminuir conforme se incrementa E_{SBG}, considerando distintos espesores de dicha capa (h_{SBG}).

Figura 9

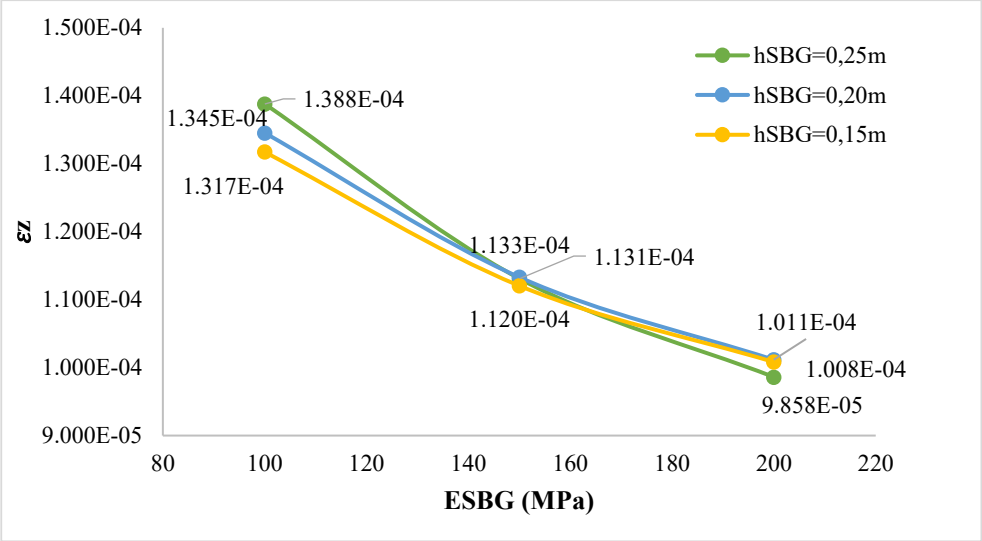
Deformación horizontal en el fondo de CA en función del módulo de elasticidad de SBG variando el espesor de capa de SBG.



La Figura 10 presenta los valores de deformación vertical en la superficie de la subrasante en función de E_{SBG}, considerando distintos espesores de esa misma capa (h_{SBG}). Se observa una tendencia decreciente, ya que al aumentar el módulo de elasticidad de la subbase granular, la deformación por compresión en la subrasante tiende a disminuir.

Figura 10

Deformación vertical de en la superficie de la SR en función del módulo de elasticidad de SBG variando el espesor de capa de SBG.



3.2. Comportamiento de los parámetros de diseño estructural ante la variación del ángulo de inclinación y espesores de las capas estructurales de pavimento

3.2.1. Influencia del ángulo de inclinación y espesores de capa del concreto asfáltico sobre los parámetros de diseño estructural

Los parámetros asignados de forma constante para el desarrollo de este estudio se encuentran especificados en la Tabla 2, junto con los que se detallan a continuación:

- E_{CA} = 3250MPa
- h_{BG} = 0,25m
- E_{BG} = 250MPa
- h_{SBG} = 0,25m
- E_{SBG} = 200MPa

Los espesores de capas considerados para la carpeta asfáltica oscilaron entre 0,10m y 0,05m, mientras que el ángulo de inclinación varió desde 45 ° a 27 °. Las deflexiones y deformaciones generadas en el punto más crítico de carga de la llanta se presentan en la Tabla 12.

El grado de variación para cada variable está establecido en la Tabla 13 y 14 respectivamente, tomando como valor de referencia aquel correspondiente a la estructura de referencia.

Tabla 12

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 ángulo de inclinación y espesores de capa de CA.

θ (°)	h_{CA} críticos (m)	Δz (mm)	εr	εz
45	0.1	0.3141	2.365E-05	9.858E-05
	0.05	0.3361	9.434E-06	9.679E-05
37	0.1	0.2737	1.425E-05	8.082E-05
	0.05	0.3138	6.318E-06	7.994E-05
27	0.1	0.2718	6.345E-06	8.847E-05
	0.05	0.2911	2.649E-06	7.493E-05

Tabla 13

Variación porcentual de la variación de h_{CA} para la deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR.

θ (°)	h_{CA} críticos (m)	Δz (mm)	εr	εz
45	0.10	0.00%	0.00%	0.00%
	0.05	7.01%	60.12%	1.82%
37	0.10	0.00%	0.00%	0.00%
	0.05	14.64%	55.67%	1.09%
27	0.10	0.00%	0.00%	0.00%
	0.05	7.11%	58.25%	15.30%

Tabla 14

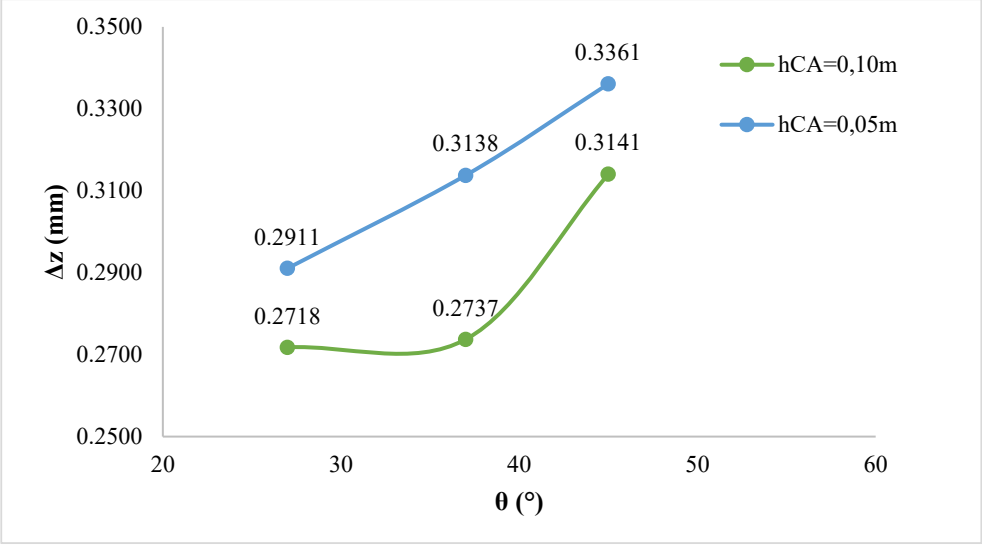
Porcentaje de variación respecto a deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR cambiando el θ.

h_{CA} críticos (m)	θ (°)	Δz (mm)	εr	εz
0.10	45	0.00%	0.00%	0.00%
	37	12.85%	39.75%	18.02%
	27	13.47%	73.18%	10.26%

La Figura 11 muestra la relación entre las deflexiones superficiales y el ángulo de inclinación. En este análisis se consideraron dos configuraciones estructurales diferentes del pavimento, determinadas por variaciones de h_{CA}. Los resultados describen una tendencia creciente de las deflexiones a medida que se incrementa el ángulo de inclinación, lo cual sugiere que un mayor grado de inclinación contribuye a un aumento significativo en la magnitud de la deflexión.

Figura 11

Deflexión superficial en función del ángulo de inclinación variando el espesor de capa de CA.

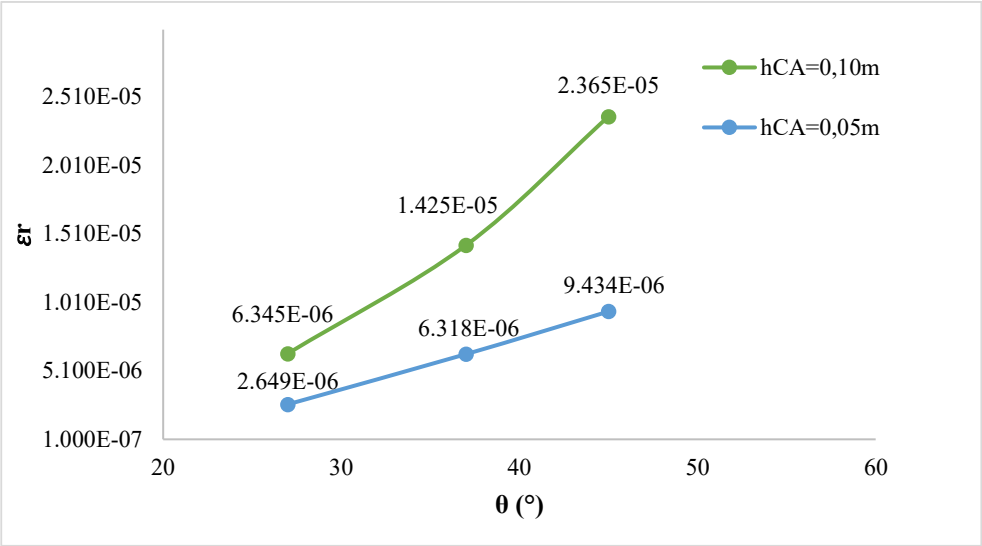


La Figura 12 muestra los valores de deformación horizontal en el fondo del concreto asfáltico en función del ángulo de inclinación, considerando diferentes valores de h_{CA}. Los

resultados evidencian una tendencia creciente, ya que, al aumentar el ángulo de inclinación y espesor de capa del concreto asfáltico, la deformación por tracción en el fondo del concreto asfáltico también tiende a incrementar.

Figura 12

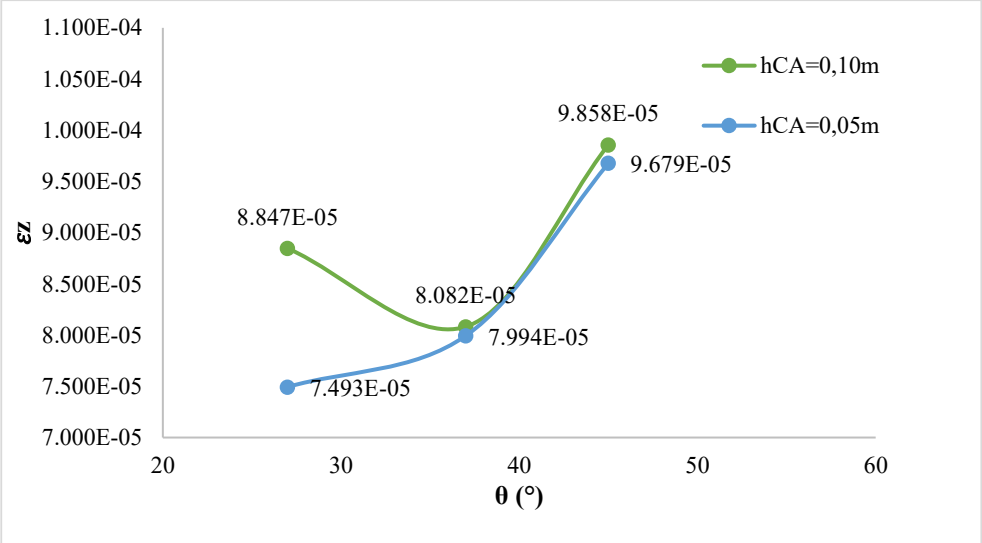
Deformación horizontal en el fondo de CA en función del ángulo de inclinación variando el espesor de capa de CA.



La Figura 12 muestra una tendencia creciente en la deformación vertica1 en la superficie de la subrasante conforme se incrementa el ángulo de inclinación junto con el espesor de CA.

Figura 13

Deformación vertical en la superficie de la SR en función del ángulo de inclinación variando el espesor de capa de CA.



3.3. Comportamiento de los parámetros de diseño estructural ante la variación del módulo de elasticidad de la subrasante

3.3.1. Influencia del módulo de elasticidad de la subrasante y concreto asfaltico sobre los parámetros de diseño estructural

Los parámetros asignados de forma constante para el desarrollo de este estudio se encuentran especificados en la Tabla 2, además de los que se detallan a continuación:

- E_{BG} = 250MPa
- E_{SBG} = 200MPa
- h_{CA} = 0,10m
- h_{BG} = 0,25m
- h_{SBG} = 0,25m
- h_{SR} = 4,30m

Los módulos de elasticidad considerados para la carpeta asfáltica variaron entre 3250 MPa y 1500 MPa, mientras que para la subrasante oscilaron entre 80 MPa y 30 MPa. Las deflexiones y deformaciones generadas en el punto más crítico de aplicación de carga de la llanta se presentan en la Tabla 15.

El grado de variación de cada variable se encuentra especificado en las Tablas 16 y 17, respectivamente, tomando como valor de referencia aquel correspondiente a la estructura de referencia.

Tabla 15

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 SR y CA.

E_{SR} (MPa)	E_{CA} críticos (MPa)	Δz (mm)	εr	εz
80	3250	0.3141	2.365E-05	9.858E-05
	1500	0.3523	3.315E-05	1.069E-04
50	3250	0.4207	2.310E-05	1.173E-04
	1500	0.4641	3.230E-05	1.270E-04
30	3250	0.5919	2.255E-05	1.451E-04
	1500	0.6440	3.155E-05	1.569E-04

Tabla 16

Variación porcentual de la variación de E_{CA} para la deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR.

E_{SR} (MPa)	E_{CA} críticos (MPa)	Δz (mm)	εr	εz
80	3250	0.00%	0.00%	0.00%
	1500	12.18%	40.14%	8.48%
50	3250	0.00%	0.00%	0.00%
	1500	10.31%	39.83%	8.29%
30	3250	0.00%	0.00%	0.00%
	1500	8.79%	39.90%	8.14%

Tabla 17

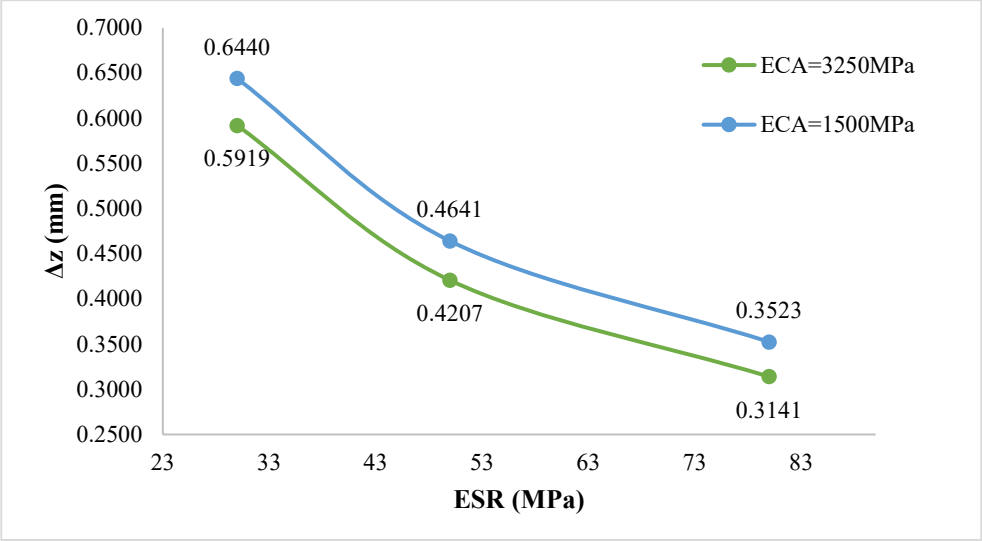
Porcentaje de variación respecto a deflexión superficial, deformación horizontal en el fondo del CA, y deformación vertical en la superficie de la SR cambiando el E_{SR}.

E_{CA} críticos (MPa)	E_{SR} (MPa)	Δz (mm)	εr	εz
3250	80	0.00%	0.00%	0.00%
	50	33.93%	2.36%	18.99%
	30	88.45%	4.67%	47.22%

La Figura 14 muestra las deflexiones superficiales en función de E_{SR}. Para este análisis se consideraron dos configuraciones estructurales distintas del pavimento, definidas por variaciones de E_{CA}. Los resultados evidencian una tendencia decreciente de las deflexiones a medida que aumenta el valor de E_{SR} y E_{CA}, esto significa que un mayor módulo de elasticidad de estas capas puede contribuir a una disminución significativa en las deflexiones superficiales.

Figura 14

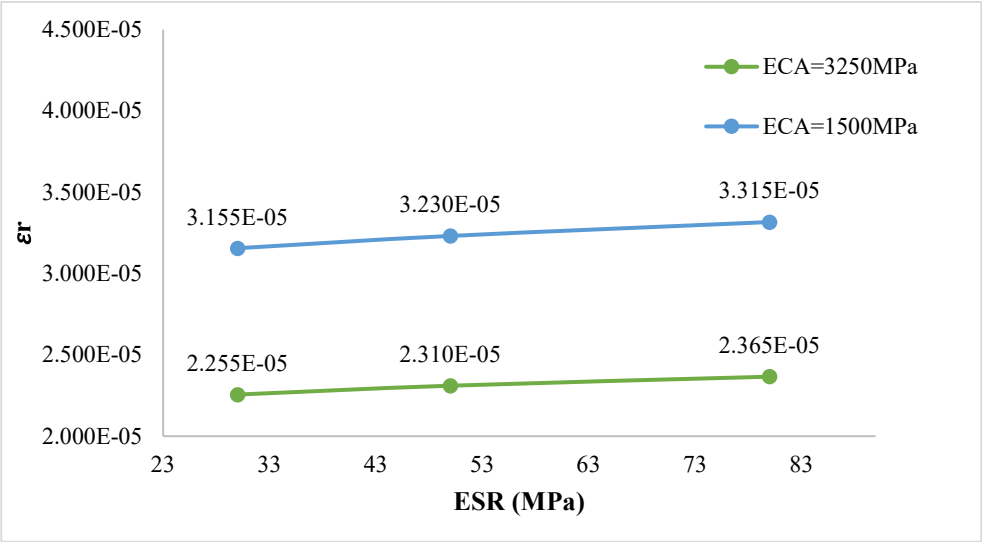
Deflexión superficial en función del módulo de elasticidad de SR variando el módulo de elasticidad de CA.



Sin embargo, la deformación horizontal en el fondo del concreto asfáltico representada en la Figura 15, evidencia una tendencia creciente a medida que se incrementa E_{SR}, considerando distintos valores de E_{CA}.

Figura 15

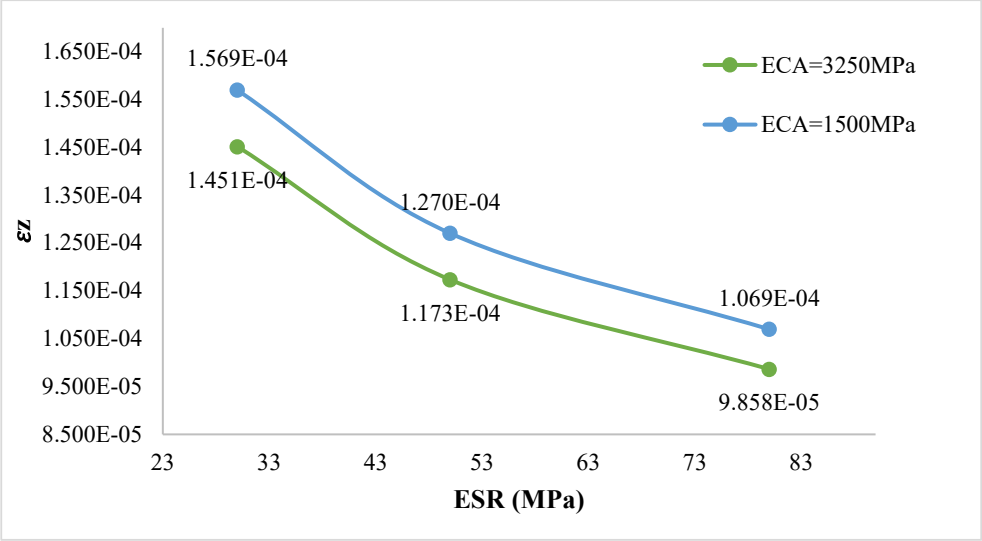
Deformación horizontal en el fondo de CA en función del módulo de elasticidad de SR variando el módulo de elasticidad de CA.



La Figura 16 muestra los valores de deformación vertical en la superficie de la subrasante en función de E_{SR}, considerando distintos valores de E_{CA}. Los resultados evidencian una tendencia decreciente, ya que al aumentar E_{SR} y E_{CA}, la deformación por compresión sobre la subrasante tiende a disminuir significativamente.

Figura 16

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



Con base en la información analizada, se puede observar que todas las estructuras evaluadas cumplen con los criterios admisibles, ya que los valores obtenidos para deflexión, deformación por tracción y deformación por compresión se encuentran por debajo de los máximos permitidos, que son 1,650 mm, 3,32E-04 y 1,18E-03, respectivamente. No obstante, en caso de que alguno de estos parámetros no fuese satisfecho, sería necesario realizar ajustes en el diseño del pavimento flexible. Entre las posibles acciones correctivas se incluyen el incremento del espesor de una o varias capas del pavimento, la sustitución de materiales por otros con mejores propiedades mecánicas, o la mejora del suelo mediante técnicas de estabilización. Estas estrategias permiten asegurar el desempeño estructural y la durabilidad del pavimento durante su vida útil.

3.4. Grado de sensibilidad de las variables de los parámetros de diseño estructural

Para este análisis se evaluó la sensibilidad de la estructura de referencia mediante la comparación de los mayores porcentajes de variación observados en los parámetros de respuesta: deflexión superficial, deformación horizontal y deformación vertical. Estas variaciones se analizaron en función de los cambios en las variables de diseño evaluadas, tales como el módulo de elasticidad, el espesor y el ángulo de inclinación de las capas. Los porcentajes obtenidos fueron clasificados según la escala de sensibilidad propuesta por Higuera (2006), la cual se presenta en la Tabla 18.

Tabla 18

Escala para definir grado de sensibilidad.

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

Al aplicar el análisis de sensibilidad a las variables consideradas en el diseño de la estructura de pavimento flexible, fue posible evaluar su grado de sensibilidad clasificándolas según la influencia que tienen.

Los resultados del comportamiento de estas variables, en términos de deflexión superficial, deformación horizontal y deformación vertical, se presentan en la Tabla 19, Tabla 20 y Tabla 21, respectivamente.

Tabla 19

Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de Δz.

Variable de diseño	Máximo % variación Δz	Grado de sensibilidad
h_{CA}	7.01%	BAJA
h_{BG}	1.53%	BAJA
h_{SBG}	0.92%	BAJA
E_{CA}	12.18%	BAJA
E_{BG}	8.53%	BAJA
E_{SBG}	8.41%	BAJA
E_{SR}	88.45%	ALTA
θ	13.47%	BAJA

Tabla 20

Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de εr.

Variable de diseño	Máximo % variación εr	Grado de sensibilidad
h_{CA}	60.12%	ALTA
h_{BG}	3.17%	BAJA
h_{SBG}	1.46%	BAJA
E_{CA}	40.14%	ALTA
E_{BG}	25.52%	MEDIA
E_{SBG}	1.51%	BAJA
E_{SR}	4.67%	BAJA
θ	73.18%	ALTA

Tabla 21

Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de εz.

Variable de diseño	Máximo % variación εz	Grado de sensibilidad
h_{CA}	6.73%	BAJA
h_{BG}	25.84%	MEDIA
h_{SBG}	5.10%	BAJA
E_{CA}	8.48%	BAJA
E_{BG}	2.30%	BAJA
E_{SBG}	40.80%	ALTA
E_{SR}	47.22%	ALTA
θ	18.02%	MEDIA

4. Conclusiones

Mediante simulaciones numéricas realizadas para analizar el efecto del espesor, el módulo de elasticidad y el ángulo de inclinación de las capas que integran una estructura de pavimento se logró determinar con precisión la sensibilidad de estas variables en el diseño de pavimentos. Estos análisis permitieron identificar de manera clara cómo influyen dichas variables en el comportamiento mecánico de la estructura, proporcionando una base técnica sólida que respalda la toma de decisiones en el diseño de pavimentos. Asimismo, se destaca la relevancia del uso de herramientas avanzadas en ingeniería civil, ya que su aplicación mediante simulaciones numéricas es esencial para optimizar el rendimiento y la durabilidad de las carreteras.

Una de las variables más utilizadas en el diseño estructural para garantizar la durabilidad del pavimento es el espesor de capa, un mayor espesor de la capa estructural proporciona una mejor distribución de las cargas. No obstante, al analizar su comportamiento en conjunto con el módulo de elasticidad del material, es fundamental considerar ciertos factores que pueden afectar el desempeño estructural del pavimento, ya que una combinación inadecuada podría generar efectos no deseados en el diseño.

Según lo encontrado, aumentar el módulo de elasticidad de las capas estructurales, especialmente en la capa de concreto asfáltico, mejora el comportamiento mecánico del pavimento; el aumento adecuado de módulo de elasticidad y espesor ayuda a disminuir significativamente las deflexiones superficiales. Incrementar el módulo de elasticidad del concreto asfáltico, la base y la subbase ayuda a reducir la deformación horizontal en el fondo de la capa asfáltica, sin embargo, un espesor excesivo, sin una modificación proporcional en los espesores o módulos de elasticidad de las capas estructurales inferiores, puede contrarrestar este beneficio.

Igualmente, se puede observar que un mayor módulo de elasticidad del concreto asfáltico contribuye a disminuir la deformación vertical en la subrasante, pero si esta capa tiene un espesor elevado y no se acompaña de una base y subbase con suficiente módulo de elasticidad o espesor, el desequilibrio estructural puede aumentar la presión transmitida hacia la subrasante, generando mayores deformaciones y acelerando el desarrollo de agrietamiento por fatiga. En cambio, un aumento del módulo de elasticidad y el espesor en la base y subbase granular muestran una mejoría en la distribución de carga, además de reducir la deformación vertical sobre la subrasante, lo que indica que incrementar el espesor y módulo de elasticidad de estas capas inferiores puede resultar clave para proteger la subrasante.

Entre los distintos factores que influyen en el comportamiento estructural de un pavimento flexible, como el espesor y el módulo de elasticidad de las capas estructurales, El aumento del ángulo de inclinación del terreno y del espesor de la capa de concreto asfáltico influye significativamente en el comportamiento estructural del pavimento. Un mayor ángulo de inclinación puede dar como resultado el aumento de la deflexión superficial, pero un mayor espesor de capa del concreto asfáltico puede ayudar a disminuir este efecto. Sin embargo, en terrenos inclinados, aunque incrementar el espesor del concreto asfáltico puede reducir las deflexiones, hacerlo sin buscar la manera de reforzar las capas estructurales inferiores puede agravar otros mecanismos de falla. Una mayor inclinación, combinada con un mayor espesor de capa del concreto asfáltico puede dar como resultado el aumento de la deformación horizontal en el fondo del concreto asfáltico, disminuyendo su vida útil por fatiga. Además, esta combinación también podría aumentar la deformación vertical en la superficie de la subrasante, ya que la carga transmitida hacia abajo es mayor y, debido a la falta de un soporte uniforme por la pendiente, se genera mayor presión localizada.

El módulo de elasticidad de la subrasante es la variable más determinante. Una subrasante con un alto módulo de elasticidad mejora significativamente la respuesta estructural global del sistema. Estudiando el comportamiento del pavimento, considerando variaciones en los módulos de elasticidad del concreto asfáltico y la subrasante, se identificaron efectos clave. Al aumentar estas variables, se observó una disminución de la deflexión superficial, esto es fundamental para disminuir el riesgo de asentamiento y de agrietamiento por fatiga. Pero, también se observó en los resultados, que, aunque una subrasante con mayor módulo de elasticidad mejora la capacidad estructural, en algunos casos puede producir un leve incremento en la deformación horizontal en la carpeta asfáltica, debido a una redistribución interna de esfuerzos que concentra tensiones de tracción en la base del concreto asfáltico, Sin embargo, este efecto puede mitigarse si el concreto asfáltico presenta un mayor módulo de elasticidad.

El parámetro que tuvo bastante influencia debido a estas variaciones fue la deformación vertical en la subrasante, al incrementarse equilibradamente el módulo de elasticidad de la subrasante y del concreto asfáltico, se mejora la distribución de carga y se reduce la presión sobre la subrasante, disminuyendo este parámetro significativamente. Esto es fundamental, porque si se tiene una subrasante débil, el pavimento se puede deformar plásticamente bajo cargas repetidas, y causar asentamientos diferenciales y ahuellamiento. Por ello, se recomienda que el diseño estructural deba iniciar con una adecuada caracterización de la subrasante y, si es necesario, su mejora, ya que constituye la base de toda la estructura; si esta falla, el pavimento presentará daños prematuros, sin importar la calidad o espesor de las capas superiores.

Los modelos evaluados cumplieron con los valores admisibles establecidos para la deflexión superficial, la deformación horizontal en la base del concreto asfáltico y la deformación

vertical en la subrasante, lo cual valida el diseño estructural propuesto bajo las condiciones nacionales consideradas.

Como futuros estudios sería interesante evaluar si el aumento en los espesores de las capas de base y subbase granular puede ayudar a contrarrestar los efectos negativos del ángulo de inclinación, dado que estas capas favorecen la redistribución de las cargas y la estabilidad del sistema.

Referencias Bibliográficas

Acosta Urrea, F. (2005). *Programación e implementación de un programa de elementos finitos para simular el comportamiento elástico no lineal en estructuras de pavimentos* (Trabajo final de pregrado). Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Recuperado de https://hdl.handle.net/1992/22383

Chamie Carrillo, S. A. (2021). *Análisis de las causas de retraso y sobrecoste en la construcción de vías terciarias en Colombia* (Trabajo final de Master). Universitat Politècnica de València, España.

Cotes Peña J. A., & Garnica Rios J. T. (2024). *Modelación numérica tridimensional del comportamiento mecánico en estructuras de pavimento flexible para vías terciarias.* (Trabajo final de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, UPC. (s.f.). *CODE_BRIGHT: Programa de elementos finitos para análisis termo-hidro-mecánico.* Universitat Politècnica de Catalunya. https://deca.upc.edu/en/projects/code_bright/code_bright

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, UPC. (2025). *CODE_BRIGHT 2025 User's guide.* Universitat Politècnica de Catalunya. https://deca.upc.edu/en/projects/code_bright/downloads/users_guide/view

Departamento Nacional de Planeación. (2016). *CONPES 3857: Lineamientos de política para la gestión de la red terciaria.* Consejo Nacional de Política Económica y Social – CONPES. https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/conpes-3857-de-2016/

Garzón D. A., & Linero D. L. (2010). *Elementos de la mecánica del medio continuo para cuerpos sólidos* (Vol. 1: Temas básicos). Universidad Nacional de Colombia.

GICO UPC. (2007). *Ingeniería geotécnica - T. 11 m. n. geotecnia*. Universidad Politécnica de Cataluña. https://ocw.camins.upc.edu/repositori/ocw/materials/2500031/2024/Tema_11_metodos_numericos_m.pdf

Gómez Rodríguez D. (2017). *Calibración numérica de ensayos de extracción de refuerzos en suelos.* (Trabajo final de pregrado). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España. Recuperado de https://upcommons.upc.edu/handle/2117/115244?show=full

Guzmán Suárez E. A. (2023). *Evaluación estructural de pavimentos flexibles.* Fundación Universitaria Juan de Castellanos. https://doi.org/10.38017/9789588966557

Higuera - Sandoval, C. H. (2006). Análisis de sensibilidad de las variables de diseño de un pavimento flexible y su incidencia en la deflexión. *Facultad de Ingeniería, 15(21),* 77-86. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=413940754009

Higuera - Sandoval, C. H. (2023). Análisis de sensibilidad y correlación entre el ahuellamiento y la deflexión en estructuras de pavimento flexible. *Respuestas, 28(2),* 33–48. https://doi.org/10.22463/0122820X.3472

Murillo, C. A. (2017). Desafíos para el desarrollo de la red vial terciaria en el posconflicto. *Revista De Ingeniería, 1(45),* 32-39. https://doi.org/10.16924/revinge.45.5

Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2007). Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: Tendencias, alcances y limitaciones. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina, 17(2),* 41–65. https://doi.org/10.18359/rcin.1074

Sánchez Morales, M. C., Pavón Marrero, D. M., & Tejeda Piusseaut, E. (2020). Propuesta de espesores mínimos de superficie y coeficientes de equivalencia de espesores para el diseño de pavimentos flexibles. *Revista de Arquitectura E Ingeniería, 14(1),* 1-10.

Valbuena Martínez K. J. (2024). *Modelación elástica tridimensional de una estructura de pavimento flexible compuesta por materiales granulares marginales* (Trabajo final de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.