

Modelación numérica tridimensional del comportamiento mecánico en estructuras de pavimento flexible para vías terciarias

Jessica Tatiana Garnica Rios

Jorge Andres Cotes Peña

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 Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2024

**Dedicatoria**

*Dedicamos este trabajo a Dios, porque gracias a Él todo este sueño se convirtió en realidad al darnos la salud y la sabiduría a lo largo del proceso. A nuestros padres, porque nunca dejaron de creer en nosotros, por su esfuerzo al llevarnos hasta este punto de nuestras vidas y porque fueron quienes nos inculcaron que se vale soñar. A nuestros hermanos por su apoyo incondicional y motivarnos a seguir adelante.*

### **Agradecimientos**

A Dios por darnos salud y permitirnos culminar con éxito uno de nuestros sueños.

A nuestros padres, por el apoyo incondicional que día a día nos dieron para cumplir con la meta tan anhelada.

A los docentes de la Escuela de Ingeniería Civil quiénes fundamentaron en nosotros los pilares para llegar a ser un buen profesional, en especial, a nuestro director de proyecto Ph. D Vladimir Ernesto Merchán Jaimes por ver en nosotros el potencial que no imaginábamos tener.

A nuestro codirector, el Ingeniero Brayan Andrés Velásquez, por su paciencia y dedicación al apoyarnos a lo largo del proyecto de investigación.

Finalmente, a todas aquellos familiares y amigos que hicieron parte de este proceso contribuyendo de una u otra manera en nuestras vidas.

**Tabla de contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	11
1. Objetivos .....	13
1.1. Objetivo General.....	13
1.2. Objetivos Específicos .....	13
2. Metodología .....	14
2.1. Modelación de pavimentos en programa multicapa elástico.....	14
2.2. Modelación de pavimento en programa de elementos finitos .....	16
2.3. Modelo de referencia y parámetros de diseño estructural .....	17
3. Resultados .....	20
3.1. Modelación de pavimentos flexibles en programa multicapa elástico .....	20
3.2. Modelación de pavimentos flexibles en programa de elementos finitos.....	21
3.2.1. Modelo estructural de referencia.....	23
3.2.2. Influencia de parámetros en el preproceso .....	26
3.2.3. Simulaciones numéricas mediante MEF .....	27
3.2.4. Comparación de las deflexiones verticales entre Pitra Pave® y GiD® .....	29
3.2.5. Influencia de espesores de capa .....	30
3.2.6. Influencia del cambio de inclinación en las capas estructurales del pavimento .....	32
3.2.7. Influencia de la geometría en las deflexiones .....	33

MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE	5
4. Conclusiones .....	35
5. Recomendaciones .....	36
Referencias Bibliográficas .....	37
Apéndice.....	39

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Propiedades y geometría de las capas del pavimento</i> .....	15
Tabla 2. <i>Propiedades y espesores para elementos finitos</i> .....	17
Tabla 3. <i>Resultados ejercicio preliminar</i> .....	23
Tabla 4. <i>Análisis de convergencia</i> .....	26
Tabla 5. <i>Resultados de los parámetros de diseño estructural, Modelo 1 – Caso A</i> .....	28
Tabla 6. <i>Influencia de espesores en la deflexión superficial</i> .....	31
Tabla 7. <i>Influencia de los espesores en la deformación unitaria vertical en el fondo del CA</i> .....	31
Tabla 8. <i>Influencia de los espesores en la deformación unitaria horizontal en la parte superior de la SBR</i> .....	32
Tabla 9. <i>Influencia de la geometría en el punto de análisis externo de la impronta de carga más cercana al borde del talud</i> .....	34
Tabla 10. <i>Influencia de la geometría en el punto de análisis interno de la impronta de carga más cercana al borde del talud</i> .....	34

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. <i>Estructura de pavimento flexible típica</i> .....	14
Figura 2. <i>Parámetros de análisis y diseño estructural</i> .....	16
Figura 3. <i>Metodología de proceso de simulación</i> .....	17
Figura 4. <i>Modelo estructural de referencia: Caso A</i> .....	18
Figura 5. <i>Esctructura de pavimento modelada: Caso B</i> .....	19
Figura 6. <i>Estructura de pavimento modelada: Caso C</i> .....	19
Figura 7. <i>Deflexión vertical para una estructura de pavimento simulada</i> .....	21
Figura 8. <i>Modelo preliminar</i> .....	22
Figura 9. <i>Simulación modelo preliminar</i> .....	23
Figura 10. <i>Modelo 1 tridimensional</i> .....	24
Figura 11. <i>Puntos de análisis del modelo 1</i> .....	24
Figura 12. <i>Preproceso del modelo 1, geometría 1, caso A</i> .....	25
Figura 13. <i>Postproceso del modelo 1, geometría 1, caso A</i> .....	25
Figura 14. <i>Simulaciones numéricas medinte MEF</i> .....	27
Figura 15. <i>Puntos de análisis</i> .....	28
Figura 16. <i>Defelxiones verticales, Pitra Pave® vs GiD®</i> .....	30
Figura 17. <i>Variación del cambio de inclinación de talud en la deformación vertical</i> .....	33

### **Lista de Apéndices**

Apéndice A. Simulaciones realizadas de ejercicios preliminares.

Apéndice B. Modelación de una estructura típica ejecutada con axisimetría.

Apéndice C. Realización de dos modelos de sección típica.

Apéndice D. Simulación de una sección en terraplén con siete puntos de análisis para dos modelos distintos.

Apéndice E. Realización de ocho modelos, cuatro en sección típica y cuatro en terraplén. Los puntos de análisis fueron en el centro de cada impronta de carga.

Apéndice F. Modelación en 3D de una sección típica y en terraplén.

## Resumen

**Título:** Modelación numérica tridimensional del comportamiento mecánico en estructuras de pavimento flexible para vías terciarias. \*

**Autores:** Jessica Tatiana Garnica Rios, Jorge Andres Cotes Peña. \*\*

**Palabras clave:** simulación numérica de pavimentos flexibles; técnica de elementos finitos; método multicapa elástico; parámetros de diseño estructural; parámetros de análisis estructural.

**Descripción:** El objetivo de este proyecto es evaluar el comportamiento mecánico de estructuras de pavimento flexible a partir de simulaciones numéricas tridimensionales utilizando la técnica de elementos finitos. Inicialmente se ejecutaron 484 simulaciones en Pitra Pave® que emplea la teoría multicapa elástica para corroborar una base de datos, ya existente, esto permitió la identificación de los parámetros de respuesta estructural (deflexiones, deformaciones y esfuerzos) en el desarrollo de simulaciones numéricas. Para la simulación numérica por la técnica de elementos finitos se usaron los programas en conjunto CODE\_BRIGHT® y GID®, las modelaciones representaron diferentes estructuras de pavimento flexible tridimensionales con sección vial típica en terraplén. Las simulaciones permitieron obtener una base de datos con la respuesta mecánica de las estructuras de pavimento evaluando los parámetros de diseño estructural en siete puntos de análisis distintos delimitados por puntos representativos de las improntas de carga del vehículo proyectado. Para futuros trabajos se recomienda evaluar el nivel de sensibilidad ante los cambios de talud y las posibles variaciones cuando se tienen diferentes calidades de subrasantes.

---

\* Modelación numérica tridimensional del comportamiento mecánico en estructuras de pavimento flexible para vías terciarias.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Pregrado. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes. Doctor en Ingeniería. Codirector: Brayán Andres Velásquez Bueno. Estudiante de maestría en ingeniería.

**Abstract**

**Title:** Three-dimensional numerical modeling of the mechanical behavior in flexible pavement structures for low-volume traffic roads. \*

**Authors:** Jessica Tatiana Garnica Rios, Jorge Andres Cotes Peña. \*\*

**Keywords:** numerical simulation of flexible pavements; finite element technique; elastic multilayer method; structural design parameters; structural analysis parameters.

**Description:** The objective of this project is to evaluate the mechanical behavior of flexible pavement structures from three-dimensional numerical simulations using the finite element technique. Initially, 484 simulations were run in Pitra Pave® which uses the elastic multilayer theory to allow the identification of the structural response parameters (deflections, strains, and stress) in the development of numerical simulations. For the numerical simulation by the finite element technique, the programs CODE\_BRIGTH® and GiD® were used together, the modeling represented different three-dimensional flexible pavement structures with typical roadway sections in embankment. The simulations allowed obtaining a database with the mechanical response of the pavement structures by evaluating the structural design parameters at seven different analysis points delimited by representative points of the projected vehicle tires. For future work, it is recommended to evaluate the level of sensitivity to slope changes and possible variations with different subgrade qualities.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes. Engineering doctor. Codirector: Brayán Andres Velásquez Bueno. Master's student in Engineering.

## Introducción

La infraestructura vial en Colombia está conformada por vías primarias, secundarias y terciarias que funcionan de manera articulada para garantizar la mayor conectividad posible entre las diferentes veredas, centros poblados y/o municipios que conforman el país. Para el 2022, el 70% de la malla vial colombiana estaba conformada por vías terciarias (SAI, 2022), las cuales, no se encuentran en óptimas condiciones estructurales. Estas vías poseen una relevancia significativa, ya que constituyen un motor impulsor para el desarrollo económico local (Ospina, 2016). Esto se debe principalmente a que por ellas transita la mayor parte de los productos alimenticios que son comercializados en los centros de abasto de distintos tamaños, llegando finalmente al consumidor. El mal estado de las vías terciarias representa un impacto económico en el país y también en los productores (Murillo, 2017) debido a que se dificulta el transporte del alimento hasta el punto de distribución donde, por último, será transportado a las diferentes zonas de Colombia y en términos económicos si la demanda de dichos productos excede la oferta trae como consecuencia el aumento de los precios de los alimentos.

El Instituto Nacional de Vías (INVIAS) es la entidad que tiene como objeto la ejecución de las políticas, estrategias, planes, programas y proyectos de la infraestructura no concesionada de la Red Vial Nacional de carreteras primaria y terciaria del país (INVIAS, s.f.). Sin embargo, a INVIAS le resulta difícil acaparar todas las problemáticas en la red vial terciaria una vez ejecutados los proyectos en dichas zonas de difícil acceso. Desde una perspectiva de modelado, se puede contribuir al mejoramiento de estas vías de bajo volumen de tráfico al proyectar casos de diseño. El modelado es comúnmente realizado por herramientas que emplean la teoría multicapa elástica lineal (MEL). Programas como Elsym5® (Ahlborn, 1972), Depav® (Vásquez, 2018) o Pitra Pave® permiten analizar estructuras de pavimento flexible a través de la obtención de información sobre

algunos parámetros de respuesta estructural como deformaciones y deflexiones ante determinadas cargas y condiciones de una estructura (PITRA – PAVE, s.f.).

Sistemas de modelación más complejos donde emplean técnicas de solución robustas como el método de elementos finitos (MEF) permiten analizar estructuras de pavimento en condiciones más aproximadas a las de servicio, simulando condiciones de carga y propiedades semejantes a las reales, con el fin de predecir las respuestas mecánicas, hidromecánicas e incluso termo hidromecánicas de la estructura (Arab et al., 2020). Este método considera características aproximadas de campo como la geometría y discontinuidades de la estructura, cargas, condiciones de frontera y modelos constitutivos realistas de materiales (Vargas&Acevedo, 2019).

Ante esto, surge la propuesta de explorar la obtención de parámetros de respuesta estructural de los pavimentos flexibles mediante modelación numérica a través de la MEL con el programa Pitra Pave® comúnmente usado por los diseñadores de pavimentos. Este programa proporciona una buena aproximación en cada simulación numérica que representa estructuras de pavimento flexible (Páez, s.f.). Para poder llevar a cabo las simulaciones se hizo necesario el software CODE\_BRIGHT® (Code bright, 2017), el cual, es un programa que usa el MEF y proporciona la solución al modelo constitutivo del modelo mecánico de respuesta estructural. Las modelaciones tridimensionales se realizaron con el MEF mediante el pre/post procesador universal llamado GiD® (GiD, 2021). GiD® es adaptable y fácil de usar para simulaciones numéricas en ciencia e ingeniería, capaz de cubrir todas las necesidades comunes en el campo de las simulaciones numéricas (Caro&Caicedo, 2017). Este proyecto apoyó una investigación que analiza los parámetros de respuesta estructural de las estructuras de pavimento flexible al ser sometidas a esfuerzos. Se realizaron 484 simulaciones numéricas con la técnica MEL y 5184 con la técnica

MEF, de estas cuales se evaluaron 320 en la obtención de información sobre los parámetros de respuesta estructural en términos de deflexión (desplazamiento vertical total) y deformaciones tanto verticales como horizontales de las estructuras.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo General**

Evaluar el comportamiento mecánico de estructuras de pavimento a partir de simulaciones numéricas tridimensionales utilizando la técnica de elementos finitos.

### **1.2. Objetivos Específicos**

Evaluar la influencia del número de elementos y condiciones de frontera en los parámetros de diseño en un modelo tridimensional de referencia de pavimento flexible.

Comparar la influencia de los espesores de capa de una estructura convencional de pavimento flexible determinada por los parámetros de diseño estructural.

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

## 2. Metodología

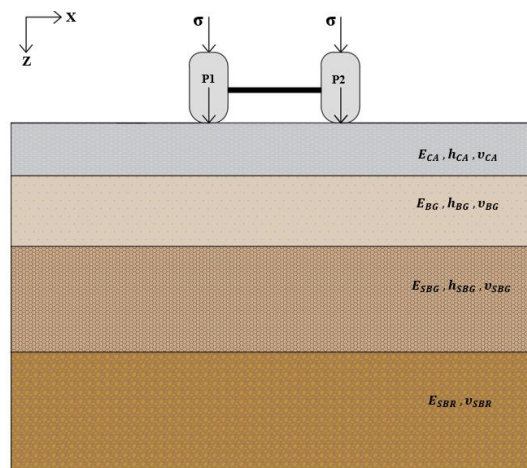
### 2.1. Modelación de pavimentos en programa multicapa elástico

Las simulaciones se realizaron usando el programa Pitra Pave®, y se corroboraron valores obtenidos para 108 estructuras de pavimento modeladas en investigaciones anteriores (Páez, s.f.). Por otro lado, se amplió la base de datos a 484 simulaciones; parte de esta información fue tratada posteriormente para el desarrollo de una red neuronal multi-predictiva (Velásquez et al., s.f.).

Las simulaciones numéricas realizadas en el programa Pitra Pave® fueron parametrizadas de acuerdo con las variables de diseño como módulos de elasticidad ( $E$ ) y espesores ( $h$ ). La Figura 1 muestra la estructura de pavimento flexible típica, que se encuentra compuesta por tres capas estructurales y la subrasante (SBR): concreto asfáltico (CA), base granular (BG), subbase granular (SBG). Algunas otras variables de diseño se mantuvieron constantes como la relación de Poisson ( $\nu$ ), separación entre llantas (improntas), módulo de elasticidad de la subrasante, la carga del neumático ( $P$ ), la presión de contacto entre el neumático y el pavimento ( $\sigma$ ) y el radio del área de carga ( $r$ ). Por su parte, el espesor de la subrasante el programa lo establece como infinito.

**Figura 1.**

*Estructura de pavimento flexible típica.*



En la Tabla 1 se introducen los valores de espesores, módulo de elasticidad y relación de Poisson de las capas del pavimento.

**Tabla 1.**

*Propiedades y geometría de las capas del pavimento.*

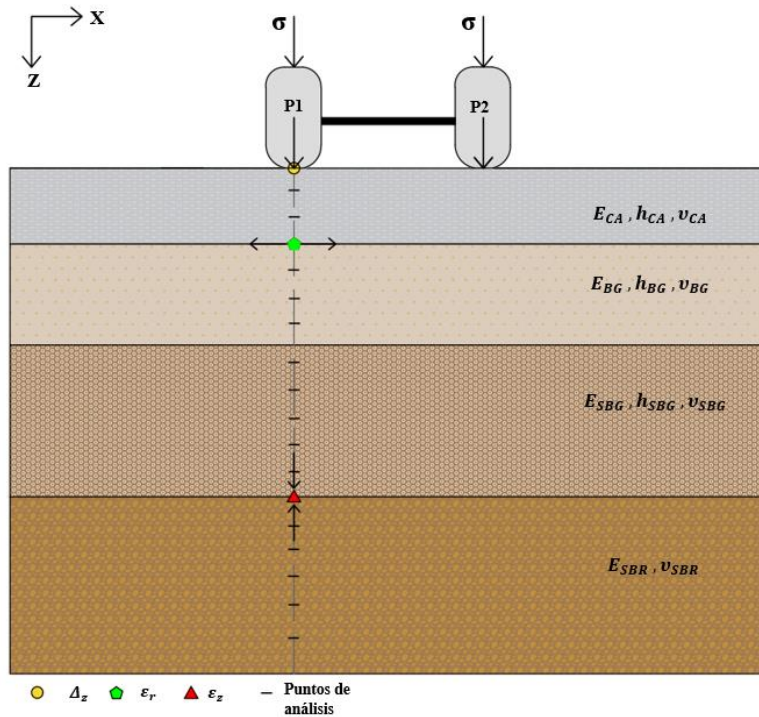
	<b>CA</b>	<b>BG</b>	<b>SBG</b>	<b>SBR</b>
<b>H [m]</b>	0.10	0.25	0.25	-*
	0.07	0.20	0.20	-*
	0.05	0.15	0.15	-*
	0.03	0.10	0.10	-*
<b>E [MPa]</b>	3250	250	200	
	2500	200	150	80
	1500	150	100	
<b>v</b>	0.30	0.35	0.35	0.35

**Nota.** \* El espesor considerado por Pitra Pave® para la capa de SBR es de tamaño semi-infinito.

Para cada estructura, se definieron puntos en profundidad, como se muestra en la Figura 2, que representan los parámetros de análisis estructural evaluados para cada simulación. Se determinaron 5 puntos en cada una de las capas del pavimento (CA, BG, SBG) y los puntos restantes en la capa de SBR hasta completar un metro de profundidad y un total de 25 puntos de análisis en cada modelo. Entre estos puntos, también se encuentran los parámetros de diseño estructural tal como la deflexión en la superficie del CA ( $\Delta_z$ ), deformación unitaria horizontal medida en el fondo del CA ( $\epsilon_r$ ) y la deformación vertical medida en la parte superior de la SBR ( $\epsilon_z$ ).

**Figura 2.**

*Parámetros de análisis y diseño estructural.*

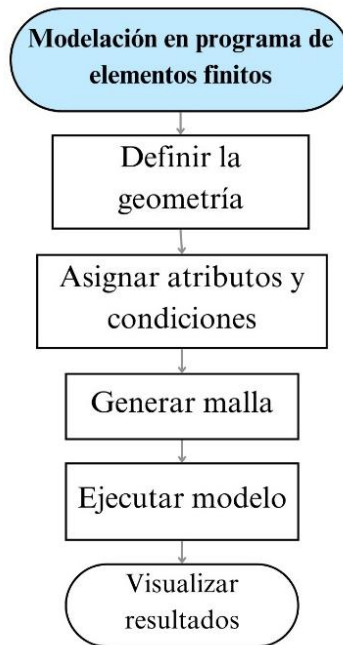


## 2.2. Modelación de pavimento en programa de elementos finitos

Para la modelación se usó el software CODE\_BRIGHT® como alternativa de solución y el software GiD® como preprocesador y postprocesador de la información. Esta colaboración de software's permitieron una aproximación a la respuesta estructural del pavimento para las estructuras de pavimento flexible simuladas. El proceso de modelación se inició con una capacitación sobre el manejo de los programas, de tal manera, que como lo muestra la Figura 3 se comprendiera metodología del proceso de la simulación.

**Figura 3.**

*Metodología de proceso de simulación.*



**2.3. Modelo de referencia y parámetros de diseño estructural**

En la Tabla 2 se presentan los valores de espesores y módulos de elasticidad de las capas estructurales del pavimento para las diferentes combinaciones de modelado.

**Tabla 2.**

*Propiedades y espesores para elementos finitos.*

	<b>CA</b>	<b>BG</b>	<b>SBG</b>	<b>SBR</b>
<b>H [m]</b>	[0.10,	[0.25,	[0.25,	-*
	0.07,	0.20,	0.20,	-*
	0.05,	0.15,	0.15,	-*
	0.03]	0.10]	0.10]	-*
<b>E [MPa]</b>	[3250,	[250,	[200,	
	2500,	200,	150,	80
	1500]	150]	100]	

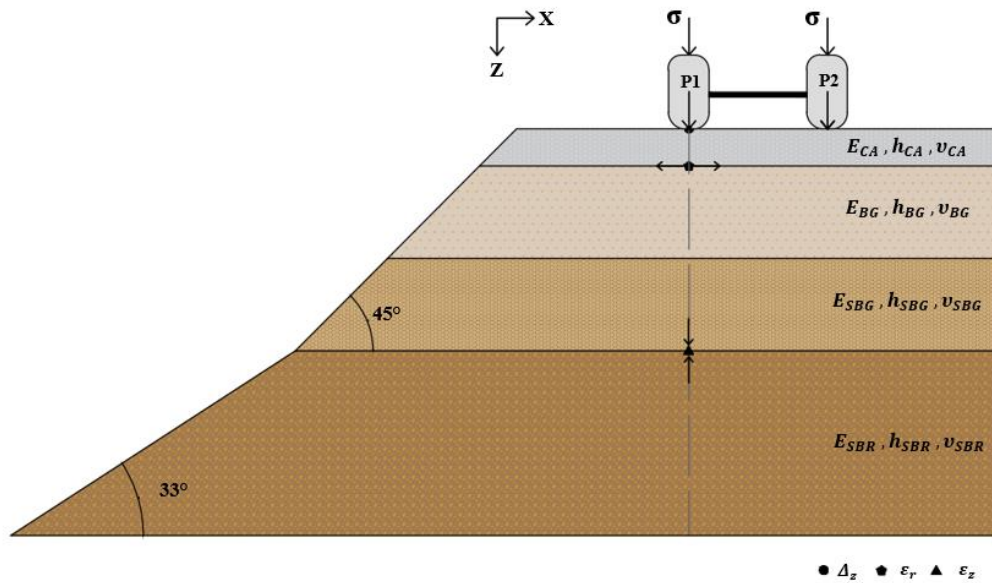
**Nota.** \*Los valores de espesores en la SBR corresponde a la altura faltante para completar los 4.9 metros de altura.

El procedimiento de cálculo fue:  $h_{SBR} = 4.9 - h_{CA} - h_{BG} - h_{SBG}$

La Figura 4 muestra el modelo estructural definido para el estudio que estuvo comprendido por un modelo tridimensional con sección vial típica en terraplén de pavimento flexible. Las estructuras tuvieron una altura estándar de 4.9 metros y estuvo constituida por tres capas estructurales (CA, BG, SBG) y la subrasante (SBR), en donde sus primeras tres capas tienen una relación de talud 1:1, es decir, un ángulo de 45° y la última capa que corresponde a la SBR, la cual, tiene un ángulo de 33° con respecto a la horizontal que permanecerá constante durante el desarrollo del proyecto. Dichas capas están sometidas a esfuerzos debido a la acción de un eje sencillo de rueda doble que aplica un esfuerzo de 0.562 MPa.

**Figura 4.**

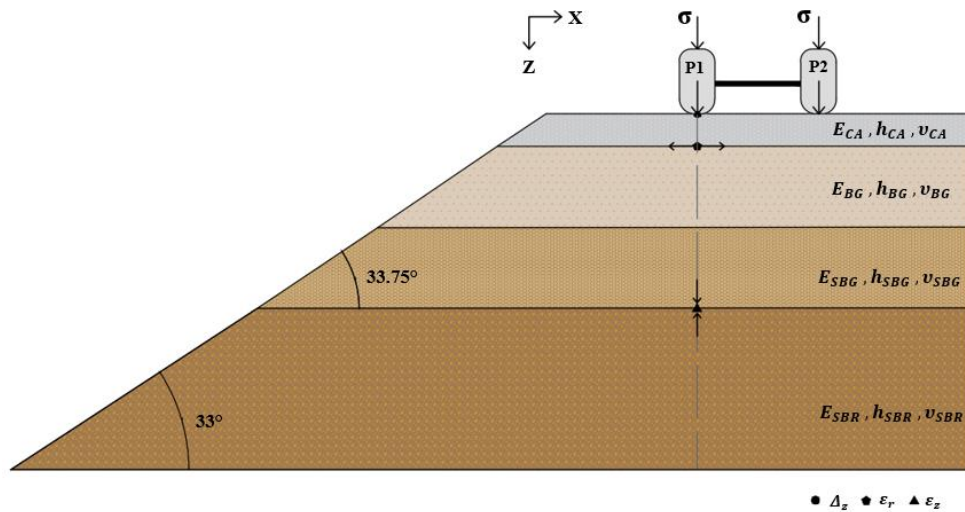
*Modelo estructural de referencia: caso A.*



La Figura 5 y 6 muestra dos variaciones con respecto al modelo de referencia presentado en la figura anterior y radica en el cambio del ángulo de inclinación del talud superior y se modelan con relaciones de 1:0.75 (caso B) y 1:0.5 (caso C) respectivamente.

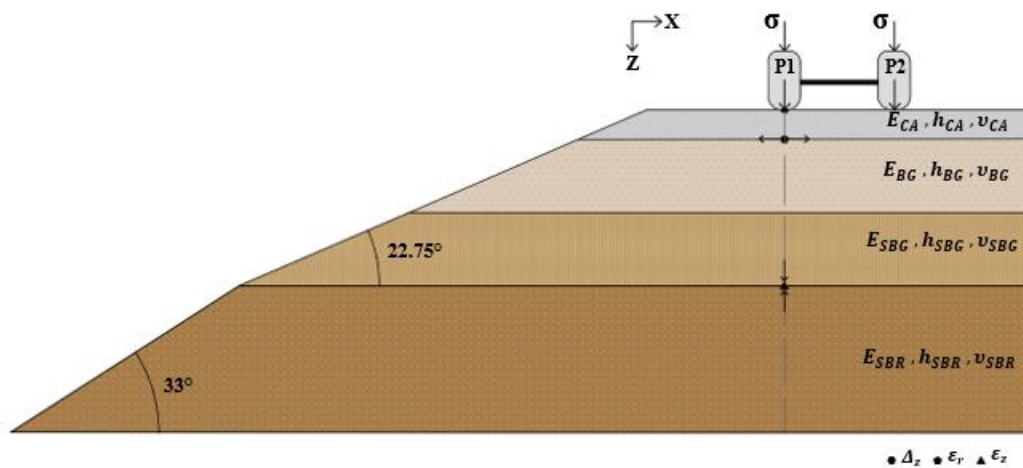
**Figura 5.**

*Estructura de pavimento modelada: caso B.*



**Figura 6.**

*Estructura de pavimento modelada: caso C.*



Definidos los modelos de referencia, se establecen los parámetros de diseño estructural que permitirán evaluar la respuesta mecánica del pavimento en la superficie del CA, de la BG y de la SBR como se representa en la Figura 4.

La obtención de las respuestas se realizó mediante una automatización en Visual Studio Code® que fue proporcionada por el proyecto de investigación en desarrollo.

### 3. Resultados

Debido a la cantidad de información recolectada, se seleccionó un modelo tipo de estructura o de referencia, para presentar los resultados obtenidos en los modelos de Pitra Pave® y otra estructura de referencia para los realizados con CODE\_BRIGTH® y GiD®. La información de los modelos ejecutados en cada uno de estos softwares se encuentra organizada en una base de datos en el siguiente enlace: [https://drive.google.com/drive/folders/1ZGEP7QH02JPdHYzOJ2oB5s1CzyAbxEOW?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/1ZGEP7QH02JPdHYzOJ2oB5s1CzyAbxEOW?usp=drive_link).

La base de datos de Pitra Pave® contiene todos los resultados de la respuesta estructural del pavimento bajo diferentes condiciones de espesor y propiedades en cada una de las capas de la estructura. La información obtenida permite hacer un seguimiento en los parámetros de diseño estructural: la deflexión superficial ( $\Delta_z$ ), deformación por tracción actuante en el fondo del CA ( $\epsilon_r$ ) y deformación vertical de compresión actuante sobre la parte superior de la SBR ( $\epsilon_z$ ). Por otro lado, la base de datos de los programas CODE\_BRIGTH® y GiD® contiene únicamente información de los parámetros de diseño estructural para todos los modelos ejecutados.

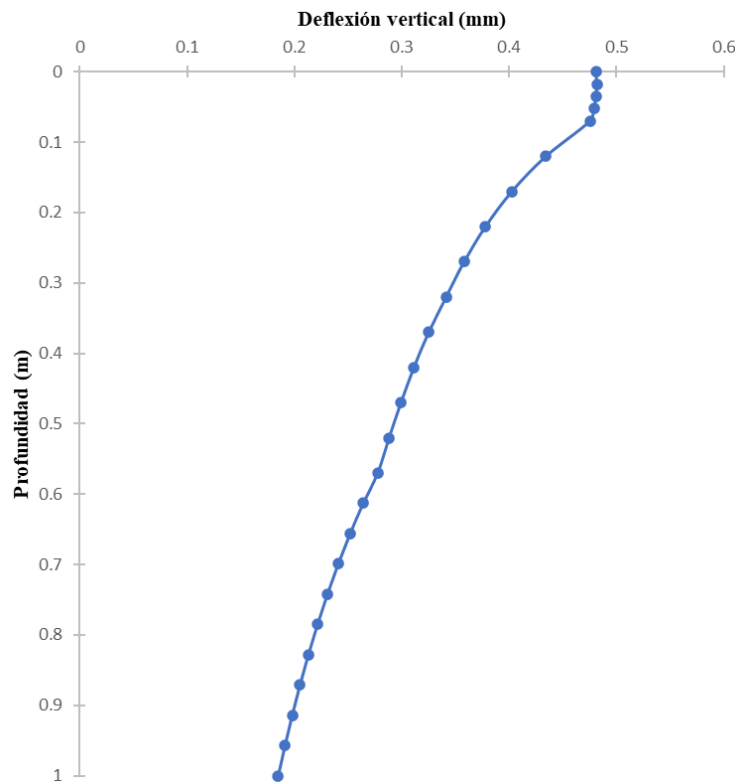
#### 3.1. Modelación de pavimentos flexibles en programa multicapa elástico

Los datos evaluados de las simulaciones realizadas en Pitra Pave® se extrajeron en una hoja de Excel® por cada estructura, donde se pretende conocer el valor de deflexión vertical en cada uno de los puntos de análisis estructural. En la Figura 7 se muestra la representación gráfica de los resultados para el modelo de referencia seleccionado que corresponde al *modelo244* dentro

de la base de datos y tiene las siguientes geometrías y propiedades:  $h_{CA} = 0.07$  m,  $E_{CA} = 3250$  MPa,  $h_{BG} = 0.25$  m,  $E_{BG} = 250$  MPa,  $h_{SBG} = 0.25$  m,  $E_{SBG} = 200$  MPa.

**Figura 7.**

*Deflexión vertical para una estructura de pavimento simulada.*



En total se realizaron 484 modelos que permitieron ampliar la base de datos del respectivo proyecto de investigación.

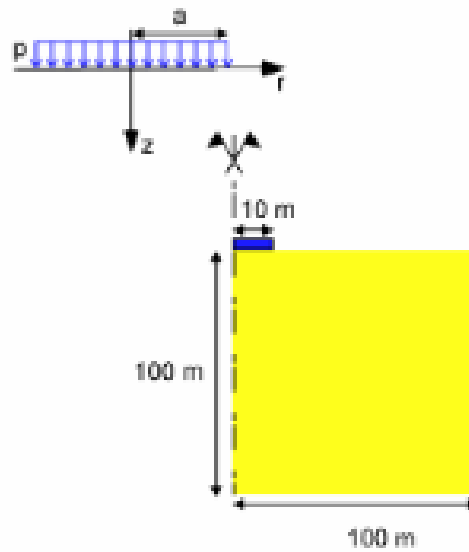
### 3.2. Modelación de pavimentos flexibles en programa de elementos finitos

En la Figura 8, se presenta uno de los modelos preliminares realizados, el cual, tuvo como finalidad comparar las diferencias porcentuales entre los resultados del modelo tutorial y los obtenidos en este estudio, tal como se muestra en la Tabla 3, teniendo como resultado que para los valores máximos los porcentajes de variación son menores al 6%, mientras que para los valores

mínimos se observaron diferencias hasta de dos órdenes de magnitud, lo cual puede estar relacionado a la capacidad computacional de los equipos de cálculo.

**Figura 8.**

*Modelo preliminar.*

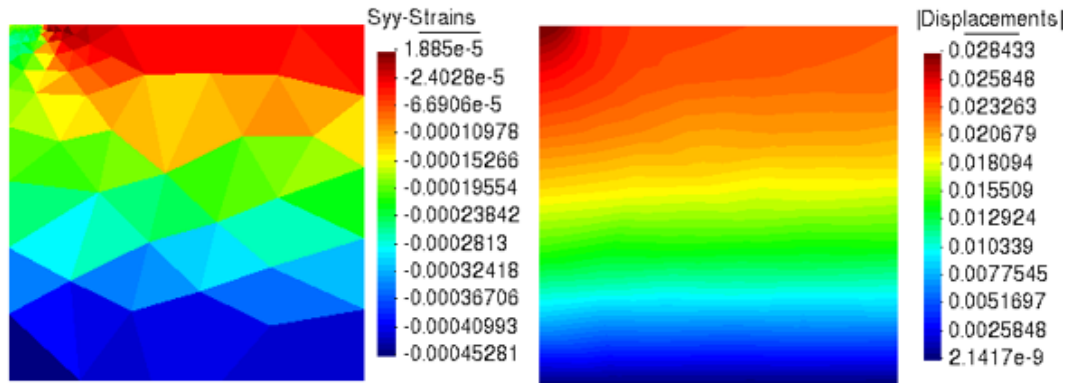


**Nota.** Recuperado de Code Bright 2022 Tutorial Manual.

En la Figura 9, se observa la representación gráfica en GID de los esfuerzos y desplazamientos a lo largo de la profundidad de la estructura de pavimento.

**Figura 9.**

*Simulación modelo preliminar.*



**Tabla 3.**

*Resultados ejercicio preliminar.*

		Modelo Tutorial	Prueba 1	% variación	Prueba 2	% variación
Syy - Stresses	Máx	1.7217	1.8057	4.879	1.8079	5.007
	Mín	0.0013	0.0043	232.107	0.0043	232.489
Desplazamientos	Máx	0.0285	0.0284	0.319	0.0284	0.266
	Mín	2.22E-09	2.14E-09	3.438	8.79E-07	39552.558

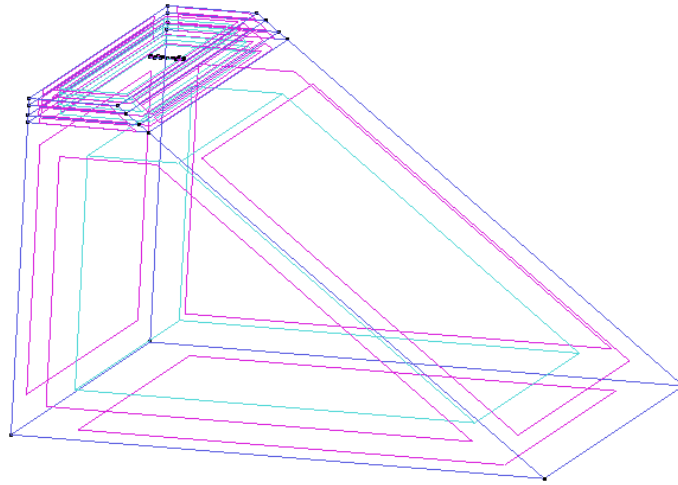
En el Anexo A se podrán encontrar las demás simulaciones realizadas durante la capacitación.

### 3.2.1. Modelo estructural de referencia

La estructura seleccionada como modelo estructural de referencia corresponde al *modelo 1* de la sección en terraplén caso A, que tiene cuenta con los siguientes espesores y propiedades de capa:  $h_{CA} = 0.1$  m,  $E_{CA} = 3250$  MPa,  $h_{BG} = 0.25$  m,  $E_{BG} = 250$  MPa,  $h_{SBG} = 0.25$  m,  $E_{SBG} = 200$  MPa. En la Figura 10 se presenta el modelo tridimensional de la estructura y en la Figura 11 se muestran los respectivos puntos de análisis.

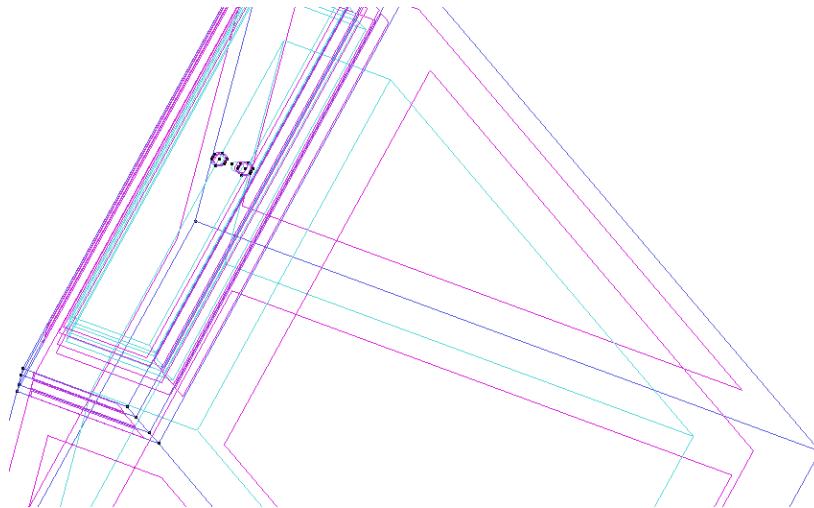
**Figura 10.**

*Modelo 1 tridimensional.*



**Figura 11.**

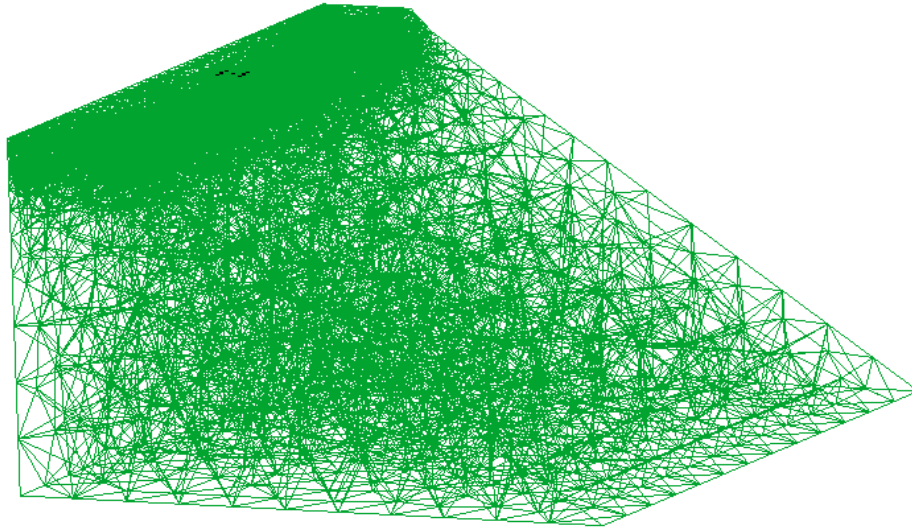
*Puntos de análisis del modelo 1.*



En la Figura 12, se muestra la simulación denotada como *modelo 1 de la geometría 1 del caso A* con una malla generada, es decir, se encuentra en preproceso.

**Figura 12.**

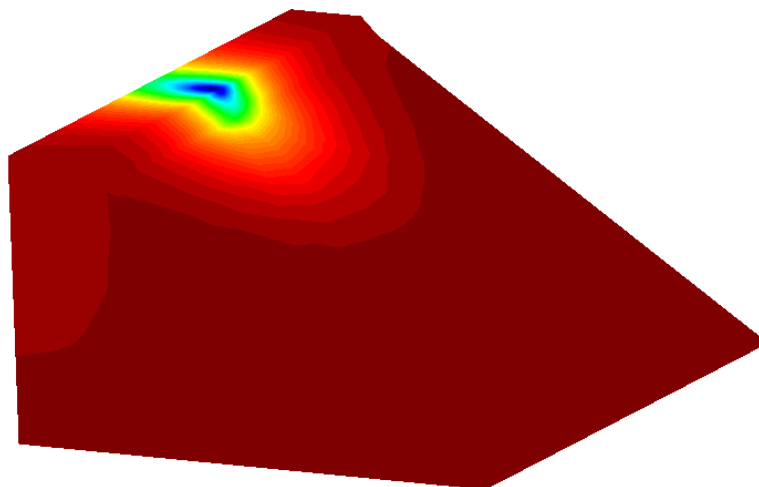
*Preproceso del modelo 1, geometría 1, caso A.*



En la Figura 13, se presenta el modelo descrito anteriormente, con la diferencia, que se encuentra en post proceso. En dicha imagen, se evidencia el desplazamiento vertical que sufrió la estructura de pavimento.

**Figura 13.**

*Postproceso del modelo 1, geometría 1, caso A.*



**3.2.2. Influencia de parámetros en el preproceso**

Para definir el tamaño de la malla en los modelos finales se optó por realizar un análisis de convergencia sobre el modelo estructural de referencia modificando el tamaño de elementos finitos. El análisis se realizó desde un tamaño de elemento igual a 0.35 m que fue el tamaño mínimo con el cual el programa de MEF encontraba convergencia de solución para el modelo constitutivo hasta el valor que superaba el margen de error admisible como se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4.**

*Análisis de convergencia.*

Tamaño elementos finitos (m)	# elementos	Deflexión superficial (m)	Tiempo		% Variación
			min	horas	
0.35	69745	0.0004282	469.93	7.83216667	0.00000%
0.4	50735	0.0004091	412.84	6.88058333	4.45270%
0.5	32338	0.0003971	64.06	1.067625	7.25819%
0.65	23959	0.0004167	41.57	0.69290833	2.67543%
<b>0.8</b>	<b>20461</b>	<b>0.0004128</b>	<b>39.57</b>	<b>0.65946944</b>	<b>3.58715%</b>
0.9	19155	0.0004117	40.80	0.67998611	3.83813%
1	18449	0.0004066	27.87	0.464475	5.02756%

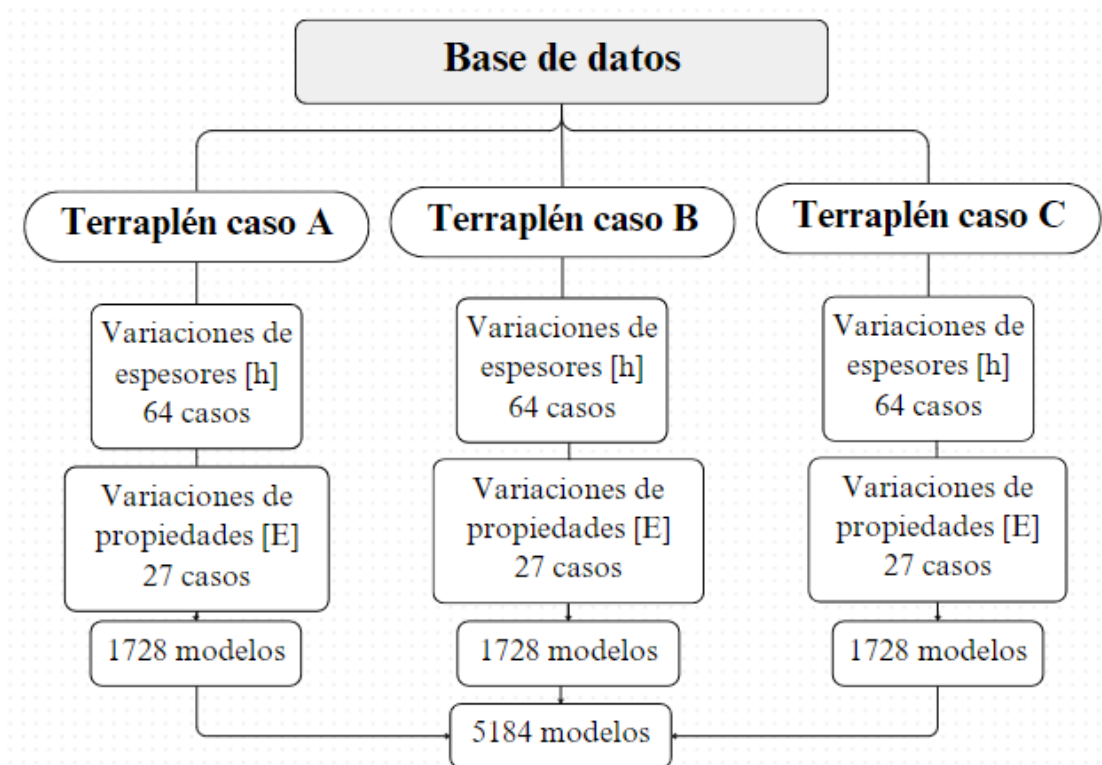
El análisis de convergencia fue realizado con base en la deflexión superficial siendo un parámetro de diseño estructural. De la Tabla 4 se puede observar que el tamaño mínimo para los elementos finitos fue de 0.35 m con una precisión alta, pero, que a su vez representó un mayor tiempo de ejecución. Por esta razón, para el modelo final de replicación se determinó un tamaño de elemento finito de 0.8 m ya que el porcentaje de variación estuvo al rededor del 3.6% y tuvo un menor gasto computacional.

**3.2.3. Simulaciones numéricas mediante MEF**

En la Figura 14 se presenta la consolidación de 5.184 simulaciones que constituyen la base de datos de modelaciones numéricas con el MEF. Las modelaciones se procesaron para la determinación de los parámetros de diseño estructural de cada estructura de pavimento flexible. En cada caso geométrico de talud expuesto en las Figuras 4, 5 y 6 se determinaron 1.728 modelos resultantes de combinaciones entre variables de diseño como módulos de elasticidad y espesores de las capas de la estructura.

**Figura 14.**

*Simulaciones numéricas mediante MEF.*

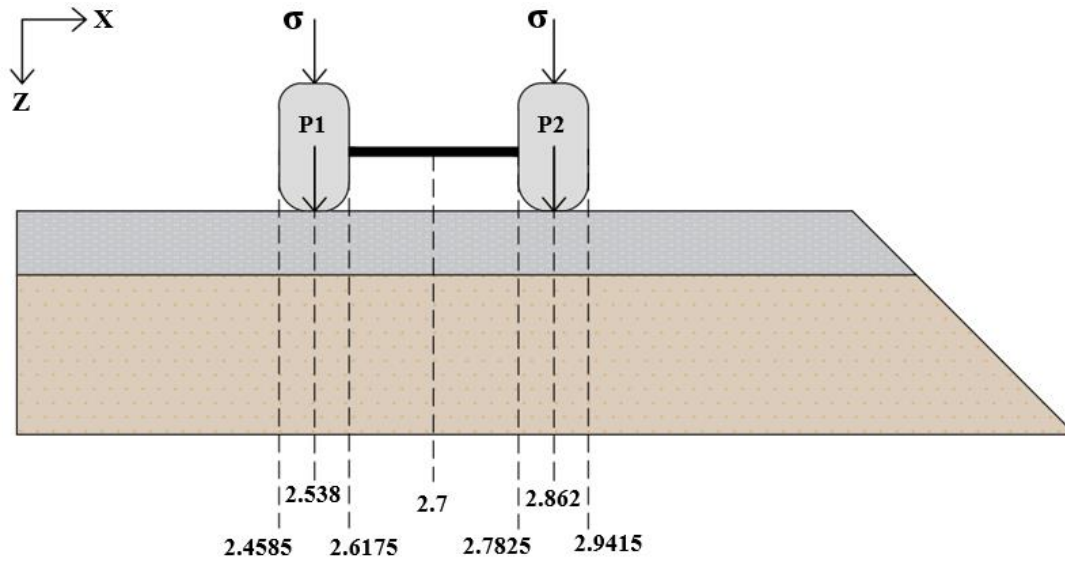


Se designaron algunos puntos que corresponden a los parámetros de diseño estructural donde probablemente la respuesta es más crítica, tales como: los extremos de las improntas de

carga, la mitad de estas y la mitad del eje de las improntas de carga como se muestra en la Figura 15, permitiendo evaluar el comportamiento del pavimento al ser sometido a esfuerzos.

**Figura 15.**

*Puntos de análisis.*



La extracción de datos para los parámetros de diseño estructural se realizó para un modelo por cada geometría en el caso A y, para el caso B y C se hizo para dos modelos por geometría.

En la Tabla 5, se encuentran los resultados obtenidos para el *modelo 1* del caso A, que tiene como espesores y propiedades de capa:  $h_{CA} = 0.1$  m,  $E_{CA} = 3250$  MPa,  $h_{BG} = 0.25$  m,  $E_{BG} = 250$  MPa,  $h_{SBG} = 0.25$  m,  $E_{SBG} = 200$  MPa.

**Tabla 5.**

*Resultados de los parámetros de diseño estructural, Modelo 1 - caso A.*

Puntos de análisis [m]	2.4585	2.538	2.6175	2.7	2.7825	2.862	2.9415
$\Delta_z$	0.000281	0.000296	0.000300	0.000302	0.000309	<b>0.000314</b>	0.000305
$\epsilon_r$	0.000097	<b>0.000099</b>	0.000098	0.000097	0.000097	0.000096	0.000095
$\epsilon_z$	0.000006	0.000008	0.000009	0.000015	0.000019	<b>0.000024</b>	0.000021

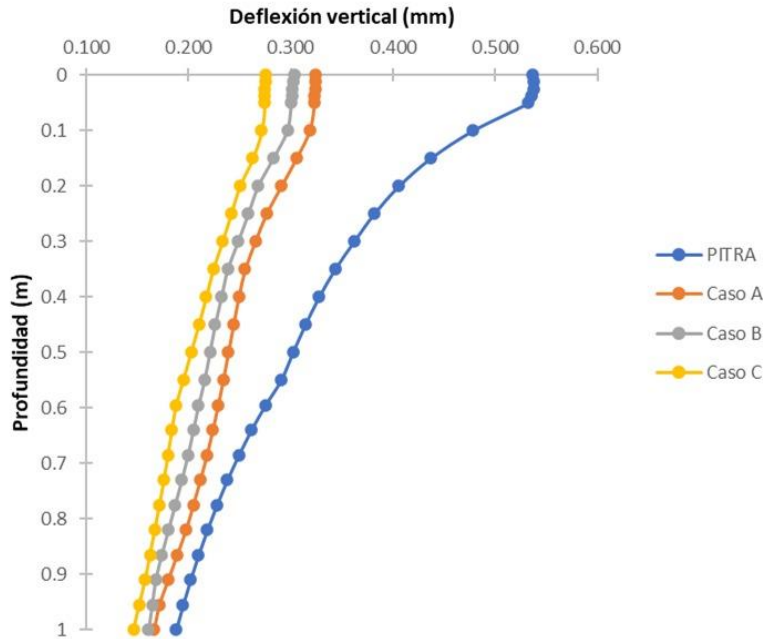
### 3.2.4. Comparación de las deflexiones verticales entre Pitra Pave® y GiD®

Ejecutados los modelos tridimensionales en GiD®, se obtienen las deflexiones verticales en el extremo de la impronta de carga más cercana al borde del talud para el *modelo 865* en cada uno de los casos (Caso A, B y C), el cual se escogió aleatoriamente como modelo de referencia con el fin de comparar los valores con los obtenidos en Pitra Pave®. El modelo a comparar tiene las siguientes propiedades y espesores en las capas:  $h_{CA} = 0.05$  m,  $E_{CA} = 3250$  MPa,  $h_{BG} = 0.25$  m,  $E_{BG} = 250$  MPa,  $h_{SBG} = 0.25$  m,  $E_{SBG} = 200$  MPa.

En la Figura 16 se presenta una gráfica con las deflexiones verticales obtenidas tanto en Pitra Pave® como en cada uno de los casos. Los resultados sugieren que el modelo de elementos finitos 3D presenta un perfil de deflexiones menores a los calculados por PITRA. Probablemente asociado a la influencia de la geometría y aproximación en la solución del problema mecánico.

**Figura 16.**

*Deflexiones verticales, Pitra Pave® vs GiD®.*



### 3.2.5. Influencia de espesores de capa

Para la evaluación de la influencia de los espesores de las capas del pavimento se tomó el cálculo del porcentaje de variación con base en el modelo estructural de referencia, cuyos resultados se encuentran en la Tabla 5. El cálculo fue realizado para los tres parámetros de diseño estructural quedando demostradas las diferencias significativas entre los diferentes modelos como se muestra en la Tabla 6, 7 y 8.

**Tabla 6.**

*Influencia de espesores en la deflexión superficial.*

Deflexión superficial						
Caso	# modelo	$h_{CA}$ [m]	$h_{BG}$ [m]	$h_{SBG}$ [m]	Punto crítico [m]	% variación
A	1	0.10	0.25	0.25	0.000314	0%
	1243	0.05	0.10	0.15	0.000383	22%
	1702	0.03	0.10	0.10	0.000395	26%
	487	0.07	0.25	0.15	0.000443	41%
B	1	0.10	0.25	0.25	0.000274	0%
	1566	0.03	0.15	0.20	0.000529	93%
	1620	0.03	0.15	0.10	0.000537	96%
	1701	0.03	0.10	0.15	0.000549	101%
C	1	0.10	0.25	0.25	0.000283	0%
	1647	0.03	0.10	0.25	0.000500	77%
	1648	0.03	0.10	0.25	0.000500	77%
	1674	0.03	0.10	0.20	0.000500	77%

**Tabla 7.**

*Influencia de los espesores en la deformación unitaria vertical en el fondo del CA.*

Deformación unitaria vertical						
Caso	# modelo	$h_{CA}$ [m]	$h_{BG}$ [m]	$h_{SBG}$ [m]	Punto crítico [m]	% variación
A	1	0.10	0.25	0.25	0.000099	0%
	1243	0.05	0.10	0.15	0.000241	144%
	595	0.07	0.20	0.15	0.000257	160%
	1702	0.03	0.10	0.10	0.000270	174%
B	1	0.10	0.25	0.25	0.000083	0%
	1296	0.05	0.10	0.10	0.000314	277%
	1620	0.03	0.15	0.10	0.000333	300%
	1701	0.03	0.10	0.15	0.000393	372%
C	1	0.10	0.25	0.25	0.000091	0%
	1648	0.03	0.10	0.25	0.000305	235%
	1674	0.03	0.10	0.20	0.000305	235%
	1701	0.03	0.10	0.15	0.000317	248%

**Tabla 8.**

*Influencia de los espesores en la deformación unitaria horizontal en la parte superior de la SBR.*

Deformación unitaria horizontal						
Caso	# modelo	$h_{CA}$ [m]	$h_{BG}$ [m]	$h_{SBG}$ [m]	Punto crítico [m]	% variación
A	1	0.10	0.25	0.25	0.000024	0%
	1378	0.03	0.25	0.10	0.000013	45%
	1351	0.03	0.25	0.15	0.000013	46%
	1621	0.03	0.10	0.25	0.000012	48%
B	1	0.10	0.25	0.25	0.000014	0%
	1026	0.05	0.20	0.20	0.000042	197%
	1161	0.05	0.15	0.15	0.000042	191%
	1242	0.05	0.10	0.20	0.000044	206%
C	1	0.10	0.25	0.25	0.000019	0%
	1593	0.03	0.10	0.25	0.000079	324%
	1620	0.03	0.10	0.25	0.000081	330%
	1701	0.03	0.10	0.20	0.000093	398%

**3.2.6. Influencia del cambio de inclinación en las capas estructurales del pavimento**

La evaluación de la influencia en la variación de la pendiente en las capas estructurales del pavimento (CA, BG, y SBG) se hizo para los tres casos de estudio tomando como referencia el primer modelo de cada caso (caso A, B y C). En la Figura 17 se muestra cómo varía la deformación vertical en cada uno de los puntos de análisis mostrados en la Figura 15 para los tres casos, demostrando que el cambio de inclinación en la estructura de pavimento si genera cambios en la respuesta.

**Figura 17.**

*Variación del cambio de inclinación de talud en la deformación vertical.*



### 3.2.7. Influencia de la geometría en las deflexiones

La variación de la geometría entre los distintos modelos permitió evaluar la influencia de esta, entre las deflexiones de los extremos de la impronta de carga más cercana al borde del talud. En la Tabla 9 y 10, se presenta la comparación de cómo se ve afectada la respuesta de la estructura ante el cambio de espesores de las capas.

**Tabla 9.**

*Influencia de la geometría en el punto de análisis externo de la impronta de carga más cercana al borde del talud.*

Punto de análisis externo					
# modelo	$h_{CA}$ [m]	$h_{BG}$ [m]	$h_{SBG}$ [m]	Punto de análisis [m]	% variación
1	0,1	0,25	0,25	0.000305	0%
406	0,1	0,1	0,1	0.000317	4%
433	0,07	0,25	0,25	0.000315	3%
838	0,07	0,1	0,1	0.000332	9%
865	0,05	0,25	0,25	0.000325	7%
1270	0,05	0,1	0,1	0.000343	12%
1297	0,03	0,25	0,25	0.000321	5%
1702	0,03	0,1	0,1	0.000390	28%

**Tabla 10.**

*Influencia de la geometría en el punto de análisis interno de la impronta de carga más cercana al borde del talud.*

Punto de análisis interno					
# modelo	$h_{CA}$ [m]	$h_{BG}$ [m]	$h_{SBG}$ [m]	Punto de análisis [m]	% variación
1	0,1	0,25	0,25	0.000309	0%
406	0,1	0,1	0,1	0.000321	4%
433	0,07	0,25	0,25	0.000320	4%
838	0,07	0,1	0,1	0.000337	9%
865	0,05	0,25	0,25	0.000331	7%
1270	0,05	0,1	0,1	0.000346	12%
1297	0,03	0,25	0,25	0.000320	4%
1702	0,03	0,1	0,1	0.000380	23%

#### 4. Conclusiones

El estudio permitió evaluar la influencia de los espesores de una estructura de pavimento flexible sobre los parámetros de diseño estructural demostrando que los espesores de las capas estructurales son elementos importantes que afectan la capacidad de carga del pavimento y generan variaciones en la respuesta mecánica lo que puede conllevar a que el rendimiento del pavimento se vea afectado.

Con los distintos puntos de análisis evaluados se evidenció que la respuesta más crítica con respecto al parámetro de deflexión era común en la mayoría de los distintos modelos y correspondió a la mitad de la impronta de carga más cercana al borde del talud. Sin embargo, para los demás parámetros de diseño no era común el punto más crítico, por lo tanto, se debe evaluar para cada una de las estructuras cual es el punto más crítico ya que, ante el cambio de geometría (espesores y ángulo de inclinación en el talud) y la variación en propiedades de las capas influyen en la respuesta.

Se evidenció que la variable más crítica corresponde al cambio de espesor en las capas del pavimento, ya que presentó un mayor porcentaje de variación y de esta forma, se demostró también que el tener menores espesores en las capas subyacentes del CA cambian significativamente la respuesta mecánica de la estructura. Por otro lado, se observó que, aunque en las estructuras el cambio de pendiente generó variaciones, su comportamiento mecánico seguía siendo similar.

Comparada la respuesta de la deformación vertical entre GiD® y Pitra Pave® se puede visualizar que los resultados en los puntos cercanos a la superficie tienen una ligera diferencia, sin embargo, a medida que se aumenta en profundidad los valores tienden a ser muy parecidos entre sí.

El enfoque de la simulación numérica permite analizar las estructuras de pavimento flexible de una manera más sencilla, permitiendo así, optimizar el tiempo en el que se puede obtener la respuesta del pavimento y contribuir con el diseño o análisis de la infraestructura vial. Aunque las modelaciones generan un gasto computacional considerable, este proyecto demostró que se justifica el costo ya que al trabajar en las estructuras con un tamaño de elementos de 0.8 para la conformación del enmallado permitió realizar modelaciones sin un alto impacto en la precisión de los resultados. Finalmente, es importante resaltar que estas modelaciones permiten una aproximación a la realidad, sin embargo, existieron variables (como térmicas e hidráulicas) que no permiten la obtención de resultados exactos comparados con la vida real.

## **5. Recomendaciones**

Para futuros trabajos se recomienda evaluar el nivel de sensibilidad ante los cambios de talud y las posibles variaciones cuando se tienen diferentes calidades de subrasantes.

### Referencias Bibliográficas

- Ahlborn, G., 1972. ELSYM5: Computer program for determining stresses and deformations in five-layer. elastic system. University of California, Berkeley.
- Arab, M. G., Alzara, M., Zeiada, W., Omar, M., & Azam, A. (2020). Combined effect of compaction level and matric suction conditions on flexible pavement performance using construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*, 261(119792). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119792>
- Caro, S., & Caicedo, B. (2017). Tecnologías para vías terciarias: perspectivas y experiencias desde la academia. *Revista de ingeniería*, 45, 12–21. <https://doi.org/10.16924/revinge.45.3>
- Code\_bright. (2017, julio 10). Deca. [https://deca.upc.edu/en/projects/code\\_bright](https://deca.upc.edu/en/projects/code_bright) Extensions, L. M. A. (s/f). Visual Studio Code - code editing. Redefined. Visualstudio.com. Recuperado el 19 de enero de 2024, de <https://code.visualstudio.com/>
- GiD simulation. (2021, junio 29). GiD simulation. <https://www.gidsimulation.com/>
- Las vías terciarias en Colombia - SAI. (2022, mayo 6). Sociedad Antioqueña de Ingenieros y Arquitectos. Obtenido de <https://sai.org.co/las-vias-terciarias-en-colombia>
- Murillo, C. A. (2017). Desafíos para el desarrollo de la red vial terciaria en el posconflicto. *Revista de ingeniería*, 45, 32–39. <https://doi.org/10.16924/revinge.45.5>
- Objetivos y Funciones. (2024, enero 6). Gov.co. <https://www.invias.gov.co/index.php/2->
- Ospina, G. (2016). El papel de las vías secundarias y los caminos vecinales en el desarrollo de Colombia. *Revista de ingeniería*, 0(44), 20. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i44.911>

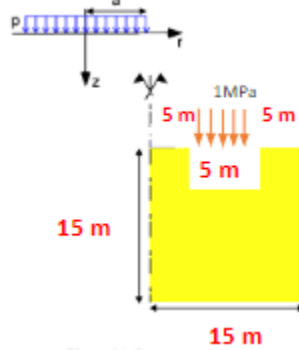
- Páez, M. Análisis de sensibilidad de variables elásticas sobre estructuras de pavimentos conformados por materiales granulares marginales a partir de simulaciones numéricas. Revista de la facultad de Ingenierías Físico Mecánica, 14.
- PITRA-PAVE v1.0.0. (s/f). Ucr.ac.cr. Recuperado el 7 de enero de 2024, de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/component/content/article/147-programas/infraestructura-transporte/apps/362-pitra-pave-v1-0-0>
- Vargas-Díaz, S. A., & Acevedo-Pérez, J.V. (2019, septiembre). Consideraciones para el Análisis de Pavimento Flexible y Rígido Mediante el Elementos Finitos con Aplicaciones de Abaqus. Revista de Tecnología, Volumen 18 (número 2).
- Vásquez Varela, L. R. (2018). WinDEPAV 2.6 con DosBOX 0.74. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Velásquez, M., Alvarez, A., Fajardo, C., Merchán, V., Chio-Cho, G. (2024) Red neuronal para el análisis elástico lineal de estructuras de pavimento flexible proyectadas para vías de bajo volumen de tránsito. Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto – CILA XXII.

**Apéndice**

**Apéndice A.** Simulaciones realizadas de ejercicios preliminares.

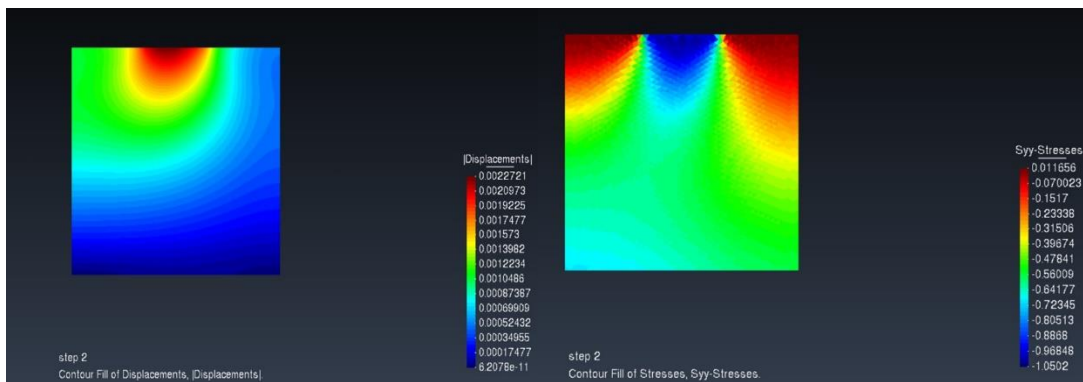
**Figura A1**

*Modelo preliminar.*



**Figura A2.**

*Simulación modelo preliminar.*



**Tabla A1.**

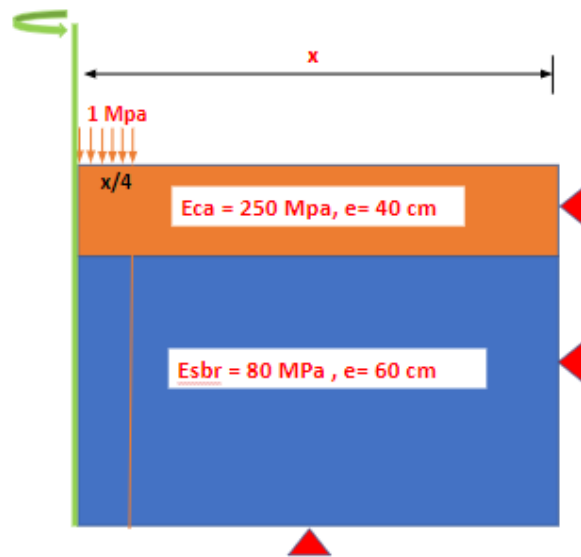
*Resultados ejercicio preliminar.*

		Modelo Jorge			Modelo Jessica		
		E =3000 MPa	E =1250 MPa	% variación	E =3000 MPa	E =2500 MPa	% variación
<b>Syy-Stresses</b>	<b>Máx</b>	1.051	1.051	0.000	1.050	1.050	0.000
	<b>Min</b>	0.010	0.010	0.000	0.012	0.012	0.000
<b>Desplazamientos</b>	<b>Máx</b>	0.002	0.005	140.011	0.002	0.003	19.999
	<b>min</b>	7.99E-11	7.99E-11	0.006	6.21E-11	6.21E-11	0

**Apéndice B.** Modelación de una estructura típica ejecutada con axisimetría.

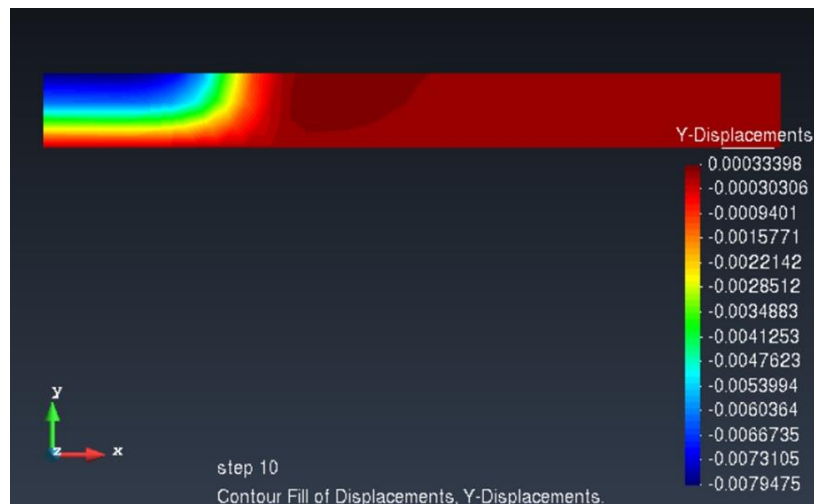
**Figura B1.**

*Modelo elástico lineal (2D) con axisimetría.*



**Figura B2.**

*Simulación elástico lineal.*



**Tabla B1.**

*Resultados modelo elástico lineal Jessica.*

Modelo Jessica			
profundidad	X = 10 m	X = 15 m	% variación
0	0.00342744	0.00347218	1.305347431
0.2	0.00308298	0.00306147	0.697701575
0.4	0.00273853	0.00265077	3.204638985
0.7	0.00136368	0.00135804	0.413586765
1	8.43E-09	1.29E-08	53.02491103

**Tabla B2.**

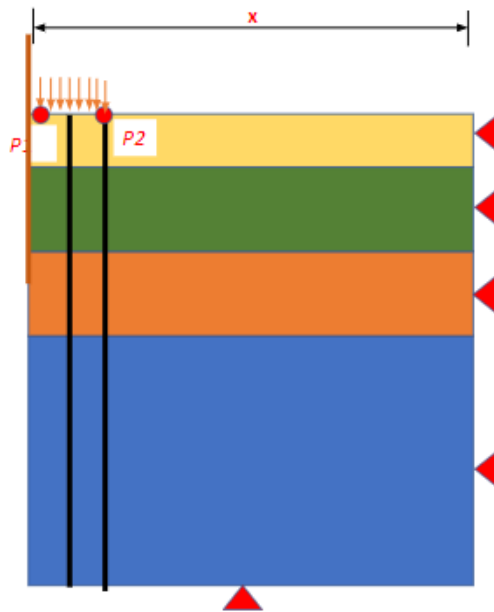
*Resultados modelo elástico lineal Jorge.*

Modelo Jorge			
profundidad	X = 10 m	X = 20 m	% variación
0	0.00342744	0.00356811	4.1042294
0.2	0.003082984	0.00320099	3.82778503
0.4	0.00273853	0.00283388	3.48175846
0.7	0.001594319	0.00157483	1.22265369
1	9.22E-09	1.63E-09	82.3404583

**Apéndice C.** Realización de dos modelos de sección típica.

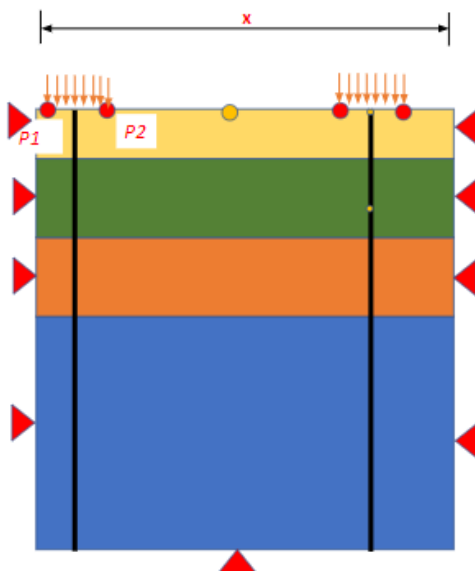
**Figura C1.**

*Modelo elástico lineal (2D) con axisimetría.*



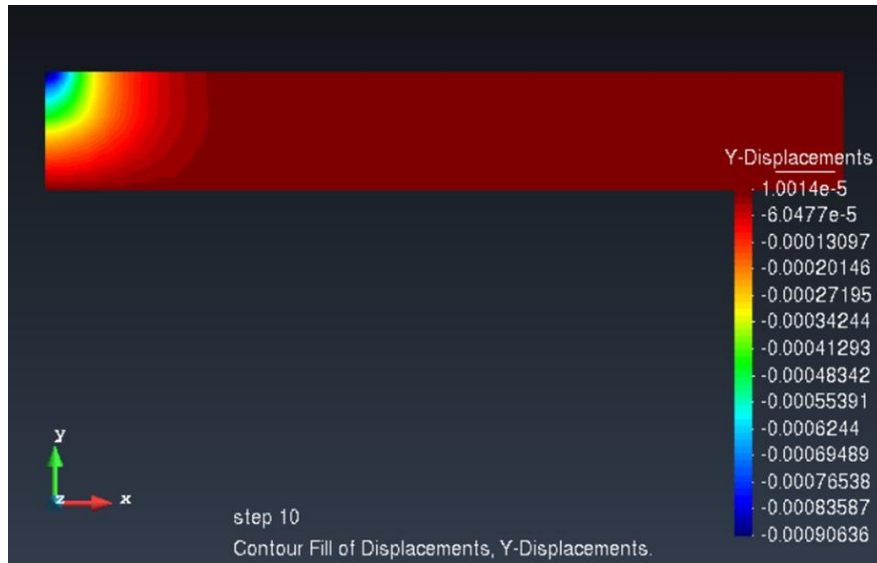
**Figura C2.**

*Modelo elástico lineal (2D) sin axisimetría*



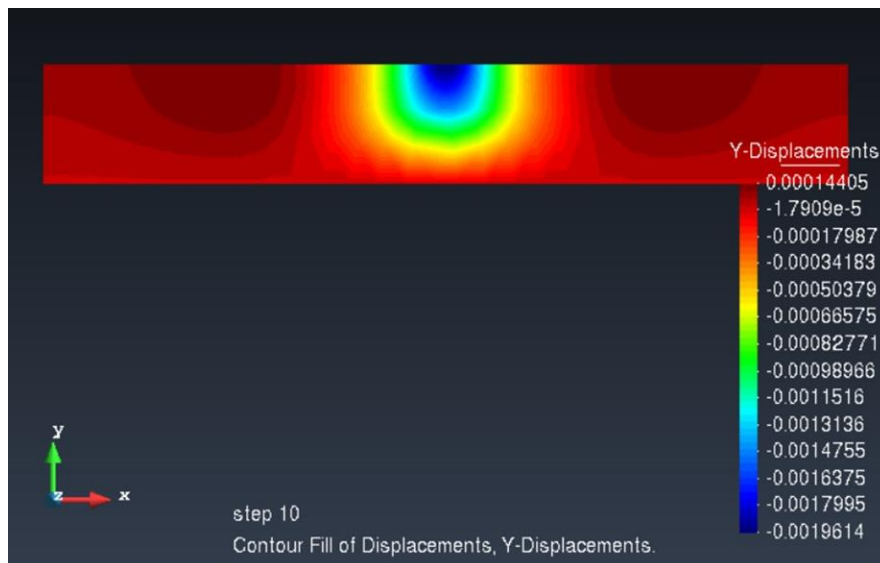
**Figura C3.**

*Modelación elástico lineal con axisimetría.*



**Figura C4.**

*Modelación elástico lineal sin axisimetría.*



Se hizo la comparación de los resultados para los modelos con axisimetría y sin axisimetría con respecto a los obtenidos en PITRA.

**Tabla C1.**

*Espesores y propiedades capas estructurales del pavimento.*

modelo244	eCA	ECA	eBG	EBG	eSBG	ESBG	eSBR	ESBR
	0.07	3250	0.25	250	0.25	200	0.93	80

modelo487	eCA	ECA	eBG	EBG	eSBG	ESBG	eSBR	ESBR
	0.05	3250	0.25	250	0.25	200	0.95	80

**Tabla C2.**

*Resultados con axisimetría modelo 244.*

Profundidad	PITRA	P1	% Error	P2	% Error
0	4.81E-04	0.0008869	84.42	0.0006452	34.17
0.0175	4.82E-04	0.0008829	83.24	0.0006433	33.5
0.035	4.81E-04	0.0008789	82.71	0.0006413	33.31
0.0525	4.79E-04	0.000875	82.71	0.0006393	33.5
0.07	4.75E-04	0.000871	83.31	0.0006373	34.13
0.12	4.34E-04	0.0008034	85.06	0.0006099	40.49
0.17	4.03E-04	0.0007442	84.88	0.0005817	44.52
0.22	3.78E-04	0.0006924	83.23	0.0005611	48.48
0.27	3.58E-04	0.0006534	82.49	0.0005383	50.33
0.32	3.41E-04	0.0006128	79.52	0.0005093	49.19
0.37	3.25E-04	0.0005749	76.82	0.0004852	49.25
0.42	3.11E-04	0.0005416	73.97	0.0004612	48.15
0.47	2.99E-04	0.0005097	70.34	0.0004399	47.01
0.52	2.88E-04	0.0004809	66.88	0.000417	44.7
0.57	2.78E-04	0.0004526	63.06	0.0003941	41.99
0.613	2.64E-04	0.0004188	58.57	0.0003678	39.29
0.656	2.52E-04	0.0003857	53.12	0.0003416	35.59
0.699	2.41E-04	0.000354	47.01	0.0003163	31.36
0.742	2.31E-04	0.0003272	41.81	0.0002936	27.24
0.785	2.22E-04	0.0003008	35.78	0.0002708	22.27
0.828	2.13E-04	0.0002761	29.6	0.0002485	16.66
0.871	2.05E-04	0.0002539	23.76	0.0002304	12.29
0.914	1.98E-04	0.0002324	17.43	0.0002124	7.29
0.957	1.91E-04	0.0002109	10.32	0.0001943	1.64
1	1.85E-04	0.0001927	4.19	0.0001763	4.67

**Tabla C3.**

*Resultados sin axisimetría modelo 244.*

Profundidad	PITRA	P1	% Error	P2	% Error
0	4.81E-04	0.001876	290.12	0.0018722	289.31
0.0175	4.82E-04	0.0018772	289.6	0.001873	288.73
0.035	4.81E-04	0.0018782	290.43	0.0018736	289.47
0.0525	4.79E-04	0.0018764	291.84	0.0018723	290.96
0.07	4.75E-04	0.0018747	294.54	0.0018709	293.75
0.12	4.34E-04	0.0018293	321.36	0.0018277	320.99
0.17	4.03E-04	0.001783	342.96	0.0017815	342.59
0.22	3.78E-04	0.0017361	359.42	0.0017365	359.52
0.27	3.58E-04	0.0016892	371.76	0.0016913	372.36
0.32	3.41E-04	0.0016444	381.72	0.0016445	381.76
0.37	3.25E-04	0.0016003	392.19	0.0015999	392.09
0.42	3.11E-04	0.0015457	396.51	0.0015465	396.75
0.47	2.99E-04	0.0014906	398.18	0.0014925	398.8
0.52	2.88E-04	0.0014355	398.12	0.0014389	399.32
0.57	2.78E-04	0.0013804	397.31	0.0013864	399.48
0.613	2.64E-04	0.0013056	394.4	0.0013154	398.12
0.656	2.52E-04	0.0012309	388.64	0.0012445	394.03
0.699	2.41E-04	0.0011561	380.06	0.0011735	387.27
0.742	2.31E-04	0.0010811	368.53	0.0010966	375.24
0.785	2.22E-04	0.0010111	356.46	0.001031	365.45
0.828	2.13E-04	0.000944	343.17	0.0009667	353.83
0.871	2.05E-04	0.0008769	327.38	0.0009019	339.58
0.914	1.98E-04	0.0008098	309.13	0.0008372	322.96
0.957	1.91E-04	0.0007427	288.41	0.0007724	303.95
1	1.85E-04	0.0006756	265.28	0.0007076	282.6

**Tabla C4.**

*Resultados con axisimetría modelo 487.*

Profundidad	PITRA	P1	%Error	P2	%Error
0	0.0005365	0.0010873	103%	0.0007675	43%
0.0125	0.0005377	0.0010864	102%	0.0007679	43%
0.025	0.0005374	0.0010856	102%	0.0007684	43%
0.0375	0.0005357	0.0010847	102%	0.0007688	44%
0.05	0.0005326	0.0010839	103%	0.0007692	44%
0.1	0.0004784	0.0010124	112%	0.0007461	56%
0.15	0.0004369	0.0009409	115%	0.0007229	65%
0.2	0.0004058	0.0008694	114%	0.0006997	72%
0.25	0.0003817	0.0007979	109%	0.0006765	77%
0.3	0.000362	0.0007264	101%	0.0006533	80%
0.35	0.0003433	0.0007293	112%	0.0005951	73%
0.4	0.0003277	0.0006767	106%	0.0005658	73%
0.45	0.0003142	0.000624	99%	0.0005365	71%
0.5	0.0003021	0.0005713	89%	0.0005071	68%
0.55	0.0002906	0.0005187	79%	0.0004778	64%
0.595	0.0002752	0.0005247	91%	0.0004497	63%
0.64	0.0002615	0.0004789	83%	0.000415	59%
0.685	0.0002491	0.0004332	74%	0.0003803	53%
0.73	0.0002379	0.0003874	63%	0.0003456	45%
0.775	0.0002278	0.0003417	50%	0.0003109	37%
0.82	0.0002185	0.0002959	35%	0.0002762	26%
0.865	0.0002099	0.0002502	19%	0.0002416	15%
0.91	0.0002021	0.0002044	1%	0.0002069	2%
0.955	0.0001948	0.0001587	19%	0.0001722	12%
1	0.0001881	0.0001129	40%	0.0001375	27%

**Tabla C5.**

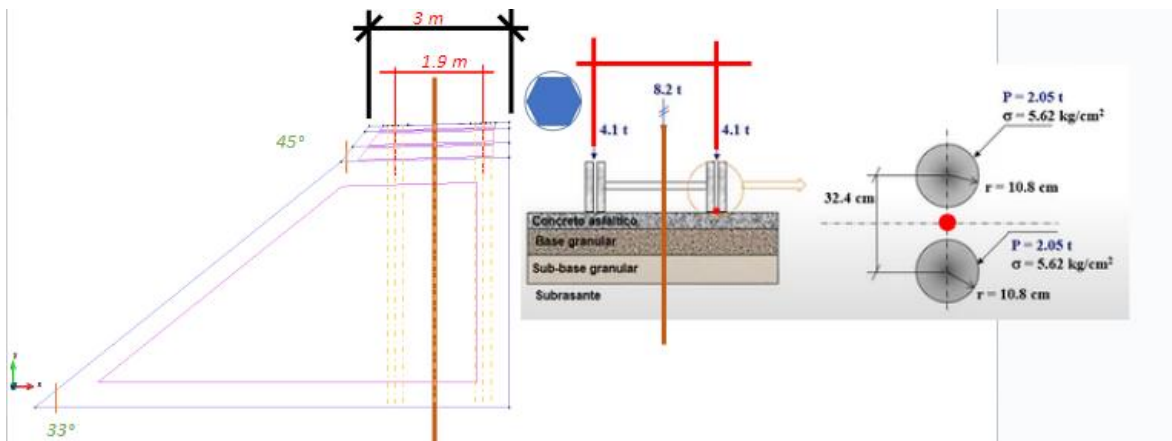
*Resultados sin axisimetría modelo 487.*

<b>Profundidad</b>	<b>PITRA</b>	<b>P1</b>	<b>%Error</b>	<b>P2</b>	<b>%Error</b>
0	0.0005365	0.0023177	332%	0.0023155	332%
0.0125	0.0005377	0.0023202	331%	0.0023184	331%
0.025	0.0005374	0.0023228	332%	0.0023213	332%
0.0375	0.0005357	0.0023253	334%	0.0023241	334%
0.05	0.0005326	0.0023279	337%	0.002327	337%
0.1	0.0004784	0.0022728	375%	0.0022886	378%
0.15	0.0004369	0.0022219	409%	0.0022535	416%
0.2	0.0004058	0.002171	435%	0.0022184	447%
0.25	0.0003817	0.0021201	456%	0.0021832	472%
0.3	0.000362	0.0020692	472%	0.0021481	493%
0.35	0.0003433	0.0020285	491%	0.0020121	486%
0.4	0.0003277	0.00198	504%	0.001952	496%
0.45	0.0003142	0.0019315	515%	0.0018919	502%
0.5	0.0003021	0.001883	523%	0.0018318	506%
0.55	0.0002906	0.0018344	531%	0.0017717	510%
0.595	0.0002752	0.0016632	504%	0.0016913	515%
0.64	0.0002615	0.0015675	499%	0.0016052	514%
0.685	0.0002491	0.0014717	491%	0.0015191	510%
0.73	0.0002379	0.001376	478%	0.001433	502%
0.775	0.0002278	0.0012803	462%	0.0013469	491%
0.82	0.0002185	0.0011846	442%	0.0012607	477%
0.865	0.0002099	0.0010888	419%	0.0011746	460%
0.91	0.0002021	0.0009931	391%	0.0010885	439%
0.955	0.0001948	0.0008974	361%	0.0010024	415%
1	0.0001881	0.0008017	326%	0.0009163	387%

**Apéndice D.** Simulación de una sección en terraplén con siete puntos de análisis para dos modelos distintos.

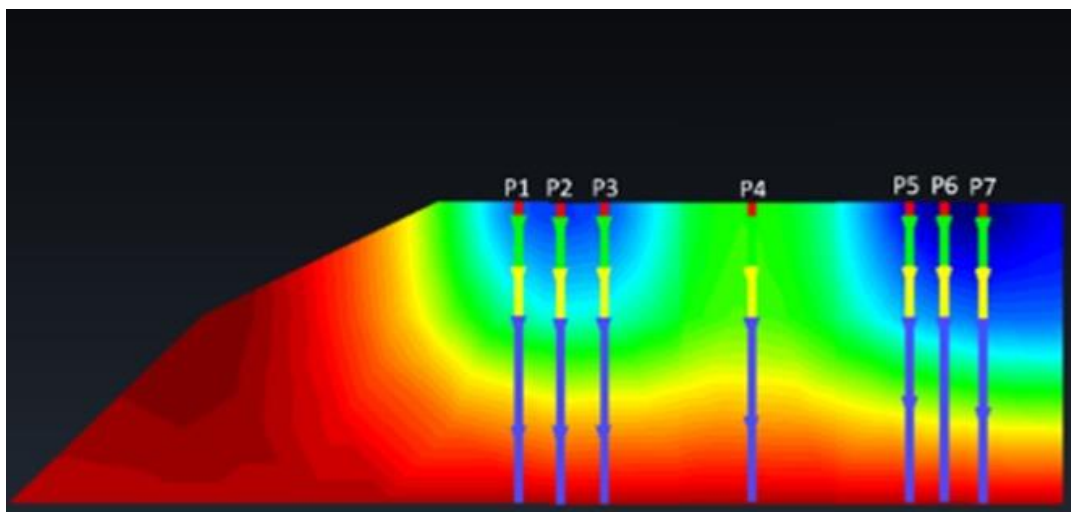
**Figura D1.**

*Modelo elástico lineal (2D) en terraplén.*



**Figura D2.**

*Puntos de análisis.*



**Tabla D1.**

*Resultados modelo 244.*

Profundidad	PITRA	P1	% Error	P2	% Error	P3	% Error
0	4.81E-04	0.001866	288.130342	0.001969	309.499054	0.001931	301.640708
0.0175	4.82E-04	0.001863	286.565594	0.001967	308.978353	0.001926	300.583709
0.035	4.81E-04	0.001859	286.375296	0.001964	308.457651	0.001921	299.526711
0.0525	4.79E-04	0.001855	287.321667	0.001962	307.937158	0.001916	298.469712
0.07	4.75E-04	0.001851	289.534894	0.001959	307.416457	0.001911	297.412714
0.12	4.34E-04	0.001806	316.097112	0.001912	297.695107	0.001861	286.959596
0.17	4.03E-04	0.00175	334.821256	0.001863	287.36551	0.00181	276.366529
0.22	3.78E-04	0.001704	351.051364	0.001814	277.260912	0.001768	267.57221
0.27	3.58E-04	0.00166	363.715403	0.001761	266.212024	0.001725	258.777891
0.32	3.41E-04	0.001605	370.057712	0.001706	254.822725	0.001682	249.860051
0.37	3.25E-04	0.001551	377.187587	0.001654	243.89507	0.001634	239.732371
0.42	3.11E-04	0.001499	381.527689	0.001601	232.967415	0.00158	228.4537
0.47	2.99E-04	0.001447	383.563718	0.001549	222.03976	0.001525	217.175238
0.52	2.88E-04	0.001395	383.950656	0.001496	211.111897	0.001471	205.896567
0.57	2.78E-04	0.001342	383.635479	0.001443	199.979413	0.001417	194.618104
0.613	2.64E-04	0.00127	380.875114	0.001368	184.489176	0.001342	179.127867
0.656	2.52E-04	0.001197	375.332672	0.001286	167.418952	0.001268	163.70355
0.699	2.41E-04	0.001125	367.064319	0.001203	150.25328	0.001194	148.386949
0.742	2.31E-04	0.001056	357.526653	0.001121	133.087608	0.001121	133.070349
0.785	2.22E-04	0.000987	345.541962	0.001044	117.098297	0.001047	117.753748
0.828	2.13E-04	0.000918	331.03751	0.00098	103.730167	0.000978	103.46337
0.871	2.05E-04	0.000849	313.971147	0.000915	90.362245	0.00091	89.182141
0.914	1.98E-04	0.000781	294.391452	0.000851	76.994115	0.000841	74.900705
0.957	1.91E-04	0.000712	272.28806	0.000787	63.625985	0.000773	60.792697
1	1.85E-04	0.000646	249.4485	0.000723	50.258063	0.00071	47.676184

**Tabla D2.**

*Resultados modelo 244.*

Profundidad	PITRA	P4	% Error	P5	% Error	P6	% Error	P7	% Error
0	4.81E-04	0.001083	125.147123	0.002159	349.040321	0.002311	380.465387	0.002362	391.103995
0.0175	4.82E-04	0.001081	124.864938	0.002155	348.141779	0.002307	379.709497	0.002357	390.135998
0.035	4.81E-04	0.00108	124.582961	0.002151	347.243029	0.002303	378.953607	0.002352	389.168001
0.0525	4.79E-04	0.001079	124.300776	0.002146	346.344486	0.0023	378.197717	0.002348	388.200004
0.07	4.75E-04	0.001077	124.018591	0.002142	345.445944	0.002296	377.441827	0.002343	387.232007
0.12	4.34E-04	0.001072	122.907526	0.002091	334.830834	0.002248	367.42228	0.002294	376.928404
0.17	4.03E-04	0.001069	122.205286	0.002035	323.253551	0.002199	357.279835	0.002236	365.07351
0.22	3.78E-04	0.001064	121.203186	0.001989	313.698767	0.002146	346.332841	0.00219	355.4788
0.27	3.58E-04	0.001059	120.201085	0.001945	304.391649	0.002093	335.257959	0.002145	346.062925
0.32	3.41E-04	0.001057	119.754206	0.001893	293.604359	0.00204	324.182869	0.002093	335.28832
0.37	3.25E-04	0.001046	117.562436	0.001843	283.297428	0.001986	312.924161	0.00204	324.218844
0.42	3.11E-04	0.001039	116.127597	0.001794	272.990497	0.001932	301.665454	0.001986	312.985922
0.47	2.99E-04	0.001033	114.903824	0.001744	262.762378	0.001877	290.286136	0.001933	301.933914
0.52	2.88E-04	0.001028	113.680052	0.001696	252.714966	0.001821	278.748154	0.001882	291.276383
0.57	2.78E-04	0.001022	112.456279	0.001648	242.667762	0.001766	267.210173	0.00183	280.457069
0.613	2.64E-04	0.000987	105.192664	0.001574	227.215579	0.001681	249.471397	0.001742	262.14207
0.656	2.52E-04	0.000952	97.92884	0.001494	210.705359	0.001591	230.92204	0.001653	243.739317
0.699	2.41E-04	0.000917	90.665225	0.001411	193.478758	0.001502	212.314459	0.001565	225.336356
0.742	2.31E-04	0.000882	83.40161	0.001328	176.185198	0.001418	194.813575	0.001477	207.232423
0.785	2.22E-04	0.000849	76.459689	0.001245	158.90266	0.001336	177.766225	0.001391	189.339142
0.828	2.13E-04	0.000807	67.743559	0.00117	143.329244	0.001254	160.718667	0.001305	171.46416
0.871	2.05E-04	0.000761	58.158415	0.001095	127.755828	0.00117	143.375824	0.001219	153.589386
0.914	1.98E-04	0.000715	48.646468	0.00102	112.18262	0.001086	125.925472	0.001133	135.708166
0.957	1.91E-04	0.000669	39.134313	0.000945	96.609204	0.001012	110.350392	0.001047	117.812805
1	1.85E-04	0.000623	29.622159	0.000871	81.104826	0.000937	94.868681	0.000961	99.917445

**Tabla D3.**

*Resultados modelo 487.*

Profundidad	PITRA	P1	%Error	P2	%Error	P3	%Error	P4	%Error
0	0.000537	0.00184055	243%	0.00193884	261%	0.00191072	256%	0.00107567	100%
0.0125	0.000538	0.00183563	241%	0.00193947	260%	0.001906964	254%	0.00107428	100%
0.025	0.000537	0.00183071	241%	0.00194009	261%	0.001903208	254%	0.0010729	100%
0.0375	0.000536	0.00182579	241%	0.00194072	262%	0.001899453	254%	0.00107151	100%
0.05	0.000533	0.00182087	242%	0.00194135	264%	0.001895697	256%	0.00107012	101%
0.1	0.000478	0.00177437	271%	0.00189007	295%	0.001847365	286%	0.00106194	122%
0.15	0.000437	0.00172788	295%	0.00184199	322%	0.001799032	312%	0.00105375	141%
0.2	0.000406	0.00168138	314%	0.00179392	342%	0.0017507	331%	0.00104557	158%
0.25	0.000382	0.00163489	328%	0.00174584	357%	0.001702368	346%	0.00103738	172%
0.3	0.000362	0.00158839	339%	0.00169777	369%	0.001654035	357%	0.00102919	184%
0.35	0.000343	0.00154396	350%	0.00164259	379%	0.001608011	369%	0.00103048	200%
0.4	0.000328	0.00150315	358%	0.00160183	388%	0.001567602	378%	0.00102111	211%
0.45	0.000314	0.00146234	366%	0.00156107	397%	0.001527193	386%	0.00101173	222%
0.5	0.000302	0.00142153	371%	0.00152032	403%	0.001486784	392%	0.00100236	232%
0.55	0.000291	0.00138072	374%	0.00147956	408%	0.001446375	397%	0.00099298	241%
0.595	0.000275	0.00132319	381%	0.0013454	389%	0.001371936	399%	0.00096102	249%
0.64	0.000261	0.0012646	385%	0.00127255	388%	0.001299085	398%	0.00092299	254%
0.685	0.000249	0.00120601	384%	0.00119969	382%	0.001226235	392%	0.00088496	255%
0.73	0.000238	0.00114741	382%	0.00112684	373%	0.001153384	385%	0.00084693	256%
0.775	0.000228	0.00108882	378%	0.00105399	362%	0.001080534	374%	0.0008089	255%
0.82	0.000218	0.00103022	373%	0.00098114	350%	0.001007683	362%	0.00077087	254%
0.865	0.00021	0.00097163	363%	0.00090829	333%	0.000934833	345%	0.00073284	249%
0.91	0.000202	0.00091303	352%	0.00083544	314%	0.000861982	327%	0.00069481	244%
0.955	0.000195	0.00085444	338%	0.00076259	291%	0.000789132	305%	0.00065677	237%
1	0.000188	0.00079584	323%	0.00068974	267%	0.000716281	281%	0.00061874	229%

**Tabla D4.**

*Resultados modelo 487.*

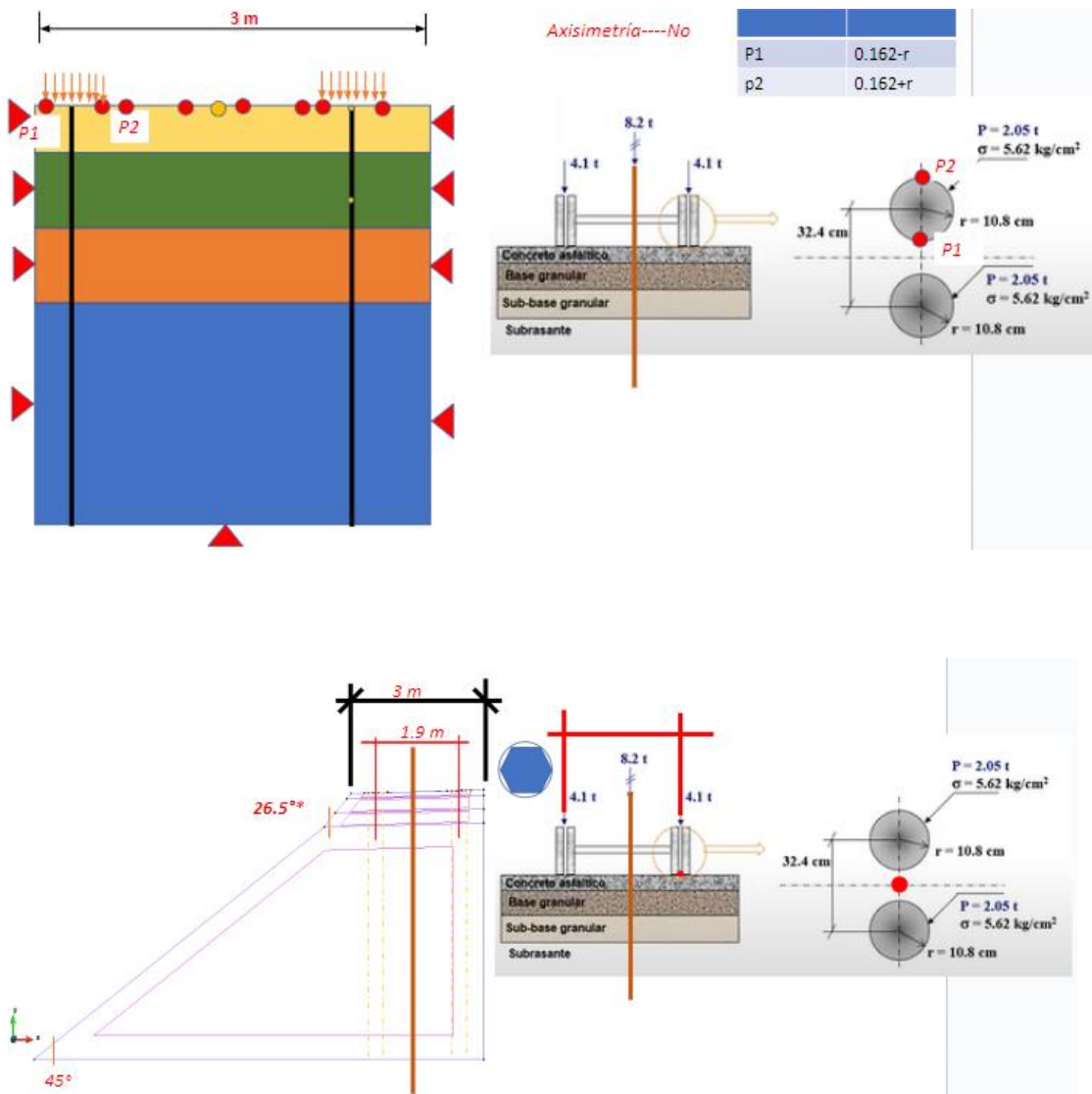
Profundidad	PITRA	P5	%Error	P6	%Error	P7	%Error
0	0.000537	0.0021911	308%	0.0023295	334%	0.0023904	345%
0.0125	0.000538	0.0021859	306%	0.0023279	333%	0.0023856	343%
0.025	0.000537	0.0021806	306%	0.0023263	333%	0.0023807	343%
0.0375	0.000536	0.0021753	306%	0.0023247	334%	0.0023759	343%
0.05	0.000533	0.0021701	307%	0.0023231	336%	0.0023711	345%
0.1	0.000478	0.0021165	343%	0.0022724	375%	0.0023162	385%
0.15	0.000437	0.002063	372%	0.0022218	408%	0.0022613	417%
0.2	0.000406	0.0020094	395%	0.0021711	435%	0.0022064	443%
0.25	0.000382	0.0019559	412%	0.0021204	455%	0.0021515	463%
0.3	0.000362	0.0019024	426%	0.0020698	472%	0.0020966	479%
0.35	0.000343	0.0018597	442%	0.0020061	485%	0.0020594	500%
0.4	0.000328	0.0018128	453%	0.0019574	497%	0.0020168	515%
0.45	0.000314	0.0017659	462%	0.0019087	508%	0.0019741	529%
0.5	0.000302	0.0017189	469%	0.0018599	516%	0.0019315	540%
0.55	0.000291	0.001672	475%	0.0018112	522%	0.0018888	549%
0.595	0.000275	0.001599	481%	0.0017122	523%	0.0017702	544%
0.64	0.000261	0.0015195	482%	0.0016206	521%	0.0016781	543%
0.685	0.000249	0.0014399	478%	0.0015291	514%	0.0015861	537%
0.73	0.000238	0.0013604	472%	0.0014375	504%	0.001494	528%
0.775	0.000228	0.0012809	462%	0.001346	490%	0.0014019	515%
0.82	0.000218	0.0012014	451%	0.0012544	475%	0.0013099	501%
0.865	0.00021	0.0011218	434%	0.0011629	454%	0.0012178	480%
0.91	0.000202	0.0010423	416%	0.0010713	430%	0.0011257	457%
0.955	0.000195	0.0009628	394%	0.0009797	402%	0.0010337	430%
1	0.000188	0.0008833	370%	0.0008882	372%	0.0009416	401%

**Apéndice E.** Realización de ocho modelos, cuatro en sección típica y cuatro en terraplén.

Los puntos de análisis fueron en el centro de cada impronta de carga.

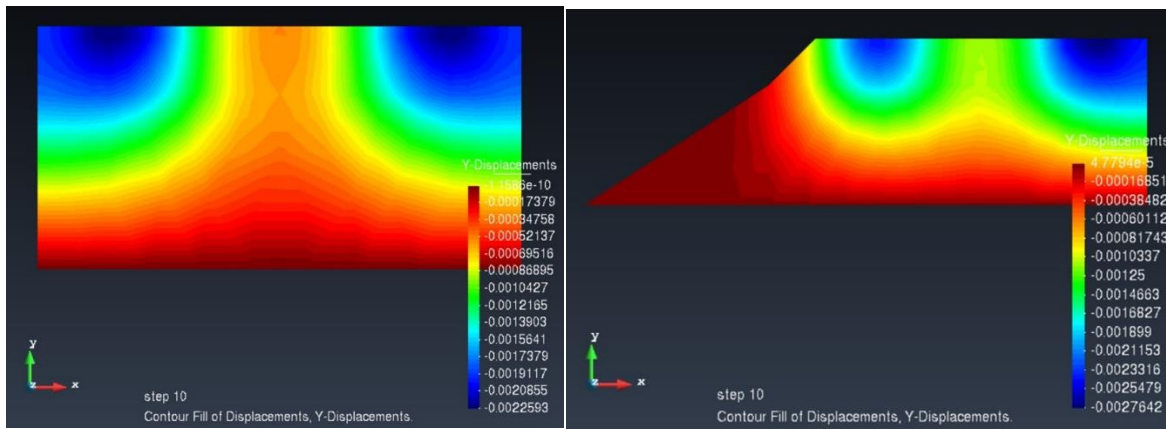
**Figura E1.**

*Modelo en sección típica y terraplén (2D).*



**Figura E2.**

*Simulación en sección típica y terraplén (2D).*



**Tabla E1.**

*Espesores y propiedades capas estructurales del pavimento.*

<b>modelo392</b>	eCA	ECA	eBG	EBG	eSBG	ESBG	eSBR	ESBR
	0.07	2500	0.2	200	0.15	150	1.08	80
<b>modelo479</b>	eCA	ECA	eBG	EBG	eSBG	ESBG	eSBR	ESBR
	0.07	1500	0.15	250	0.15	150	1.13	80
<b>modelo514</b>	eCA	ECA	eBG	EBG	eSBG	ESBG	eSBR	ESBR
	0.05	3250	0.25	250	0.2	200	1	80
<b>modelo500</b>	eCA	ECA	eBG	EBG	eSBG	ESBG	eSBR	ESBR
	0.05	2500	0.25	200	0.25	150	0.95	80

**Tabla E2.**

*Resultados estructura en terraplén, modelo 392.*

Profundidad	PITRA	P1	% Error	P2	% Error	P3	% Error	P4	% Error
0	5.96E-04	0.002256	278.519	0.002319	289.161	0.002513	321.56	0.002764	363.781
0.0175	5.97E-04	0.002253	277.235	0.002316	287.784	0.002506	319.658	0.002757	361.662
0.035	5.96E-04	0.00225	277.356	0.002312	287.852	0.0025	319.318	0.00275	361.264
0.0525	5.93E-04	0.002247	278.649	0.002309	289.122	0.002494	320.277	0.002743	362.293
0.07	5.89E-04	0.002244	281.244	0.002306	291.732	0.002488	322.677	0.002736	364.906
0.11	5.46E-04	0.002194	301.875	0.002256	313.196	0.002437	346.248	0.002689	392.559
0.15	5.12E-04	0.002143	318.991	0.002205	331.046	0.002381	365.5	0.002637	415.393
0.19	4.84E-04	0.002093	332.721	0.002157	346.023	0.002328	381.34	0.002581	433.8
0.23	4.60E-04	0.002042	343.628	0.002112	358.899	0.002277	394.815	0.002531	449.946
0.27	4.40E-04	0.001991	352.595	0.002066	369.665	0.002232	407.454	0.00248	463.719
0.3	4.24E-04	0.001953	360.906	0.00202	376.584	0.002189	416.612	0.002439	475.469
0.33	4.09E-04	0.001915	367.863	0.001973	382.174	0.002146	424.473	0.002398	485.892
0.36	3.96E-04	0.001866	371.401	0.001927	386.697	0.002103	431.298	0.002352	494.171
0.39	3.83E-04	0.001818	374.144	0.00188	390.458	0.002062	437.876	0.002306	501.475
0.42	3.71E-04	0.001769	376.469	0.001834	393.847	0.002025	445.407	0.00226	508.5
0.478	3.42E-04	0.001657	384.652	0.001713	401.099	0.001907	457.926	0.002129	522.934
0.536	3.17E-04	0.001544	387.636	0.001594	403.431	0.00178	462.157	0.001999	531.24
0.594	2.95E-04	0.001426	383.57	0.001479	401.506	0.001667	465.346	0.001872	534.997
0.652	2.76E-04	0.001317	377.55	0.001365	394.973	0.001554	463.161	0.001746	533.051
0.71	2.59E-04	0.001209	366.499	0.001255	384.375	0.001442	456.299	0.001621	525.435
0.768	2.44E-04	0.001097	348.854	0.001157	373.438	0.001344	449.968	0.0015	513.849
0.826	2.31E-04	0.000995	330.458	0.001062	359.466	0.001244	438.327	0.001379	496.888
0.884	2.19E-04	0.000903	311.846	0.00097	342.607	0.001134	417.491	0.001259	474.283
0.942	2.09E-04	0.000811	288.927	0.000879	321.459	0.001024	391.314	0.001139	446.035
1	1.99E-04	0.00072	261.916	0.000787	295.988	0.000914	359.976	0.001018	411.839

**Tabla E3.**

*Resultados estructura típica, modelo 392.*

Profundidad	PITRA	P1	% Error	P2	% Error	P3	% Error	P4	% Error
0	6.29E-04	0.002257	258.869	0.002002	218.238	0.002001	218.098	0.002257	258.814
0.0175	6.29E-04	0.002252	257.939	0.001995	217.193	0.001995	217.065	0.002252	257.906
0.035	6.27E-04	0.002246	258.444	0.001989	217.419	0.001989	217.304	0.002246	258.434
0.0525	6.22E-04	0.002241	260.095	0.001983	218.658	0.001982	218.555	0.002241	260.108
0.07	6.16E-04	0.002235	262.956	0.001977	220.964	0.001976	220.873	0.002236	262.993
0.11	5.84E-04	0.002197	276.492	0.001935	231.655	0.001935	231.532	0.002197	276.562
0.15	5.56E-04	0.002155	287.32	0.001894	240.403	0.001893	240.246	0.002154	287.255
0.19	5.34E-04	0.002108	295.15	0.001852	247.144	0.001851	246.951	0.002108	295.073
0.23	5.14E-04	0.002064	301.582	0.001811	252.319	0.00181	252.064	0.002064	301.478
0.27	4.96E-04	0.002022	307.205	0.001771	256.651	0.001769	256.244	0.002021	307.141
0.3	4.76E-04	0.001982	316.803	0.001741	266.173	0.00174	265.924	0.001982	316.748
0.33	4.57E-04	0.001942	324.837	0.001704	272.844	0.001703	272.535	0.001942	324.793
0.36	4.41E-04	0.001905	332.271	0.001668	278.434	0.001666	278.061	0.001904	332.131
0.39	4.26E-04	0.001871	339.491	0.001631	283.256	0.001629	282.815	0.00187	339.372
0.42	4.11E-04	0.001836	346.448	0.001595	287.743	0.001592	287.231	0.001836	346.351
0.478	3.74E-04	0.001723	361.216	0.001492	299.372	0.00149	298.945	0.001722	361.12
0.536	3.42E-04	0.00161	370.336	0.001379	303.039	0.001378	302.589	0.001609	370.158
0.594	3.16E-04	0.001501	375.491	0.001285	307.091	0.001284	306.604	0.001501	375.307
0.652	2.93E-04	0.001394	375.633	0.001192	306.936	0.00119	306.112	0.001393	375.429
0.71	2.73E-04	0.001286	370.575	0.001097	301.556	0.001094	300.438	0.001285	370.351
0.768	2.56E-04	0.001185	362.952	0.001019	298.204	0.001018	297.61	0.001185	362.823
0.826	2.41E-04	0.001086	351.243	0.000935	288.471	0.000935	288.522	0.001086	351.091
0.884	2.27E-04	0.000988	334.692	0.000848	273.313	0.000848	273.273	0.000987	334.516
0.942	2.15E-04	0.000889	313.274	0.000761	253.863	0.000761	253.72	0.000888	313.073
1	2.04E-04	0.00079	287.062	0.000674	230.103	0.000673	229.846	0.00079	286.832

**Tabla E4.**

Resultados estructura en terraplén, modelo 479.

Profundidad	PITRA	P1	% Error	P2	% Error	P3	% Error	P4	% Error
0	6.29E-04	0.002369	276.698	0.002422	285.012	0.00262	316.503	0.002875	357.076
0.0175	6.29E-04	0.002365	275.934	0.002416	284.102	0.002611	315.057	0.002865	355.479
0.035	6.27E-04	0.002361	276.679	0.002411	284.732	0.002602	315.275	0.002856	355.708
0.0525	6.22E-04	0.002356	278.631	0.002406	286.594	0.002594	316.817	0.002846	357.389
0.07	6.16E-04	0.002352	281.858	0.002401	289.756	0.002585	319.752	0.002837	360.599
0.1	5.84E-04	0.002318	297.158	0.002368	305.859	0.00255	336.938	0.002807	381.113
0.13	5.56E-04	0.002281	309.981	0.002333	319.368	0.002512	351.553	0.002774	398.582
0.16	5.34E-04	0.002244	320.601	0.002298	330.659	0.002475	363.788	0.002738	413.094
0.19	5.14E-04	0.002208	329.435	0.002263	340.156	0.002437	374.096	0.002702	425.555
0.22	4.96E-04	0.002171	337.295	0.002228	348.687	0.0024	383.37	0.002666	436.948
0.25	4.76E-04	0.002126	347.206	0.002191	360.73	0.002354	395.077	0.002622	451.468
0.28	4.57E-04	0.002082	355.406	0.002142	368.579	0.002308	404.953	0.002578	463.887
0.31	4.41E-04	0.002037	362.29	0.002093	374.96	0.002263	413.431	0.002527	473.434
0.34	4.26E-04	0.001993	368.239	0.002044	380.331	0.002218	421.048	0.002477	481.896
0.37	4.11E-04	0.001939	371.438	0.001995	385.234	0.002173	428.321	0.002426	489.931
0.433	3.74E-04	0.001792	379.719	0.001862	398.399	0.002035	444.906	0.002277	509.561
0.496	3.42E-04	0.001643	380.232	0.001715	401.211	0.001891	452.656	0.002129	522.141
0.559	3.16E-04	0.001519	381.128	0.001583	401.446	0.001765	459.146	0.001986	528.916
0.622	2.93E-04	0.001405	379.501	0.001462	398.995	0.001638	459.106	0.001842	528.758
0.685	2.73E-04	0.001291	372.358	0.001343	391.332	0.001521	456.655	0.001702	522.863
0.748	2.56E-04	0.00117	357.085	0.001226	379.025	0.001408	449.869	0.001566	511.597
0.811	2.41E-04	0.001061	340.705	0.001126	367.555	0.001283	432.951	0.001428	493.046
0.874	2.27E-04	0.000951	318.695	0.001012	345.404	0.001159	409.923	0.00129	467.731
0.937	2.15E-04	0.000842	291.273	0.000896	316.773	0.001038	382.597	0.001154	436.739
1	2.04E-04	0.000732	258.418	0.000781	282.42	0.000928	354.704	0.001021	399.994

**Tabla E5.**

Resultados estructura típica, modelo 479.

Profundidad	PITRA	P1	% Error	P2	% Error	P3	% Error	P4	% Error
0	6.29E-04	0.002328	270.173	0.00207	229.157	0.002069	228.941	0.002327	269.978
0.0175	6.29E-04	0.002321	268.968	0.002062	227.767	0.002061	227.566	0.00232	268.767
0.035	6.27E-04	0.002314	269.241	0.002054	227.689	0.002052	227.504	0.002313	269.035
0.0525	6.22E-04	0.002307	270.693	0.002045	228.653	0.002044	228.483	0.002306	270.48
0.07	6.16E-04	0.0023	273.385	0.002037	230.712	0.002036	230.556	0.002298	273.166
0.1	5.84E-04	0.002278	290.377	0.002007	243.939	0.002006	243.755	0.002272	289.37
0.13	5.56E-04	0.002256	305.491	0.001977	255.38	0.001976	255.166	0.002246	303.684
0.16	5.34E-04	0.002227	317.444	0.001948	265.14	0.001948	264.984	0.00222	315.986
0.19	5.14E-04	0.002199	327.741	0.00192	273.549	0.001919	273.355	0.002196	327.123
0.22	4.96E-04	0.00217	337.18	0.001892	281.164	0.001891	280.93	0.002172	337.572
0.25	4.76E-04	0.002134	348.741	0.001852	289.432	0.001851	289.237	0.002137	349.437
0.28	4.57E-04	0.002097	358.723	0.001811	296.179	0.00181	296.027	0.002101	359.587
0.31	4.41E-04	0.002055	366.294	0.001771	301.75	0.001771	301.771	0.002058	366.881
0.34	4.26E-04	0.002013	372.872	0.001735	307.676	0.001735	307.587	0.002014	373.256
0.37	4.11E-04	0.00197	379.083	0.0017	313.433	0.001699	313.098	0.001971	379.248
0.433	3.74E-04	0.001839	392.3	0.00158	323.117	0.001579	322.706	0.001839	392.437
0.496	3.42E-04	0.001707	398.801	0.001459	326.285	0.001458	326.141	0.001707	398.773
0.559	3.16E-04	0.001585	401.986	0.001348	326.961	0.001347	326.626	0.001585	401.985
0.622	2.93E-04	0.001463	399.164	0.001236	321.841	0.001235	321.473	0.001463	399.177
0.685	2.73E-04	0.001346	392.373	0.001145	318.891	0.001145	318.84	0.001346	392.46
0.748	2.56E-04	0.001233	381.49	0.001057	312.974	0.001057	312.707	0.001233	381.569
0.811	2.41E-04	0.001119	364.871	0.000963	299.858	0.000963	299.769	0.001119	364.966
0.874	2.27E-04	0.001006	342.688	0.000862	279.578	0.000862	279.419	0.001006	342.8
0.937	2.15E-04	0.000898	317.479	0.000762	254.516	0.000762	254.432	0.000898	317.629
1	2.04E-04	0.000793	288.287	0.000679	232.361	0.000678	231.925	0.000793	288.455

**Tabla E6.**

*Resultados estructura en terraplén, modelo 514.*

Profundidad	PITRA	P1	%Error	P2	%Error	P3	%Error	P4	%Error
0	0.00062527	0.0021887	250%	0.0022495	260%	0.0024785	296%	0.0026884	330%
0.0125	0.00062675	0.0021841	248%	0.0022434	258%	0.0024719	294%	0.0026845	328%
0.025	0.00062628	0.0021794	248%	0.0022373	257%	0.0024652	294%	0.0026806	328%
0.0375	0.00062406	0.0021748	248%	0.0022313	258%	0.0024585	294%	0.0026767	329%
0.05	0.00062003	0.0021701	250%	0.0022252	259%	0.0024519	295%	0.0026728	331%
0.1	0.00055140	0.0021096	283%	0.0021671	293%	0.0023844	332%	0.0026018	372%
0.15	0.00049900	0.0020394	309%	0.0020976	320%	0.0023121	363%	0.0025278	407%
0.2	0.00045966	0.0019792	331%	0.0020353	343%	0.0022495	389%	0.0024598	435%
0.25	0.00042912	0.0019211	348%	0.0019719	360%	0.0021827	409%	0.0023959	458%
0.3	0.00040403	0.0018591	360%	0.0019082	372%	0.0021129	423%	0.0023317	477%
0.35	0.00037909	0.0017877	372%	0.0018521	389%	0.002042	439%	0.0022594	496%
0.4	0.00035827	0.0017154	379%	0.0017866	399%	0.0019713	450%	0.0021808	509%
0.45	0.00034043	0.001643	383%	0.0017123	403%	0.0019054	460%	0.0021097	520%
0.5	0.00032461	0.0015707	384%	0.0016381	405%	0.0018361	466%	0.0020412	529%
0.55	0.00030996	0.0014984	383%	0.0015638	405%	0.0017649	469%	0.001966	534%
0.595	0.00029300	0.0014221	385%	0.0014783	405%	0.0016749	472%	0.0018677	537%
0.64	0.00027784	0.0013423	383%	0.0013927	401%	0.0015849	470%	0.0017693	537%
0.685	0.00026420	0.0012482	372%	0.0013071	395%	0.0014969	467%	0.0016709	532%
0.73	0.00025186	0.001159	360%	0.0012247	386%	0.0014154	462%	0.0015755	526%
0.775	0.00024064	0.0010855	351%	0.0011456	376%	0.0013324	454%	0.0014798	515%
0.82	0.00023041	0.0010119	339%	0.0010666	363%	0.0012444	440%	0.001384	501%
0.865	0.00022103	0.0009383	325%	0.0009875	347%	0.0011564	423%	0.0012883	483%
0.91	0.00021240	0.0008606	305%	0.0009085	328%	0.0010686	403%	0.0011957	463%
0.955	0.00020444	0.0007822	283%	0.0008352	309%	0.0009811	380%	0.001103	440%
1	0.00019708	0.0007042	257%	0.0007657	289%	0.0008937	353%	0.0010112	413%

**Tabla E7.**

*Resultados estructura típica, modelo 514.*

Profundidad	PITRA	P1	%Error	P2	%Error	P3	%Error	P4	%Error
0	0.00062527	0.0021816	249%	0.0019445	211%	0.0019468	211%	0.0021841	249%
0.0125	0.00062675	0.0021779	247%	0.0019387	209%	0.001941	210%	0.0021805	248%
0.025	0.00062628	0.0021742	247%	0.0019329	209%	0.0019351	209%	0.0021769	248%
0.0375	0.00062406	0.0021705	248%	0.0019271	209%	0.0019293	209%	0.0021734	248%
0.05	0.00062003	0.0021668	249%	0.0019214	210%	0.0019234	210%	0.0021698	250%
0.1	0.00055140	0.0021113	283%	0.0018659	238%	0.0018678	239%	0.0021161	284%
0.15	0.00049900	0.0020453	310%	0.0018105	263%	0.0018121	263%	0.0020478	310%
0.2	0.00045966	0.0019865	332%	0.0017513	281%	0.0017544	282%	0.0019893	333%
0.25	0.00042912	0.0019326	350%	0.0016957	295%	0.0016985	296%	0.0019359	351%
0.3	0.00040403	0.0018779	365%	0.0016402	306%	0.0016425	307%	0.0018816	366%
0.35	0.00037909	0.0018198	380%	0.001584	318%	0.0015858	318%	0.0018232	381%
0.4	0.00035827	0.001753	389%	0.0015278	326%	0.001529	327%	0.0017557	390%
0.45	0.00034043	0.0016898	396%	0.0014686	331%	0.0014728	333%	0.0016928	397%
0.5	0.00032461	0.0016319	403%	0.0014129	335%	0.0014172	337%	0.0016345	404%
0.55	0.00030996	0.0015741	408%	0.0013573	338%	0.0013616	339%	0.0015765	409%
0.595	0.00029300	0.0014903	409%	0.0012817	337%	0.0012849	339%	0.0014927	409%
0.64	0.00027784	0.0014065	406%	0.0012063	334%	0.0012104	336%	0.001409	407%
0.685	0.00026420	0.001323	401%	0.0011339	329%	0.001136	330%	0.0013253	402%
0.73	0.00025186	0.001244	394%	0.0010689	324%	0.0010709	325%	0.0012469	395%
0.775	0.00024064	0.0011651	384%	0.0010048	318%	0.0010079	319%	0.0011678	385%
0.82	0.00023041	0.0010861	371%	0.0009344	306%	0.0009411	308%	0.0010888	373%
0.865	0.00022103	0.0010074	356%	0.000864	291%	0.0008696	293%	0.0010105	357%
0.91	0.00021240	0.0009331	339%	0.0007938	274%	0.0007985	276%	0.000936	341%
0.955	0.00020444	0.0008588	320%	0.0007255	255%	0.0007294	257%	0.0008614	321%
1	0.00019708	0.000786	299%	0.0006573	233%	0.000666	238%	0.000789	300%

**Tabla E8.**

*Resultados estructura en terraplén, modelo 500.*

Profundidad	PITRA	P1	%Error	P2	%Error	P3	%Error	P4	%Error
0	0.00054831	0.0020297	270%	0.0021077	284%	0.0023362	326%	0.0025336	362%
0.0125	0.00054956	0.0020261	269%	0.0021029	283%	0.0023309	324%	0.0025315	361%
0.025	0.00054928	0.0020224	268%	0.0020981	282%	0.0023255	323%	0.0025293	360%
0.0375	0.00054759	0.0020187	269%	0.0020932	282%	0.0023202	324%	0.0025272	362%
0.05	0.00054447	0.0020151	270%	0.0020884	284%	0.0023149	325%	0.0025248	364%
0.1	0.00049027	0.0019663	301%	0.0020437	317%	0.0022611	361%	0.0024731	404%
0.15	0.00044889	0.0019098	325%	0.0019889	343%	0.0022033	391%	0.0024145	438%
0.2	0.00041784	0.0018608	345%	0.0019392	364%	0.0021534	415%	0.0023603	465%
0.25	0.00039379	0.0018133	360%	0.0018878	379%	0.0021	433%	0.0023091	486%
0.3	0.00037416	0.0017629	371%	0.0018359	391%	0.0020441	446%	0.002254	502%
0.34	0.00035895	0.0017218	380%	0.0017939	400%	0.002	457%	0.0022074	515%
0.38	0.00034574	0.0016806	386%	0.0017518	407%	0.0019559	466%	0.0021609	525%
0.42	0.00033394	0.0016395	391%	0.0017097	412%	0.0019121	473%	0.0021134	533%
0.46	0.00032302	0.001598	395%	0.0016676	416%	0.0018702	479%	0.0020659	540%
0.5	0.00031242	0.0015564	398%	0.0016216	419%	0.0018282	485%	0.0020194	546%
0.55	0.00029307	0.0014585	398%	0.0015255	421%	0.001732	491%	0.0019107	552%
0.6	0.00027606	0.0013591	392%	0.0014288	418%	0.001632	491%	0.0017991	552%
0.65	0.00026100	0.0012597	383%	0.0013322	410%	0.0015342	488%	0.0016932	549%
0.7	0.00024756	0.001174	374%	0.0012395	401%	0.0014415	482%	0.0015901	542%
0.75	0.00023549	0.0010947	365%	0.0011504	389%	0.0013484	473%	0.0014869	531%
0.8	0.00022458	0.0010073	349%	0.0010652	374%	0.0012562	459%	0.0013842	516%
0.85	0.00021468	0.0009192	328%	0.0009825	358%	0.0011713	446%	0.001282	497%
0.9	0.00020565	0.000837	307%	0.0009004	338%	0.0010836	427%	0.0011799	474%
0.95	0.00019738	0.0007662	288%	0.000824	317%	0.0009921	403%	0.0010777	446%
1	0.00018978	0.0006953	266%	0.0007476	294%	0.0008993	374%	0.0009755	414%

**Tabla E9.**

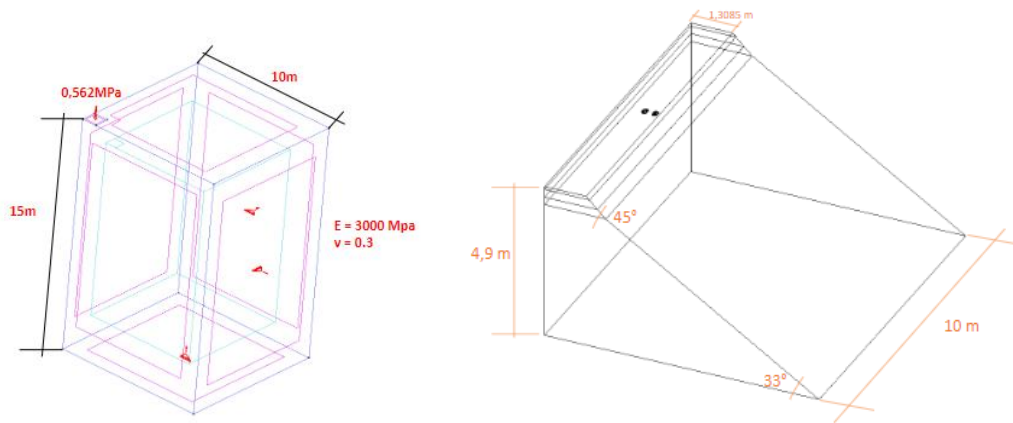
*Resultados estructura típica, modelo 500.*

Profundidad	PITRA	P1	%Error	P2	%Error	P3	%Error	P4	%Error
0	0.00054831	0.0020297	270%	0.0021077	284%	0.0023362	326%	0.0025336	362%
0.0125	0.00054956	0.0020261	269%	0.0021029	283%	0.0023309	324%	0.0025315	361%
0.025	0.00054928	0.0020224	268%	0.0020981	282%	0.0023255	323%	0.0025293	360%
0.0375	0.00054759	0.0020187	269%	0.0020932	282%	0.0023202	324%	0.0025272	362%
0.05	0.00054447	0.0020151	270%	0.0020884	284%	0.0023149	325%	0.0025248	364%
0.1	0.00049027	0.0019663	301%	0.0020437	317%	0.0022611	361%	0.0024731	404%
0.15	0.00044889	0.0019098	325%	0.0019889	343%	0.0022033	391%	0.0024145	438%
0.2	0.00041784	0.0018608	345%	0.0019392	364%	0.0021534	415%	0.0023603	465%
0.25	0.00039379	0.0018133	360%	0.0018878	379%	0.0021	433%	0.0023091	486%
0.3	0.00037416	0.0017629	371%	0.0018359	391%	0.0020441	446%	0.002254	502%
0.34	0.00035895	0.0017218	380%	0.0017939	400%	0.002	457%	0.0022074	515%
0.38	0.00034574	0.0016806	386%	0.0017518	407%	0.0019559	466%	0.0021609	525%
0.42	0.00033394	0.0016395	391%	0.0017097	412%	0.0019121	473%	0.0021134	533%
0.46	0.00032302	0.001598	395%	0.0016676	416%	0.0018702	479%	0.0020659	540%
0.5	0.00031242	0.0015564	398%	0.0016216	419%	0.0018282	485%	0.0020194	546%
0.55	0.00029307	0.0014585	398%	0.0015255	421%	0.001732	491%	0.0019107	552%
0.6	0.00027606	0.0013591	392%	0.0014288	418%	0.001632	491%	0.0017991	552%
0.65	0.00026100	0.0012597	383%	0.0013322	410%	0.0015342	488%	0.0016932	549%
0.7	0.00024756	0.001174	374%	0.0012395	401%	0.0014415	482%	0.0015901	542%
0.75	0.00023549	0.0010947	365%	0.0011504	389%	0.0013484	473%	0.0014869	531%
0.8	0.00022458	0.0010073	349%	0.0010652	374%	0.0012562	459%	0.0013842	516%
0.85	0.00021468	0.0009192	328%	0.0009825	358%	0.0011713	446%	0.001282	497%
0.9	0.00020565	0.000837	307%	0.0009004	338%	0.0010836	427%	0.0011799	474%
0.95	0.00019738	0.0007662	288%	0.000824	317%	0.0009921	403%	0.0010777	446%
1	0.00018978	0.0006953	266%	0.0007476	294%	0.0008993	374%	0.0009755	414%

**Apéndice F.** Modelación en 3D de una sección típica y en terraplén.

**Figura F1.**

*Modelo 3D en sección típica y en terraplén.*



**Figura F2.**

*Modelación 3D en sección típica y terraplén.*

