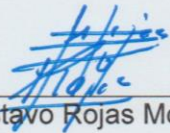


CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

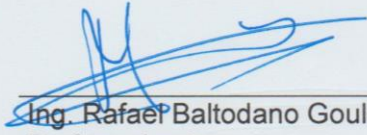
Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Sergio Fernández Cerdas, Ing. Rafael Baltodano Goulding, Ing. Mauricio Araya Rodríguez, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



Ing. Gustavo Rojas Moya.
Director



Ing. Sergio Fernández Cerdas.
Profesor Guía



Ing. Rafael Baltodano Goulding.
Profesor Lector



Ing. Mauricio Araya Rodríguez.
Profesor Observador

Evaluación del aporte mecánico de un geosintético como material de refuerzo en pavimentos flexibles, ante distintas configuraciones cargas reales.

Abstract

A finite element model is developed in the ABAQUS software, with the aim of describing the approximate and logical behavior of a four-layer flexible pavement structure with the addition of a geosynthetic material as reinforcement material. This work aims to analyze and quantify the critical responses of a flexible pavement structure, when faced against different load configurations. Consist in two magnitudes of load, 42,5kN and 61,7kN at three different pressures 80, 100 and 115psi (552 kPa, 689 kPa and 793kPa), the data of the loads was supplied by LanammeUCR and was obtained by means of a sensor of pressure placed under the tires of the Heavy Vehicle Simulator (HVS). The model also considers two different scenarios in terms of water content, the structure is evaluated when the subgrade material has the optimum water content and the saturated water content, to consider this variable it was necessary to implement the calibrated water content equation for a subgrade material, developed in the master's thesis entitled "Effect of water content in the resilient module of the subgrade", using an iterative solution, until reaching a convergence in the results of the resilient module of the material. The critical responses that show the greatest variation because of the geosynthetic are deflection, radial unit deformations and radial stresses. Maximum percentages of decrease were obtained in the magnitude of the responses of 34%, 72% and 76% respectively. Varying the water content in the subgrade material increases the magnitude of the critical responses analyzed.

Keywords: ABAQUS, Finite elements, geosynthetic, critical responses, HVS.

Resumen

Se desarrolla un modelo de elementos finitos en el software ABAQUS con el objetivo de describir el comportamiento aproximado y lógico de una estructura de pavimento flexible de cuatro capas con la adición de un material geosintético como material de refuerzo. El trabajo pretende analizar y cuantificar las respuestas críticas en una estructura de pavimento flexible, ante distintas configuraciones de carga. Se trabaja en dos magnitudes de carga, 42,5kN y 61,7kN a tres distintas presiones 80, 100 y 115psi (552 kPa, 689 kPa y 793kPa). Los datos de las cargas fueron suministrados por LanammeUCR y se obtuvieron por medio de un sensor de presión colocado bajo los neumáticos del Simulador de Vehículos Pesados (HVS por sus siglas en inglés). El modelo además considera dos escenarios distintos en cuanto a contenido de agua, pues se evalúa la estructura cuando el material de subrasante posee el contenido óptimo de agua y el contenido saturado de agua. Para considerar este aspecto, fue necesario implementar la ecuación calibrada del contenido de agua para un material de subrasante, desarrollada en la tesis de maestría que se titula *Efecto del contenido de agua en el módulo resiliente de las subrasantes*, empleando una solución iterativa, hasta alcanzar una convergencia en los resultados del módulo resiliente del material.

Las respuestas críticas que presentan una mayor variación debido al efecto del geosintético son: la deflexión, las deformaciones unitarias radiales y los esfuerzos radiales. Se obtuvieron porcentajes máximos de disminución en la magnitud de las respuestas de 34%, 72% y 76%, respectivamente. Variar el contenido de agua en el material de subrasante incrementa la magnitud de las respuestas críticas analizadas.

Palabras clave: ABAQUS, elementos finitos, geosintético, respuestas críticas, HVS.

Evaluación del aporte mecánico de un geosintético como material de refuerzo en los pavimentos flexibles, ante distintas configuraciones cargas reales.

Evaluación del aporte mecánico de un geosintético como material de refuerzo en los pavimentos flexibles, ante distintas configuraciones de cargas reales

PRISCILLA VILLEGAS GÓMEZ

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Enero de 2019

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Prefacio	1
Resumen ejecutivo	2
Introducción.....	6
Marco teórico.....	8
Metodología.....	21
Resultados	26
Análisis de los resultados.....	70
Conclusiones	79
Recomendaciones	80
Apéndices.....	81
Referencias	82

Prefacio

El constante aumento de la flota vehicular tanto de carga liviana como de carga pesada en Costa Rica ha impulsado a los ingenieros del Gobierno y de empresas privadas a buscar mecanismos que ayuden a alargar la vida útil de las carreteras, a abaratar costos e inclusive a incrementar su capacidad estructural. Para cumplir con este objetivo, se han empleado diversos métodos de refuerzo en su estructura, como el mejoramiento con cemento de las bases granulares o la implementación de geosintéticos.

La utilización de los geosintéticos ha demostrado ser un mecanismo de refuerzo muy útil. Sin embargo, los procesos de diseño para incluirlos en una estructura de pavimento flexible son aún muy empíricos y no permiten considerar las condiciones reales a las cuales va a estar sometido el material o la estructura como tal. Uno de los factores más determinantes y que no está incluido dentro de los diseños para la implementación de geosintéticos, es la carga y la configuración de esta; pues, por simplificaciones, se utiliza una carga circular igual que los *softwares* de multicapa elástica y muchas veces el comportamiento no es tan regular, lo cual genera que los esfuerzos reales que experimenta el pavimento excedan los considerados en el diseño y afecta directamente el desempeño de la estructura, además de disminuir su vida útil. Otro factor importante que no es posible considerar es el contenido de agua que poseen los materiales, específicamente el material de subrasante, el cual es el más afectado por esta variable.

El proyecto plantea cuantificar el aporte mecánico de un geosintético en una estructura de pavimento flexible, por medio de la metodología de elemento finito, ante distintas configuraciones de carga y dos escenarios de contenido de humedad el óptimo y el saturado respectivamente.

Agradecimientos

En primer lugar, le agradezco a Dios por brindarme la oportunidad de estudiar en el Tecnológico de Costa Rica y por guiarme durante el desarrollo de mi carrera.

A mi familia, que es mi pilar y que ha sido mi apoyo incondicional a lo largo de este proceso. Principalmente, a mis padres, quienes son mi ejemplo a seguir como persona y futura profesional.

A mi profesor guía, el Ingeniero Sergio Fernández, principalmente por mediar con los ingenieros de Lanamme UCR, para poder llevar a cabo mi proyecto dentro de la institución y por su apoyo e interés a lo largo de su desarrollo.

Al Ingeniero José Pablo Aguiar, por permitirme realizar el proyecto bajo su tutela dentro de Lanamme, por guiarme e instruirme desde el inicio hasta la culminación de este proceso.

Al Ingeniero Daniel Clark, por su dedicación, disposición y paciencia durante el desarrollo de este proyecto.

Al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), por brindarme la oportunidad de llevar a cabo mi proyecto de graduación dentro de su institución y por facilitarme los recursos e información necesaria para su correcto desarrollo.

Finalmente, a mis amigos más cercanos que han sido un soporte fundamental durante estos años.

Resumen ejecutivo

Con el objetivo de cuantificar el desempeño de un geosintético de alto módulo dentro de una estructura de pavimento flexible, se realizó una serie de modelos de elementos finitos en el *software* ABAQUS. Los modelos constan de cuatro capas, las cuales son: una carpeta asfáltica de 13,2 cm de espesor, una base granular de 31,0cm, una subbase granular de 30,1cm y la subrasante. El geosintético se encuentra colocado en la interfaz de la carpeta asfáltica y la base granular, pues, acorde a la revisión bibliográfica, es el punto de colocación donde presenta mayor disminución en las respuestas críticas (Saad, Mitri, & Poorooshasb, 2006).

Dentro de las variables consideradas en los modelos se encuentran el contenido de agua en la subrasante, la carga aplicada y la presión de los neumáticos. El proyecto fue desarrollado bajo la línea de investigación de LanammeUCR con el fin de emplear los datos obtenidos para una posible validación a escala real que, por limitaciones de tiempo, no se pudo realizar en este trabajo.

La metodología empleada para la realización del proyecto se compone de cuatro etapas principales de modelación:

1. Análisis de sensibilidad de malla.
2. Validación del modelo con el *software* de multicapa elástica.
3. Modelación de las configuraciones de carga.
4. Creación de modelos definitivos.

En la primera etapa, se realizó un análisis de sensibilidad de malla para determinar cuál era la distribución de elementos más eficiente, en la cual se obtenían la convergencia de los resultados.

Se procede a realizar la validación por medio del *software* de multicapa elástica desarrollado en LanammeUCR, denominado PITRAPave. Se determinaron cinco distintos puntos de control dentro de la estructura y se compararon las respuestas obtenidas en el *software* de multicapa elástica y el modelo de elementos finitos.

Para alcanzar la convergencia de los datos, fue necesario realizar un análisis de profundidad y variar el tipo de elementos dentro del modelo de elementos finitos. Se emplearon elementos cuadráticos del tipo C3D20R para la estructura y M3D8R para el geosintético, el cual es un elemento membrana según la codificación del programa ABAQUS.

Luego de obtener las dimensiones y la distribución de la malla definitivas, se realizó la modelación de carga. Esto consiste en adaptar los datos suministrados por LanammeUCR de cargas y presiones en un sistema de coordenadas compatible con el modelo de elementos finitos. Seguidamente, estos se introducen como un archivo de puntos denominado "AnalyticalField" en el *software* ABAQUS. Se elaboraron seis configuraciones de carga distintas: dos magnitudes de carga distintas 41,5kN y 61,7kN a tres presiones diferentes 80,100 y 115psi (552,689 y 793 kPa). Los datos de estas cargas y presiones se obtuvieron mediante un sensor plano de presión colocado debajo de los neumáticos del Simulador de Vehículos Pesados (HVS por sus siglas en inglés). Este equipo se utiliza para los ensayos acelerados de pavimentos; además este es capaz de reproducir de manera acelerada el efecto de los vehículos sobre las estructuras de pavimento (Loría & Aguiar, 2012).

En la cuarta etapa, se elaboraron los modelos definitivos, veinticuatro en total; en estos, se variaron las cargas, las presiones, el contenido de agua y la adición de geosintético. En el cuadro 1, se especifican las características de los materiales empleados en el modelo.

CUADRO 1. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES				
Capa	Espesor (m)	Módulo de Young (MPa)	Módulo de Poisson	Propiedades del material
Carpeta Asfáltica	0,132	3800	0,35	Isotrópico, elástico lineal
Geosintético	0.004	72000	0,35	Isotrópico, elástico lineal
Base	0,310	300	0,4	Isotrópico, elástico lineal
Subbase	0,301	200	0,4	Isotrópico, elástico lineal
Subrasante	3,257	Variable	0,45	Isotrópico, elástico lineal

El contenido de agua se varió únicamente en el material de subrasante y se empleó una ecuación calibrada desarrollada en la tesis de maestría *Efecto del contenido de agua en el módulo resiliente de las subrasantes*, la cual fue desarrollada en el LanammeUCR. Se tomaron en cuenta únicamente dos contenidos de agua: el contenido óptimo de agua y el contenido saturado de agua, considerando el concepto de succión incluido dentro de la ecuación, pues el suelo presenta un valor de succión igual a 10kPa cuando el contenido de agua es saturado y de 70kPa cuando el contenido de agua es óptimo. Se realizó un proceso iterativo hasta obtener la convergencia del valor del módulo resiliente para la subrasante en estas dos condiciones y para la condición de carga más crítica, la cual es 61,7kN de carga aplicada y 115psi (793kPa) de presión en los neumáticos.

De los modelos, se obtuvieron las principales respuestas críticas en una estructura de pavimento flexible en seis distintos puntos de control que están en la superficie de la carpeta asfáltica, en la fibra inferior de la carpeta, en el medio de la capa de base, en el medio de la capa de la subbase y en la fibra superior de la subrasante. Las respuestas obtenidas son la deformación unitaria vertical, deformación unitaria radial, esfuerzos verticales, esfuerzos radiales y deflexión.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el geosintético tiene un efecto más significativo cuando se encuentra en el plano horizontal, puesto

que es el plano de acción del geosintético; es decir, en las deformaciones unitarias radiales y en los esfuerzos radiales. Para las respuestas en el plano vertical, el efecto o la disminución en las magnitudes es menor, ya que no es el plano de acción del geosintético. Referente a la deflexión, se obtiene la disminución más significativa en superficie de la capa asfáltica. En las Figuras 1 y 2, se grafica el comportamiento de esta respuesta con respecto a las variables planteadas.

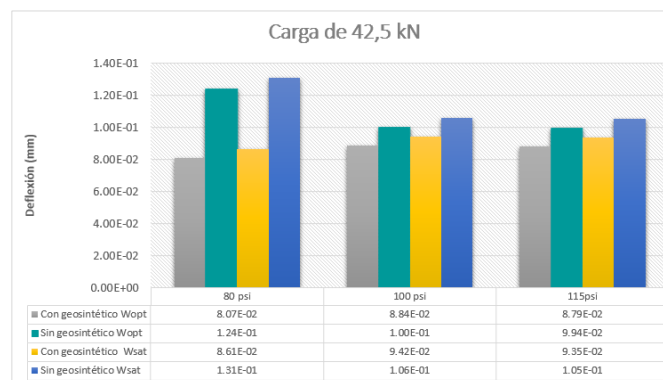


Figura 1. Deflexión en la superficie de la capa asfáltica.

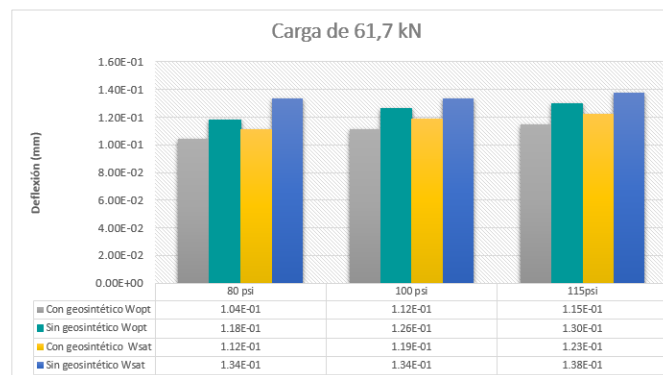


Figura 2. Deflexión en la superficie de la capa asfáltica.

Para las deformaciones unitarias verticales, se dan los valores máximos en la mitad de la capa de la base granular y es donde el geosintético tiene mayor efecto, pues, los porcentajes de disminución son mayores. Para los modelos de 42,5kN de carga, van desde 15,0-46,1% cuando el contenido de agua es óptimo, y desde 15,1-45,9% para el contenido saturado de agua. En cuanto a los modelos de 61,7kN de carga, los valores van desde 15,1-15,6% cuando el contenido de agua es óptimo y, desde 15,5 - 21,2%, para el contenido saturado de agua.

Referente a las deformaciones unitarias radiales, se obtiene que la máxima respuesta se

da en la fibra inferior de la capa asfáltica y es donde se presenta el porcentaje de disminución mayor al adicionar un material geosintético. Hay una disminución de 63,1-71,9% para los modelos con 45,5kN de carga con el contenido óptimo de agua y una disminución que va desde 62,7-72,0% para aquellos con el contenido saturado de agua con esta misma carga. Los resultados de los modelos con 61,7kN corresponden a 60,7-61,6% de disminución para aquellos con un contenido óptimo de agua y de 61,2-64,6% para los que se encuentran en estado saturado.

En relación con los esfuerzos verticales, se obtiene la disminución más significativa en la fibra inferior de la capa asfáltica en los modelos con 42,5kN de carga. La disminución en la respuesta debido a la adición de geosintético varía entre 13,5 – 18,6% para el contenido óptimo de agua y entre 13,6 – 18,7% para el contenido saturado de agua. En el caso de los modelos con una carga de 61,7kN, esta varía entre 18,8 – 19,0 % para el contenido óptimo de agua y para el contenido saturado de agua, los valores van desde el 18,9 – 26,2%.

Con respecto a los esfuerzos radiales, se obtienen los mayores porcentajes de disminución en la respuesta a la adición de geosintético. Se obtuvo para los modelos con 42,5kN de carga una disminución en la respuesta que varía entre 67,7–76,8% para el contenido óptimo de agua y el contenido saturado de agua. En el caso de los modelos con una carga de 61,7kN, esta varía entre 65,7-66,4% para el contenido óptimo de agua y para el contenido saturado de agua, esta va desde el 66,3 -69,4%.

Luego de la obtención de los resultados, se realizaron unos modelos de respuesta mediante una regresión lineal múltiple para la deflexión y las deformaciones unitarias tanto verticales como radiales. En el cuadro 2, se muestran las ecuaciones obtenidas.

CUADRO 2. MODELOS DE RESPUESTA		
Parámetro	Modelo	R ² Ajustado
Deflexión (mm)	$U_3 = -5,89 \times 10^{-9} * X_1 - 9,56 \times 10^{-7} * X_2 - 9,80 \times 10^{-5} * X_3 - 7,45 \times 10^{-6} * X_4 + 1,14 \times 10^{-5} * X_5 + 3,27 \times 10^{-4}$	0,9312
Deformación unitaria vertical	$E_{33} = -1,66 \times 10^{-6} * X_1 - 5,93 \times 10^{-6} * X_2 - 4,67 \times 10^{-3} * X_3 - 1,50 \times 10^{-6} * X_4 + 1,70 \times 10^{-5} * X_5 + 6,47 \times 10^{-4} * X_3^2 - 4,28 \times 10^{-7} * X_1 * X_2 + 1,49 \times 10^{-6} * X_3 * X_2 + 8,33 \times 10^{-3}$	0,7475
Deformación unitaria radial	$E_{11} = -6,87 \times 10^{-9} * X_1 + 1,17 \times 10^{-7} * X_2 + 4,54 \times 10^{-3} * X_3 + 7,55 \times 10^{-7} * X_4$	0,6037

Por medio del análisis de las respuestas críticas del pavimento, se determina que la adición de geosintético genera reducciones considerables en la deflexión, los esfuerzos verticales y las deformaciones unitarias tanto verticales como radiales. La respuesta que no genera mayores cambios ante el refuerzo corresponde a los esfuerzos verticales.

La variación en el contenido de agua de los modelos tiene una mayor afectación en la respuesta de las deflexiones y las deformaciones unitarias verticales.

Se concluye que a medida que la presión aumenta, la disminución en los valores de las respuestas debido al geosintético es menor.

Para los modelos de respuesta generados, se obtuvo un coeficiente de determinación (r²) de 0,9312 para el modelo de la deflexión, de 0,7475 para el modelo de respuesta en la deformación unitaria vertical y de un 0,6037 para el de la deformación unitaria radial. En otras palabras, la variación de estas respuestas tiene una relación del 93,12%, 74,75% y 60,37%, respectivamente, con las variables planteadas.

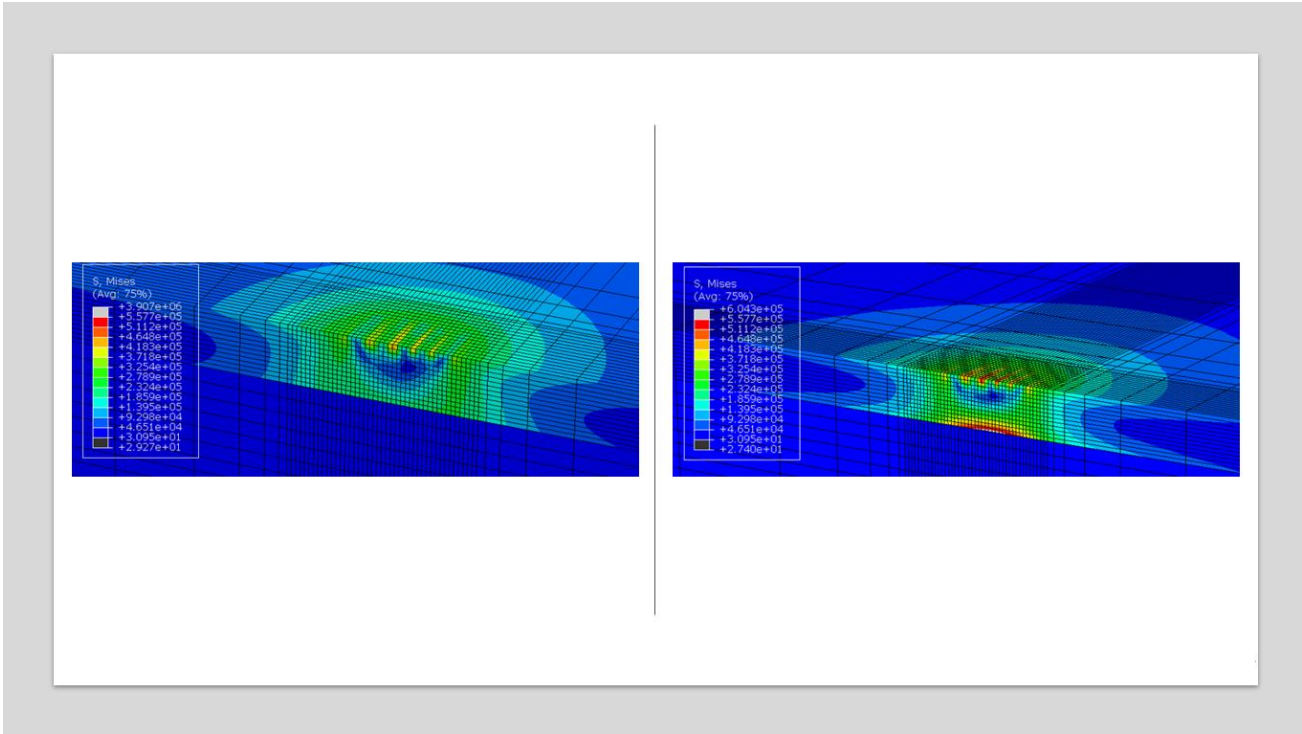


Figura 3. EVALUACIÓN DEL APORTE MECÁNICO DE UN GEOSINTÉTICO COMO MATERIAL DE REFUERZO EN LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES, ANTE DISTINTAS CONFIGURACIONES DE CARGAS REALES

Introducción

Una estructura de pavimentos flexible está constituida por una serie de materiales con comportamientos mecánicos muy diversos. Por un lado, la mezcla asfáltica presenta un comportamiento viscoelástico directamente relacionado con la temperatura, por otro lado, los materiales granulares tienen un comportamiento de no linealidad y anisotropía ante la presencia de cargas. Además, la resistencia mecánica del suelo o de la subrasante es ampliamente afectada por las condiciones del sitio. Por tanto, en un diseño tradicional de pavimento, es imposible considerar la innumerable serie de variables que traen consigo los materiales que la componen; pues, los métodos tradicionales son bastante simplificados.

El deterioro de una estructura de pavimento flexible es ocasionado por diversos factores; por ejemplo, la baja calidad de los materiales granulares ya que contienen un alto porcentaje de finos aceleran el proceso de deterioro. También, se da por las condiciones ambientales como el cambio de humedad y variaciones en la temperatura. Además, la aplicación reiterada de las cargas de tráfico a través de las ruedas puede originar una falla estructural o funcional del pavimento (Zornberg, 2013). Asimismo, la falta de mantenimiento de las estructuras provoca que la capacidad estructural disminuya.

Uno de los mecanismos para aminorar el deterioro o incrementar la capacidad estructural de los pavimentos es la adición de geosintéticos. Aunque su primer aplicación o aparición del concepto en la comunidad científica data desde 1968, las metodologías de diseño o el dimensionamiento en pavimentos con geosintéticos no han tenido mucho avance en los últimos años. Además, estas se han basado en procedimientos muy empíricos, lo que ha dificultado determinar cuál es el aporte real al implementar este tipo de materiales.

Existe un método mediante el cual se puede determinar el aporte real de un geosintético, por medio del desarrollo de un modelo numérico de análisis racional de pavimentos y es el método de elementos finitos o modelos FEM. Este método cuenta con una serie de ventajas; pues, es posible considerar características específicas en los materiales como temperatura en la capa asfáltica, curvas de esfuerzo deformación, cohesión de los materiales (modelo elastoplástico de Mohr-Coulomb), adición de geosintético (Rodríguez & Pallares, 2005).

Diversos estudios han determinado por medio de la metodología de elemento finito los amplios beneficios de la inclusión de geosintético dentro de una estructura de pavimento flexible; sin embargo, en la mayoría de las investigaciones consultadas, se utiliza una carga uniforme en un radio determinado. El presente proyecto difiere en las configuraciones de carga aplicada, ya que con la ayuda de un medidor de presión plano colocado en el HVS se determinaron los datos de la presión generada por dos distintas cargas (42,5 kN - 61,7kN) a tres presiones diferentes (552 kPa, 689kPa 793kPa).

Objetivos

Objetivo general

Cuantificar el desempeño de un geosintético como material de refuerzo en una estructura de pavimento flexible, bajo el efecto de diversas configuraciones de carga que varían con la presión de inflado, mediante la metodología de elemento finito.

Objetivos específicos

- Desarrollar una serie de modelos FEM de estructuras de pavimento flexible con la presencia de geosintéticos como material de refuerzo, variando las configuraciones de carga y el contenido de agua en el material de subrasante.
- Evaluar y analizar las respuestas críticas en la estructura de pavimento, cuando el modelo tiene la adición de geosintético y cuando no la posee.
- Elaborar una serie de modelos de respuesta mediante una regresión lineal múltiple, para los distintos casos planteados.

Marco teórico

Estructura del pavimento

El pavimento es una estructura conformada por capas de distintos materiales con espesores definidos, lo cual permite la transferencia de esfuerzos por las cargas de tránsito y el ambiente, al terreno natural o subrasante, de manera que no exceda su capacidad de soporte. Adicionalmente, esta debe proveer una superficie de ruedo cómoda y segura durante un periodo de tiempo establecido. La estructura debe asegurar durabilidad ante agentes climáticos y acción del tránsito (Castro, 2017).

Las estructuras de pavimentos se dividen en tres categorías principales:

- Pavimentos flexibles: Este tipo de estructuras está compuesto por una superficie de rodamiento de concreto asfáltico apoyada sobre dos capas de material granular, que conforman la base y la subbase.
- Pavimentos rígidos: Se caracterizan por poseer como superficie de rodadura una losa de concreto hidráulico que descansa sobre una capa de material granular, ya sea una base o subbase. Este tipo de estructuras posee una rigidez mayor que el material asfáltico, por lo cual distribuyen los esfuerzos transmitidos en una mayor área y provocan deflexiones pequeñas en comparación a los pavimentos flexibles.
- Pavimentos semi-rígidos: Este tipo de pavimentos consiste en una capa superior de material asfáltico que descansa sobre una base mejorada. Esto quiere decir que es material granular tratado con cemento hidráulico, lo cual le brinda al pavimento una mejor capacidad estructural.

Los daños y deterioros que presentan los pavimentos flexibles están relacionados con los agentes climáticos a los cuales están expuestos, así como a las condiciones de carga, a las que se ven sometidos. Los principales daños y deterioros se clasifican de la siguiente manera según el CIC Centroamérica:

Agrietamiento	Deformación
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Longitudinal asociado con cargas.	<input type="checkbox"/> Consolidación
<input type="checkbox"/> Longitudinal no asociado con cargas.	<input type="checkbox"/> Flujo plástico
<input type="checkbox"/> Térmico.	<input type="checkbox"/> Corrugaciones
<input type="checkbox"/> Por reflejo.	<input type="checkbox"/> Separación de capas
Desnudamiento	Otros
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Agrietamiento por desprendimientos	<input type="checkbox"/> Exudación
<input type="checkbox"/> Desprendimientos	<input type="checkbox"/> Irregularidad superficial
	<input type="checkbox"/> Carencia de adherencia llanta/pavimento

(CIC, 2017)

Con el fin de asegurar que una estructura de pavimento cumpla con el período de diseño establecido, se le debe dar un mantenimiento periódico y mitigar los deterioros que presenten. De no ser así, se corre el riesgo de que la estructura alcance su estado de falla.

Las fallas se dividen en dos tipos:

- **Funcional:** La superficie de rodadura deja de ser segura y cómoda, lo cual ocasiona costos de operación y transporte, excesivos para el usuario.
- **Estructural:** Ocurre cuando los esfuerzos transmitidos a la subrasante o terreno natural superan la capacidad de soporte de esta. Para alcanzar este tipo de falla, las capas superiores deben presentar un estado de deterioro muy avanzado.

Geosintéticos

Acorde el registro histórico, se cree que las primeras aplicaciones de los geotextiles fueron en tejidos industriales utilizados en la década de los 50. Uno de los primeros casos documentados fue una estructura de muelle construido en Florida en 1958. Luego, el primer geotextil no tejido fue desarrollado en 1968 por la empresa Rhone Poulence en Francia (Geotexan, 2012).

Seguidamente, en la *Conferencia Internacional sobre el Uso de Tejidos en Geotecnia*, celebrada en París, el Dr. J. P. Giroud presentó un documento sobre la presa de Valcros en Francia, utilizando las palabras "geotextiles" y "geomembranas". A partir de ese momento, se incentivó la investigación y desarrollo tecnológico de este tipo de materiales dentro de la comunidad científica, así como la normativa a emplear, hasta lograr alcanzar el nivel de conocimiento que se tiene en la actualidad sobre estos materiales.

Los geosintéticos se definen como productos laminares obtenidos a partir de polímeros derivados del petróleo, diseñados para mejorar y llevar a cabo la ejecución de cierto tipo de proyectos de construcción en ingeniería civil y geotécnica, como material de refuerzo, para redistribución esfuerzos, drenajes, filtración y control de erosión.

Según la ASTM D4439, un geosintético es un producto plano fabricado de materiales poliméricos usado en suelos, rocas u otros materiales de ingeniería geotécnica como parte

integrante de un proyecto, estructura o sistema hecho por el ser humano.

Los geosintéticos poseen distintas derivaciones. En la siguiente imagen, se muestran los tipos de geosintéticos.

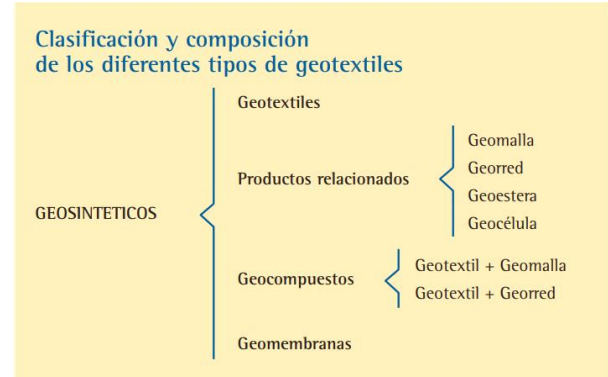


Figura 2. Clasificación de los productos geosintéticos. (Ballester, Castro, & Gil, 2000)

Tipos de geosintéticos

- **Geotextiles:** Se definen como material textil plano, permeable sintético, resistente al punzonamiento y la tensión (PAVCO, 2006). Este tipo de material posee una alta durabilidad, ya que su composición en gran parte está formada por materiales sintéticos, principalmente por poliamidas, poliésteres y poliolefinas. Asimismo, los geotextiles se clasifican acorde al método de fabricación empleado, origen de los polímeros y presentación de los polímeros.

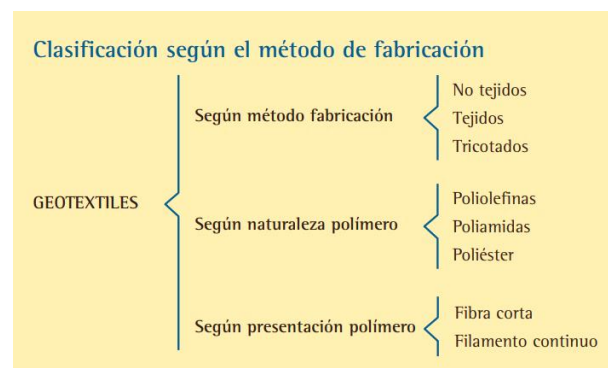


Figura 3. Clasificación de geotextiles. (Ballester, Castro, & Gil, 2000)

- **Productos relacionados:** Se refiere a un tipo de geosintético que funciona de

manera similar a los geotextiles, pero posee resistencia a la tracción. Este se está fabricado mediante entrelazado y ligadura de fibras y filamentos. Los utilizados con más frecuencia son las geomallas y georedes. Principalmente están fabricados de poliéster, PVA o fibra de vidrio.

- Geocompuestos: Estos materiales están conformados por la combinación de dos o más geosintéticos, con el fin de aprovechar las características y funciones de los materiales que los constituyen (Durand, 2018). Se emplean de la misma manera que los geotextiles. El tipo de geocompuesto más utilizado es el conformado por geotextil más geomalla, en los sistemas de drenaje.
- Geomembranas: Son láminas delgadas, flexibles e impermeables utilizadas como barreras hidráulicas. Al ser sus materiales constituyentes de origen sintético poseen una alta resistencia a los agentes químicos y a los rayos UV, lo cual le da una gran resistencia al paso del tiempo. Actúan como barrera ante el paso de líquidos y/o gases. Son fabricadas en distintos espesores y principalmente se utilizan para impermeabilizar cubiertas y fachadas, así como la protección de terrenos en la agricultura. (Tex Delta, 2018).

Los materiales geosintéticos desarrollan distintas funciones dentro de un proyecto de ingeniería civil y geotécnica. Las funciones que desempeñen va a depender directamente de la composición de estos. Según la Sociedad Internacional de Geosintéticos, las funciones primarias son las siguientes:

- Separación: Se utilizan para separar dos estratos de suelo distintos, que poseen características físicas diferentes como el tamaño de sus partículas, plasticidad entre otras. Por ejemplo, los geotextiles son usados para prevenir que materiales de base penetren suelos blandos de estratos subyacentes, con lo cual se mantiene la espesura de diseño y la integridad de la vía (Durand, 2018).

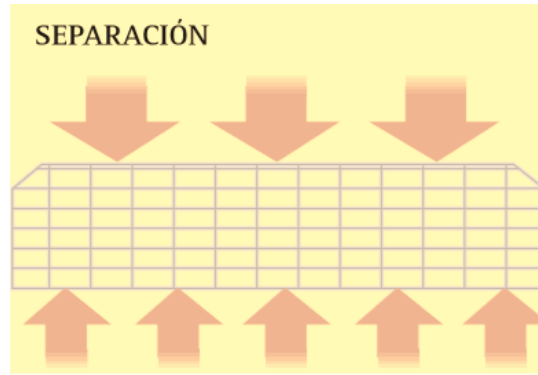


Figura 4. Función de los Geosintéticos. (Ballester, Castro, & Gil, 2000)

- Filtración: El geosintético cumple con la función de evitar la migración de partículas finas de suelo, pero permite el flujo de agua o líquido a través del estrato.

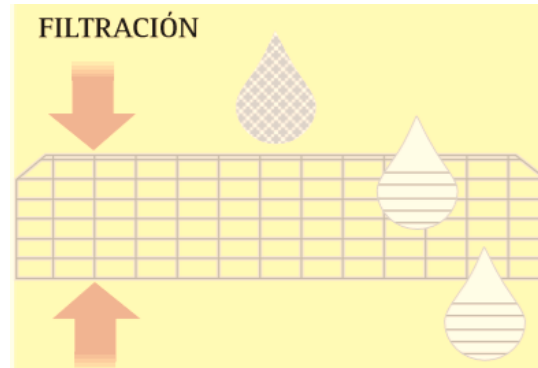


Figura 5. Función de los Geosintéticos. (Ballester, Castro, & Gil, 2000)

- Drenaje: Se utilizan en sistemas de drenajes para conducir y evacuar el agua o fluidos a través de suelos menos permeables.

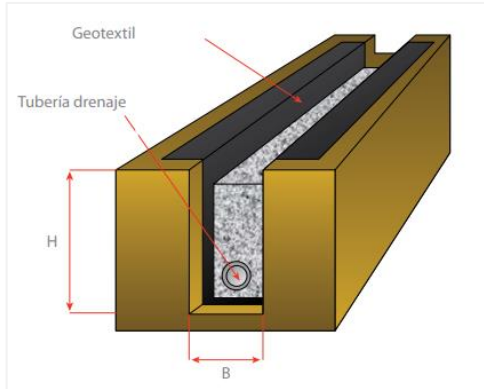


Figura 6. Función de drenaje en los Geosintéticos. (PAVCO, 2006)

- Protección: Esta función es básicamente actuar como un escudo para el suelo o membranas de agentes físicos como las perforaciones y la erosión.

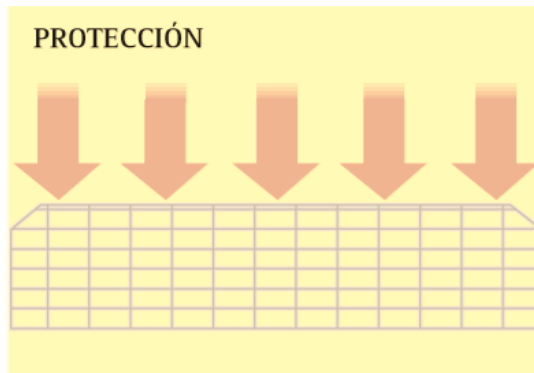


Figura 7. Función de protección de los Geosintéticos. (Ballester, Castro, & Gil, 2000)

- Refuerzo: Incrementan la capacidad portante del suelo y la estabilidad en la construcción (Ballester, Castro, & Gil, 2000). Además, ayudan a mejorar la resistencia a la deformación y al corte, ya que distribuyen mejor los esfuerzos que son transmitidos a la estructura. Dentro de esta misma función, también existen dos mecanismos o maneras de emplear los geosintéticos en lo que a refuerzo se refiere. Son utilizados como un sistema intercapa para retardar el reflejo de grietas mediante la disipación de la energía almacenada, por medio del cambio en la dirección vertical a horizontal en la interfaz entre el refuerzo y el material existente (Sudersanan,

Rajagopal & Veeraragavan, 2014 [citado en Leiva 2016]).

El otro método utilizado es para reducir las grietas por fatiga. El agrietamiento por fatiga en la capa asfáltica es uno de los deterioros más comunes de los pavimentos flexibles. Este se ve agravado en Costa Rica por las condiciones de humedad características tanto de los materiales granulares como de aquellas inducidas por el daño de la humedad (Leiva, Loría, Aguiar, & Leiva, 2015). La adición de geosintético da como resultado el desarrollo de menores deformaciones verticales del agregado; además, controla el desarrollo de surcos. También, puede esperarse que un incremento en el módulo del suelo resulte en menores deformaciones dinámicas verticales recuperables de la capa asfáltica por lo que se reducirá el efecto de fatiga en la estructura de pavimento flexible (Fiorini, 2007).

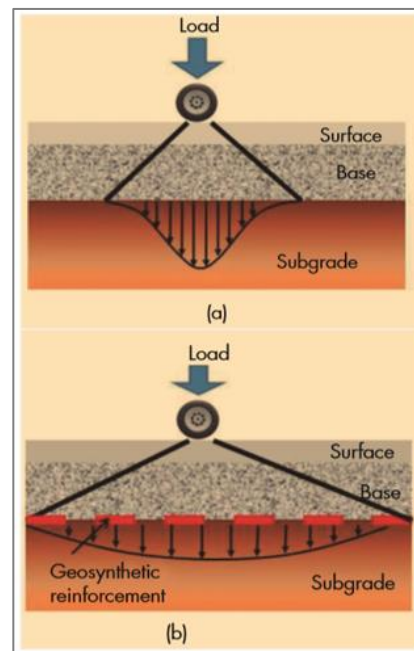


Figura 8. Función de refuerzo de los geosintéticos. (Zornberg, 2013)

En la Figura 8, se especifican las funciones que cumplen los distintos tipos de geosintéticos que existen en el mercado.

Geosintéticos	Separación	Refuerzo	Filtración	Drenaje	Barrera
Geotextil	✓	✓	✓	✓	✗
Geomallas	✗	✓	✗	✗	✗
Geored	✗	✗	✗	✓	✗
Geomembrana	✗	✗	✗	✗	✓
Geocompuestos	✓	✓	✓	✓	✓

Figura 9. Funciones desempeñadas por los diversos geosintéticos.
Modificado (Leiva, 2011)

El uso de los geosintéticos dentro de las construcción y diseño de pavimentos flexibles es amplio. Estos materiales desempeñan distintas funciones dentro del pavimento. Tienen como principal objetivo alargar la vida útil de la estructura y hacerla más eficiente durante su período de servicio. La función con la que más frecuencia se utilizan los geosintéticos dentro de una estructura de pavimento es la de refuerzo; es decir, aumentar la capacidad portante y reducir las tensiones sobre la subrasante.

Normalmente el refuerzo con geosintético se coloca en la interfaz entre las capas de base y subbase, o subbase y subrasante; también, en el interior de la base del pavimento flexible. (Zornberg, 2013). Saad, Mitri & Poorooshasb (2006) realizaron una investigación en la cual se colocó un refuerzo de geosintético de alto módulo en tres distintas posiciones en la interfaz de la capa asfáltica y la base, a 1/3 del fondo de la base y en la interfaz de la base y la subbase. Cuando el refuerzo se encontraba en la primera posición, se daban las mayores reducciones en los esfuerzos de fatiga en la estructura.

Actualmente, las investigaciones han demostrado que de acuerdo con el punto en el cual se coloque el geosintético, la estructura modifica su comportamiento; además, este determina en cuales respuestas es más beneficioso. En Costa Rica, se está implementando el uso de geogrillas en procesos de recarpeteo entre la capa asfáltica perfilada y la sobrecapa, para aminorar el reflejo de grietas; asimismo, en la interfaz de la base granular y la capa asfáltica (Fernández, 2018).

El comportamiento de una estructura de pavimento reforzada con geosintéticos funciona mediante tres mecanismos posibles, según Holtz, 1998 son:

1. Restricción lateral: Cuando una capa de agregado se carga por una rueda o pista, el agregado tiende a moverse o empujarse lateralmente, a menos que esté restringido

por la subrasante o refuerzo geosintético. Los suelos de subrasante suaves y débiles proporcionan muy poca restricción lateral; por ello, cuando el agregado se mueve lateralmente, se desarrollan surcos en la superficie del agregado y también en la subrasante. Una geomalla con buenas capacidades de enclavamiento o un geotextil con buenas capacidades de fricción puede proporcionar resistencia a la tracción al movimiento lateral agregado.

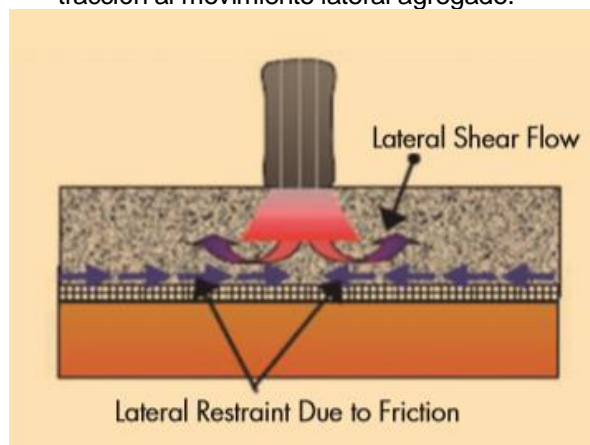


Figura 1. Método de confinamiento lateral.
(Zornberg, 2013)

2. Incremento de la capacidad de soporte: Otro de los mecanismos se da cuando el refuerzo geosintético obliga a la superficie potencial de falla de la capacidad de carga a seguir una trayectoria alternativa de mayor resistencia. Esto tiende a aumentar la capacidad de carga de la calzada.

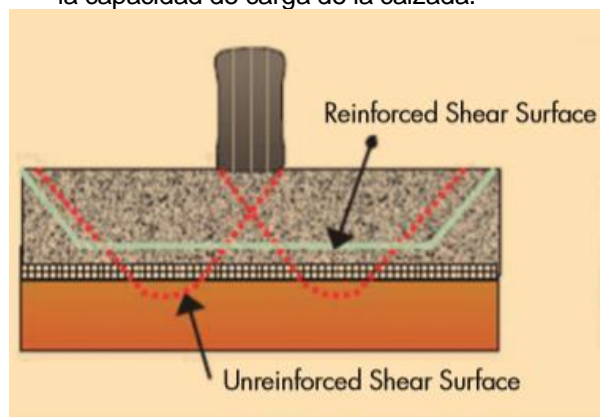


Figura 2. Método aumento de la capacidad de soporte.
(Zornberg, 2013)

3. Efecto de la membrana tensionada: En este caso, las tensiones de carga de la rueda

deben ser lo suficientemente grandes como para causar deformación plástica y surcos en la subrasante. Si los geosintéticos tienen un módulo de tracción suficientemente alto, se desarrollarán tensiones en el refuerzo y el componente vertical de esta membrana tensionada ayudará a soportar las cargas de rueda aplicadas.

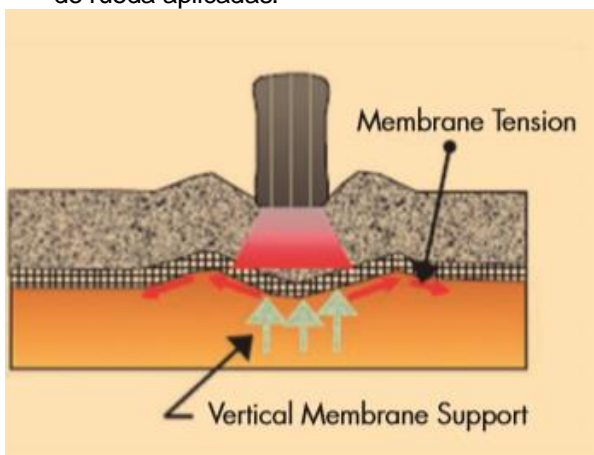


Figura 3. Efecto de membrana tensionada. (Zornberg, 2013)

Presión de inflado de los neumáticos

La presión de inflado de las llantas que transmiten las cargas al pavimento tiene una incidencia directa en los daños que sufre la estructura. Sin embargo, no es el único factor por considerar; pues, también es necesario tomar en cuenta la estructura y el tipo de llanta, así como la carga que soportan.

La primera aplicación del neumático a un vehículo de motor fue llevada a cabo por André y Edouard Michelin en el año de 1898. En la actualidad, todos los vehículos automotores utilizan ruedas neumáticas, que se componen de la rueda y la cubierta con o sin cámara de aire. En el interior de esta cubierta, se inyecta aire a presión con el fin de proporcionar la rigidez adecuada que permita al conjunto soportar las sollicitaciones a las cuales será sometido.

Se denomina neumático al conjunto de la cubierta y la cámara de aire en caso de tenerla, montado sobre la llanta.

La rueda y el neumático tienen como función principal transmitir las fuerzas longitudinales, verticales y transversales entre el

vehículo y la calzada. (Luque, Álvarez, & Vera, 2008). Es importante hacer la respectiva definición de lo que se conoce comúnmente como llantas; pues, son tres distintos componentes: la llanta, la rueda y el neumático según (Luque, Álvarez, & Vera, 2008).

- Rueda: Corresponde al componente giratorio que soporta la carga y está situado entre el neumático y el eje.
- Llanta: Este componente es parte de la rueda y está constituida por una o varias piezas; además, pueden presentar diversos perfiles de la sección transversal.
- Neumáticos: Es el conjunto de la cubierta y la cámara de aire con presión en su interior, montadas sobre la correspondiente llanta.

Los neumáticos son el único nexo entre la estructura de pavimento y el vehículo, por ende, estos se encargan de desempeñar diversas funciones, a saber:

- Brinda las características dinámicas y de seguridad necesarias como el coeficiente de adherencia y el soporte de esfuerzos transversales en cualquier condición operativa.
- Ofrece al usuario confort en cuanto al amortiguamiento debido a las grietas e irregularidades del pavimento, así como la maniobrabilidad del volante al presentar poca resistencia al giro en velocidades bajas.
- Durabilidad y estabilidad ante las diversas condiciones de la superficie de ruedo.
- Soporte de las cargas para las cuales están diseñados cumpliendo con las condiciones anteriormente mencionadas.

Tipos de neumáticos

Los neumáticos se clasifican principalmente de acuerdo con la estructura de la carcasa. Se entiende por carcasa al sistema de la cubierta encargado de desarrollar la resistencia, ya que soportar la presión de inflado y los esfuerzos exteriores a los cuales se somete el neumático. Está conformada por capas de tela, fibras o cuerdas flexibles superpuestas con un alto

módulo de elasticidad. Se encuentran embebidas en una matriz de hule o caucho este tipo de materiales tienen un módulo de elasticidad bajo (Allen & Sibaja, 2014).

La clasificación se realiza acorde a la disposición de las fibras o tejidos que conforman la carcasa. Esto da a lugar a dos tipos de acomodos:

- Diagonal
- Radial

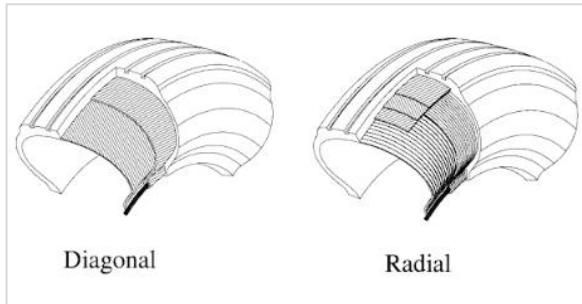


Figura 4. Estructuras básicas de los neumáticos (Luque, Álvarez, & Vera, 2008)

1. Cubierta diagonal: Están formadas por dos capas o más de fibras o tejidos colocadas una superpuesta a la otra de manera oblicua formando un ángulo de entre 20-40° respecto al plano medio del neumático. Al utilizar un mayor ángulo aumenta la flexibilidad en los costados de las llantas, pero aporta poca estabilidad direccional, refiriéndose este concepto a la aptitud del vehículo para mantenerse en una trayectoria determinada. (Clark, 2016)

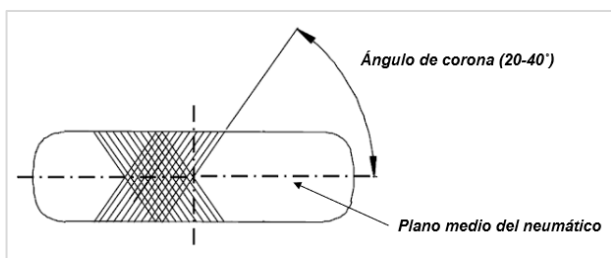


Figura 5. Ángulo de las fibras en neumático diagonal. (Luque, Álvarez, & Vera, 2008)

2. Cubierta radial: Este tipo de cubierta es el más utilizado en la actualidad desde su implementación en los años 60. Consiste en un acomodo de las fibras en sentido radial, formando un ángulo de entre 88-90° con el plano medio del neumático. Este

tipo de configuración en las fibras presenta una serie de ventajas con respecto a los neumáticos diagonales; por ejemplo, tiene un aumento en la rigidez que proporciona una mayor capacidad de soporte a los esfuerzos y un mayor confort al usuario debido a que se crea una menor resistencia a la rodadura, así como una menor generación de calor, pues el acomodo de las fibras requiere menos capas (Luque, Álvarez, & Vera, 2008). Además, cuenta con un cinturón que brinda mayor estabilidad direccional. Las fibras de los cinturones están acomodadas de manera que se formen ángulos alternos opuestos de entre 18-20° con respecto al plano medio.

Interacción neumático-pavimento

La interacción neumático-pavimento depende de la consideración de una serie de factores como la velocidad, coeficiente de fricción, la macrotextura y la microtextura del pavimento, la humedad y la presión de inflado de los neumáticos. No obstante, para la presente investigación, el factor más importante es la presión de inflado de los neumáticos y el efecto que tiene la variación de esta en la estructura de pavimento.

La variación de la presión de inflado en los neumáticos tiene dos efectos principales en la interacción con la estructura de pavimento: área de contacto y presión de contacto.

- Área de contacto: El área de contacto entre el neumático y pavimento está directamente relacionada con la presión de inflado de los neumáticos, ya que cuando un neumático se encuentra con presión insuficiente se genera mayor contacto en los extremos de la banda, con lo cual provoca una disminución en su capacidad de carga, un desgaste prematuro en las paredes de este y un incremento en la temperatura de la llanta debido a la excesiva flexión provocada que como consecuencia puede producir un desprendimiento o falla en las capas que conforman la carcasa de neumático (Allen & Sibaja, 2014). En el caso contrario, cuando el neumático tiene una presión por encima de los límites

recomendados, se genera un aumento de rigidez en este, lo cual ocasiona que el área de contacto disminuya y genere una concentración de esfuerzos, así como un desgaste acelerado en la zona central del neumático.

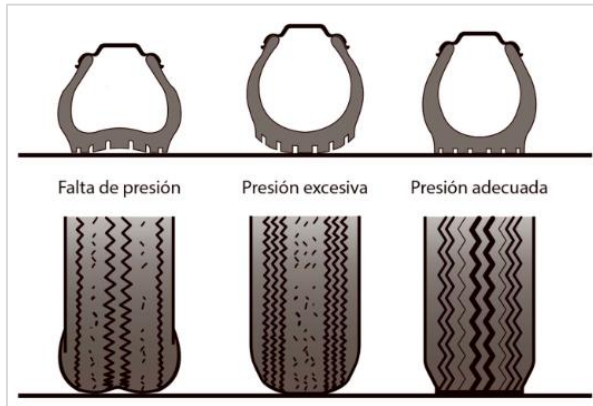


Figura 6. Efecto de la presión de inflado y el área de contacto. (Cerrato, 2018)

- Presión de contacto: Se define como la huella reflejada en el pavimento a causa de la presión de inflado del neumático y la carga que este soporta. El neumático responde a un cambio en la carga transmitida al eje al cambiar significativamente la forma y el tamaño de la huella, con un cambio imperceptible en la presión de inflado. Otro mecanismo mediante el cual cambia la forma y el tamaño de la huella es ajustando la presión de inflado. Cambiar la carga del neumático o la presión de este cambiará significativamente la forma de la distribución de la presión en la huella y los dos efectos no son intercambiables. (Tielking & Roberts, 1987).

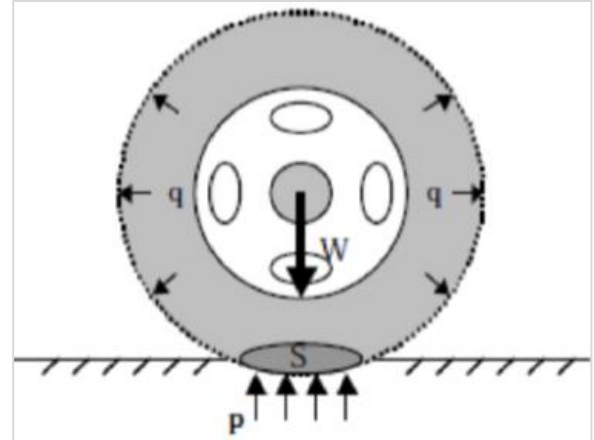


Figura 7. Carga del eje (W), presión de contacto (p), área de contacto (S), presión de inflado del neumático (q). (Wang, 2003)

Efectos de los esfuerzos en la no linealidad de materiales granulares y suelos

Los métodos de diseño de pavimentos suponen que la mayor parte de la acumulación de la deformación permanente ocurre en la capa de la subrasante; sin embargo, en una estructura de pavimento flexible, las deformaciones se dan en todas sus capas. Los ejes de carga generan en las capas de base y subbase deformaciones tanto resilientes (recuperables), como permanentes (plásticas) (Rondón, Triantafyllidis, Wichtmann, & Lizcano, 2008). Por este motivo, es de vital importancia conocer y entender el comportamiento de estos materiales.

En la actualidad, el diseño de pavimento se basa en una serie de modelos mecanísticos, que consideran las propiedades físico-mecánicas de los materiales (Huang, 2004). Se entiende por modelos mecanísticos a todas aquellas representaciones para el análisis del comportamiento de los pavimentos que incluyen las propiedades mecánicas fundamentales de los materiales (Loría L. G., 2014).

El módulo resiliente es aquel utilizado en la teoría elástica. La mayoría de los materiales no son elásticos, pero experimentan alguna deformación permanente después de cada aplicación de carga. Sin embargo, si la carga es pequeña en comparación con la resistencia del material y se repite durante un gran número de veces, la deformación en cada repetición de carga

es casi completamente recuperable (y proporcional a la carga) y puede considerarse elástica. (Huang, 2004). Este índice indica la capacidad de cualquier material para almacenar o absorber energía sin deformarse de manera permanente y se define como la división del esfuerzo desviador o esfuerzo máximo axial repetido entre la deformación axial.

$$M_r = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\varepsilon_r} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Otra propiedad utilizada en el método mecanicista de diseño de pavimentos es el coeficiente de Poisson. La relación de Poisson ν se define como la relación de la deformación lateral a la tensión axial. El coeficiente de Poisson determina cuánto se va a deformar en plano ortogonal a la carga aplicada o en la dirección transversal respecto a lo que se deforma en dirección longitudinal a causa de una carga aplicada a tensión. Al medir las afinidades laterales axiales durante una prueba de módulo resiliente, se puede determinar la relación de Poisson. Debido a que dicha relación tiene un efecto relativamente pequeño en las respuestas del pavimento, es habitual asumir un valor razonable para su uso en el diseño, en lugar de determinarlo a partir de la prueba real (Huang, 2004).

El comportamiento resiliente de los materiales granulares definido por el módulo resiliente se ve afectado por factores como el nivel de tensión, la densidad, el tamaño del grano, el tipo de agregado, la forma de las partículas, el contenido de humedad y la cantidad de aplicaciones de carga (Minkwan, 2007).

Con el fin de considerar todas estas variables dentro de un diseño de pavimento y caracterizar el comportamiento de los materiales de una manera más cercana a la realidad, se han desarrollado diversos modelos que determinan el módulo resiliente de los materiales, ya que esta variable es utilizada en los *softwares* de análisis multicapa para predecir los esfuerzos, deformaciones y deflexiones dentro de un pavimento flexible. Entre los principales modelos utilizados, se encuentran los siguientes:

Modelo K- θ

El modelo K- θ es uno de los más utilizados para determinar el módulo resiliente en función del

estado de tensión. Fue desarrollado en 1971 por Hicks and Monismith mediante la ecuación 2.

$$M_R = K(\theta)^n \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde θ es la primera invariante de esfuerzos es decir $\sigma_1 + 2\sigma_3$, donde σ_1 es el esfuerzo axial y σ_3 el esfuerzo de confinamiento, y K y n son constantes de regresión que son obtenidas de forma experimental. Sin embargo, este modelo cuenta con una deficiencia y es que no toma en cuenta los efectos del esfuerzo cortante (Minkwan, 2007).

Modelo Uzan

En 1985, Uzan transforma el modelo K- θ al considerar el esfuerzo cortante y el esfuerzo desviador como tal, ya que el máximo esfuerzo cortante es igual a $\tau_m = \sigma_d/2$. La ecuación obtenida es la siguiente:

$$M_R = K_1(\theta)^{K_2}(\sigma_d)^{K_3} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Los factores K_1, K_2, K_3 son constantes de regresión obtenidas de manera experimental. Teniendo en cuenta tanto la tensión general como la desviación, el modelo Uzan supera la deficiencia del modelo K- θ que no incluía efectos de cizallamiento y aparentemente encaja mejor con los datos de la prueba que el modelo K- θ . Se demostró que esto era especialmente importante cuando los valores de tensión de confinamiento aplicados sobre la muestra eran mayores que las tensiones del desviador aplicado durante la prueba (Minkwan, 2007).

Modelo Witczak & Uzan

Este modelo se define como el modelo de esfuerzo de corte octaédrico universal y fue desarrollado por Witczak y Uzan en 1988. Considera un cambio en el esfuerzo desviador por el esfuerzo cortante octaédrico, el cual es un parámetro fundamental. Los esfuerzos fueron normalizados utilizando la presión atmosférica. Tiene la misma precisión que el modelo anterior, pues el esfuerzo desviador y el esfuerzo octaédrico son proporcionales (Loría L. G., 2014). La ecuación resultante es la siguiente:

$$M_R = K_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{K_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{K_3} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Los factores K_1, K_2, K_3 son constantes de regresión obtenidas de manera experimental, τ_{oct} es el esfuerzo de cortante octaédrico y P_a es la presión atmosférica. Este modelo fue adoptado por Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG).

En todos los modelos, se considera como variable principal el estado de esfuerzos por medio de la primera invariante de esfuerzos, el esfuerzo desviador y el cortante octaédrico. Sin embargo, estos factores no afectan de la misma forma a los materiales granulares y al suelo; es decir, se comportan de manera distinta. Los materiales granulares presentan el fenómeno de "hardening" o endurecimiento por deformación, esto quiere decir que el módulo resiliente tiende a aumentar conforme mayor sea el estado de esfuerzos. Por otra parte, los suelos muestran el fenómeno de "softening" o ablandamiento por deformación y es una condición totalmente opuesta a la de los materiales granulares, ya que la relación entre el módulo resiliente y el estado de esfuerzos es inversamente proporcional: en cuanto mayor sea el estado de esfuerzos, menor será el módulo resiliente.

Influencia del contenido de agua en el Módulo Resiliente

Un factor que afecta considerablemente el desempeño de los materiales dentro de una estructura de pavimento flexible es el contenido de agua que estos tienen; pues, su comportamiento también varía de acuerdo con esta variable. Sin embargo, los materiales granulares y la subrasante (suelo) no poseen las mismas propiedades mecánicas, por lo que no se comportan de la misma forma y el desempeño es afectado mayoritariamente en el material de subrasante. Según Pappin et al, 1992, una reducción en la saturación del material disminuye las deformaciones de corte resilientes y, por lo tanto, genera un incremento en la rigidez. Además, concluyen que el comportamiento esfuerzo deformación resiliente de materiales granulares saturados es idéntico al seco cuando se permite el drenaje en el ensayo.

Acorde a diversos estudios, ha sido ampliamente reportado que conforme aumenta el contenido de agua, disminuye el módulo resiliente. Esto se debe a que el agua funciona como una especie de lubricante entre partículas, lo cual trae como consecuencia un aumento en las

deformaciones y una disminución de la rigidez del material (Hugo A & Reyes, 2007).

Las condiciones climáticas y geográficas de Costa Rica conforman un ambiente idóneo para precipitaciones constantes y niveles freáticos altos. Por este motivo, es importante tomar en cuenta, en los diseños de una estructura de pavimento, el contenido de agua que tienen los materiales que la constituyen.

En la mecánica de suelos tradicional, se ha basado el estudio del suelo en dos condiciones extremas: cuando está seco o en estado saturado; es decir, un sistema bifásico, ya sea suelo y agua o suelo y aire. No obstante, este tipo de sistemas no siempre representa de manera idónea las condiciones reales del suelo por lo que, en la década de los setenta, se inicia el estudio del comportamiento de los suelos "parcialmente saturados", con las formulaciones de los conceptos y las teorías fundamentales (Meza, 2012). Teniendo como premisa que la interacción de agua suelo funciona como un sistema trifásico que se compone de suelo, agua y aire, esto implica que el estudio de las propiedades y comportamiento del suelo como material estructural, se debe hacer teniendo en cuenta otros conceptos y teorías adicionales a los tradicionalmente impartidos en la cátedra de Mecánica de Suelos (Meza, 2012). Uno de los conceptos fundamentales dentro de la mecánica de los suelos parcialmente saturados es la succión. Según Lee & Wray (1995), se define como succión a la cantidad de energía asociada a la capacidad del suelo para retener agua (Citado en Meza, 2012).

La succión total de un suelo está compuesta por dos componentes: la succión matricial y la succión osmótica. La magnitud de la succión total corresponde al trabajo total de las fuerzas de capilaridad, absorción y osmosis (Ávila, 2017). La succión total posee unidades de presión y se expresa de la siguiente manera:

$$\psi_t = \psi_m + \psi_{osm} \quad (\text{Ecuación 5})$$

La succión matricial es el factor que está directamente ligado a la capilaridad, debido a la tensión superficial en la interfase agua-aire y a la adsorción desarrollada en la superficie de las partículas (Meza, 2012). Además, es igual a la diferencia entre la presión del agua y la presión del aire en los poros.

$$\psi_m = u_a - u_w \quad (\text{Ecuación 6})$$

Por otra parte, la succión osmótica es el factor que considera la energía necesaria para remover una partícula de agua cuando existen sales disueltas en esta. Es decir, la succión total es igual a la succión osmótica cuando el suelo se encuentra saturado.

Ávila, 2017, en su tesis propone la calibración de un modelo para predecir la variación en el Módulo Resiliente (M_r) producto de distintos estados de esfuerzos y del contenido de humedad presente en el suelo. Se calibraron cuatro distintos modelos: Universal Modificado (calibrado), Exponencial, Polinómico y Red Neural. Con los resultados obtenidos, se demuestra que existe una variación importante en el M_r , causado por la inclusión de la succión.

Para el presente trabajo, se incluye como variable el contenido de agua en dos distintas condiciones: el contenido óptimo de agua y el contenido saturado de agua, motivo por el cual se hace uso de los modelos calibrados por Ávila (2017). El modelo exponencial es el que presenta un coeficiente de correlación (r^2) más alto, por ende, se hace uso de este. El modelo se expresa bajo la siguiente ecuación:

$$M_R = k_1 * P_a * e^{\left(k_2 * \frac{\theta_{neto}}{P_a} + k_3 * k_2 * \frac{\tau_{oct}}{P_a} + k_4 * \frac{\psi}{P_a}\right)}$$

(Ecuación 7)

Donde

$$\tau_{oct} = \left[\frac{\sqrt{2}}{3}(\sigma_1 - \sigma_3)\right] \quad \text{(Ecuación 8)}$$

$$\theta = [\sigma_1 + 2\sigma_3] \quad \text{(Ecuación 9)}$$

$$k_1 = 1019,873$$

$$k_2 = 0.203$$

$$k_3 = -0.870$$

$$k_4 = 0.448$$

$$P_a = \text{Presión Atmosférica}$$

$$\psi = 10 \text{ kPa para el contenido saturado de agua}$$

$$\psi = 70 \text{ kPa para el contenido óptimo de agua}$$

Teoría Multicapa-elástica

La teoría en capas fue propuesta por Burmister en 1943, considerando la complejidad de los materiales que componen una estructura de pavimento, cuyas propiedades son muy variables y dependen del tiempo, el historial de carga y las condiciones ambientales (Zaniewski, 1991).

Idealmente, el comportamiento de estos materiales debe describirse utilizando conceptos no lineales de viscoelasticidad que tengan en cuenta numerosas discontinuidades aleatorias. En la actualidad, tal enfoque es bastante inviable; de hecho, la complejidad del problema del pavimento y las incertidumbres involucradas en su definición no justifican el uso de ninguna, sino de las idealizaciones más simples (Ioannides & Khazanovich, 1998). Por ello, Burmister realiza una serie de supuestos en los cuales los miembros de un sistema de pavimento pueden modelarse adecuadamente en muchos casos como compuestos de materiales lineales, elásticos y homogéneos. El planteamiento inicial de Burmister era aplicable a estructuras de dos capas; posteriormente, en 1945, desarrolló soluciones para un sistema de tres capas.

Según Huang, con el advenimiento de las computadoras, la teoría se puede aplicar a un sistema multicapa con cualquier número de capas (Huang 1967, 1968a). Las suposiciones básicas que deben satisfacerse son:

1. Cada capa es homogénea, isotrópica y lineal elástica con un módulo de elasticidad E y una relación de Poisson ν .
2. El material no posee peso propio y es infinito en extensión de área.
3. Cada capa tiene un grosor finito h , excepto que la capa más baja tiene un grosor infinito.
4. Se aplica una presión uniforme q sobre la superficie sobre un área circular de radio a .
5. Las condiciones de continuidad se satisfacen en las interfaces de la capa, según lo indicado por la misma tensión vertical, tensión de corte, desplazamiento vertical y desplazamiento radial. Para una interfaz sin fricción, la continuidad de la tensión de corte y el desplazamiento radial se reemplazan por una tensión de corte cero en cada lado de la interfaz.

Método de Elemento Finito

La descripción de las leyes de la física para problemas dependientes del espacio y el tiempo generalmente se expresa en términos de ecuaciones diferenciales parciales (EDP). Para la

gran mayoría de geometrías y problemas, estas PDE no se pueden resolver con métodos analíticos.

En su lugar, se puede construir una aproximación de las ecuaciones, típicamente basada en diferentes tipos de discretizaciones. Estos métodos de discretización aproximan las EDP con ecuaciones de modelos numéricos, que se pueden resolver utilizando métodos numéricos. La solución a las ecuaciones del modelo numérico es, a su vez, una aproximación de la solución real a las EDP. El método de elementos finitos (FEM) se utiliza para calcular tales aproximaciones (COMSOL, 2018).

Un análisis por medio de la metodología de elementos consiste en la discretización de una estructura geométrica por medio de un número finito de elementos. El número de elementos se encuentran unidos por medio de nodos. La cantidad de nodos está determinada por la densidad de la malla y el tipo de elementos; es decir, la cantidad de elementos en la que se decide dividir la estructura. Una vez que se conocen los desplazamientos de los nodos, se pueden encontrar las tensiones y esfuerzos en cada uno de los elementos (Mazursky, 2006).

Las primeras aplicaciones del método de elementos finitos al análisis de pavimento se realizaron por medio de los Modelos FE Bidimensionales (2-D) o modelos asimétricos o de deformación simple. El enfoque de modelado asimétrico supone que el sistema de pavimento tiene propiedades materiales y geométricas constantes en planos horizontales, y la carga de tráfico es una carga circular aplicada sobre la superficie del pavimento (Wang, 2011).

Con el paulatino avance tecnológico, se prosiguió a llevar el análisis de pavimentos a Modelos FE Tridimensionales. En estos modelos, se podían considerar muchas variables que los modelos asimétricos restringían; por ejemplo, las configuraciones de carga no uniforme, propiedades físico-mecánicas de los materiales que componen la estructura (la anisotropía, no linealidad, viscoelasticidad), además de análisis tanto dinámicos como estáticos.

Según Saad, Mitri & Poorooshab (2006), las principales razones por las cuales se debe implementar modelos 3D al análisis de pavimento se pueden resumir de la siguiente manera:

1. Refleja mejor el complejo comportamiento de los materiales del sistema de pavimento compuesto bajo cargas de tráfico de diferentes configuraciones.

2. Se prefiere cuando se desea la verificación de los resultados del modelo numérico con el laboratorio de los resultados de las pruebas de campo.

3. Es capaz de simular la huella rectangular de la rueda cargada. Cuando se trata de un análisis bidimensional, la forma de la superficie de carga se restringe a un círculo (condición asimétrica del eje) o una tira larga infinita (condición de deformación plana) que no son realistas.

ABAQUS® UNIFIED FEA

El *software* ABAQUS fue creado en 1978 por el Dr. David Hibbitt, el Dr. Bengt Karlsson y el Dr. Paul Sorensen, en la compañía que ellos mismos fundaron con el nombre de Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc. Luego, modificaron el nombre a ABAQUS Inc. hasta la adquisición por parte de la compañía Dassault Systèmes en el 2005. Después de esto, pasó a ser parte de Dassault Systèmes Simulia Corporation, hasta convertirse en lo que es actualmente.

ABAQUS consta de una serie de productos que aplican la metodología de análisis de elementos finitos que es aplicable en diversas áreas industriales y problemas físicos de ingeniería que son muy complejos de resolver por medio de métodos analíticos.

En el sector de la automoción, los grupos de trabajo de ingeniería pueden tener en cuenta las cargas de vehículo completas, la vibración dinámica, los sistemas de varios cuerpos, el impacto/golpe, los elementos estáticos no lineales, el acoplamiento térmico y el acoplamiento estructural acústico gracias a una estructura de datos de modelos común y a una tecnología de solver integrada. (Dassault Systèmes, 2018).

Tipo de elementos

Los modelos en ABAQUS poseen un nombre específico para cada elemento finito que caracteriza su comportamiento de acuerdo con distintas clasificaciones. Depende de la dimensión en la cual se elaboró el elemento: 1D, 2D, 3D. Las clasificaciones son: familia, grados de libertad, número de nodos, formulación e integración.

- **Familia:** Es básicamente el tipo de geometría del elemento. Pueden ser elementos continuos, tipo membrana, tipo Shell, Beam, Frame, elementos infinitos, conectores o tubulares.

- **Grados de libertad:** Esta propiedad se encuentra directamente relacionada con la familia del elemento. Son las variables fundamentales calculadas durante un análisis.
- **Numero de nodos:** Es el número de puntos donde se realiza interpolación para determinar el análisis en un elemento. Este número se determina acorde al elemento asignado, ya sea hexaédrico, triangular o tetraédrico. También, pueden ser elementos cuadráticos o lineales, es decir, utilizan interpolación lineal o cuadrática. Los elementos lineales poseen nodos únicamente en las esquinas y los cuadráticos poseen puntos intermedios.

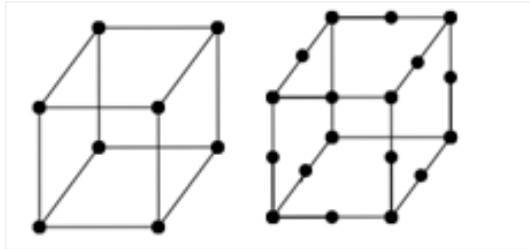


Figura 16. Representación gráfica elementos lineales (izquierda) y cuadráticos (derecha) en sólidos continuos. (Uzcátegui, 2018)

- **Formulación:** La formulación del elemento se refiere a la matemática usada para definir su comportamiento. Abaqus presenta dos opciones. La primera es usada para los análisis de esfuerzos/desplazamientos y está basada en la teoría Lagrangiana. La segunda es la teoría Euleriana o espacial, la cual se usa para análisis de mecánica de los fluidos (Uzcátegui, 2018).
- **Integración:** Abaqus emplea técnicas numéricas para integrar sobre el volumen de cada elemento. La cuadratura de Gaussian es la más usada para los elementos. Abaqus evalúa la respuesta del material para cada punto de integración en cada elemento (Uzcátegui, 2018).

Además, existen indicadores especiales para propiedades específicas como: Integración reducida (R), transferencia de calor con dispersión (D), presión de poros (P), Número de modos de Fourier (N), entre otros.

Con el fin de ejemplificar la codificación de los elementos, en las Figuras 17 y 18 se desglosan dos tipos de elementos.

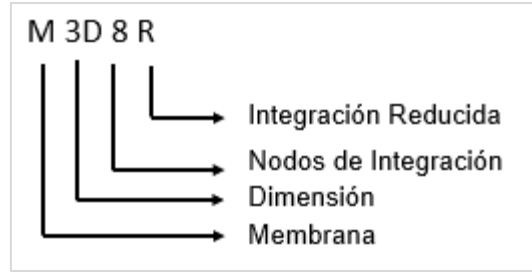


Figura 17. Denominación de un elemento tipo membrana, con elementos cuadráticos. Modificado (Da Cunha, 2005)

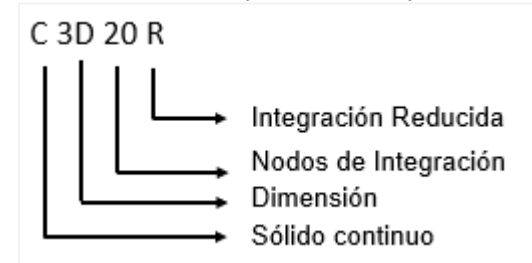


Figura 18. Denominación de un elemento sólido continuo con elementos cuadráticos. Modificado (Da Cunha, 2005)

Los nodos de integración dependen de si es un elemento cuadrático o lineal. Los elementos lineales cuentan con nodos de integración en cada una de las esquinas y los elementos cuadráticos poseen puntos de integración intermedios en los elementos. En la Figura 19, se observa la diferencia de este tipo de elementos.

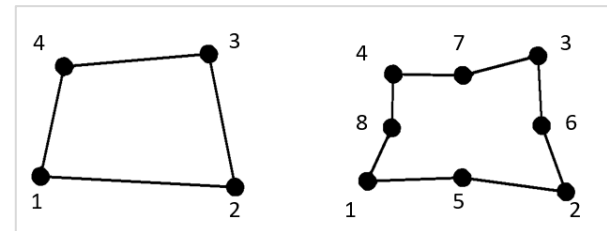


Figura 19. Representación gráfica de los elementos tipo membrana, lineales (izquierda), cuadráticos (derecha). Modificado (Da Cunha, 2005)

Metodología

El presente trabajo fue realizado mediante la modalidad de proyecto de investigación. Se efectuó en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica Lanamme UCR, en la unidad de PITRA como parte de la línea de investigación que posee el laboratorio.

Para el desarrollo de este proyecto, fue necesario realizar una investigación exhaustiva en cuanto a la bibliografía existente de trabajos realizados dentro y fuera del territorio nacional. Se recopiló lo referente a los geosintéticos como material de refuerzo dentro de una estructura de pavimento flexible, las afectaciones que ejercen sobre el pavimento las distintas presiones de inflado de los neumáticos, el comportamiento de no linealidad en los materiales granulares y el efecto del contenido de agua de estos.

El objetivo principal de este proyecto es cuantificar el aporte mecánico de un geosintético dentro de una estructura de pavimento flexible, variando parámetros como la configuración de carga, dos contenidos de agua (el óptimo y el saturado) mediante un modelo computacional de análisis de elemento finito. Por este motivo, fue necesario recibir una capacitación acerca del uso del programa con el cual se llevó a cabo el desarrollo del modelo. El programa es un *software* comercial de análisis de elemento finito denominado ABAQUS®.

Seguidamente, se llevó a cabo la elaboración del modelo en diversas etapas:

1. *Análisis de sensibilidad de malla*: Para determinar con cual densidad de malla se obtenían resultados satisfactorios, fue necesario variar la cantidad de elementos que contenía el modelo mediante la variación en la distribución de los elementos tanto en horizontal como en vertical, hasta conseguir que los valores de deformación y esfuerzos

máximos converjan o alcancen un porcentaje de error igual o menor a 5%.

La densidad de la malla es mucho mayor en el área de carga que es de 40x40cm en el centro del modelo donde la distribución fue uniforme horizontalmente de 1x1cm, ya que el sensor de presión con el que se obtuvieron los datos de carga posee las mismas dimensiones y para incluir la huella dentro del modelo era necesario dar esta distribución al área de carga.

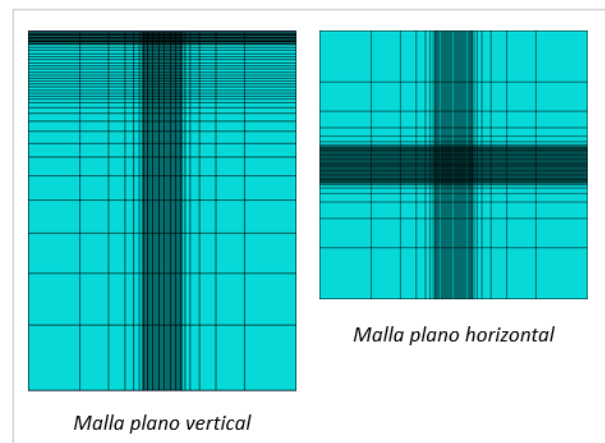


Figura 20. Ejemplo de malla generada

2. *Validación del modelo mediante el uso de un software de multicapa-elástica, desarrollado por Lanamme UCR, denominado PitraPave*: La validación consiste en realizar una comparación de las respuestas críticas (esfuerzos, deformaciones y deflexiones) obtenidas en un modelo piloto que se realizó en dos programas propuestos, ABAQUS y PitraPave, hasta alcanzar un error menor al 10% entre ellas.
3. *Modelación de carga y determinación de un sistema de coordenadas para introducir los datos al programa ABAQUS®*: Para realizar la modelación de carga,

fueron suministrados datos medidos en un sensor plano que se coloca debajo del Simulador de Vehículos Pesados (HVS por sus siglas en inglés). Este equipo se utiliza para los ensayos acelerados de pavimentos. Además, es capaz de reproducir de manera acelerada el efecto de los vehículos sobre las estructuras de pavimento (Loría & Aguiar, 2012).

El HVS del LanammeUCR utiliza doble neumático del tipo 11R22,5. La nomenclatura de dicho perfil de neumático sigue una formulación estándar en la cual, el 11 se refiere a la anchura de la sección y la proporción, la “R” indica que es un neumático radial y el 22,5 corresponde al diámetro de la rueda (Clark, 2016).



Figura 21. Sensor de presión bajo el neumático del HVS (Clark, 2016)

Los datos de carga que mide el sensor plano son de cargas distintas a diversas presiones para generar una huella que posteriormente es leída a través de un software denominado IScan, mediante el cual se obtienen los datos de presión en cada punto. Se procede a

modelar la carga de tal manera que pueda ser introducido como un sistema de coordenadas en ABAQUS como un “AnalyticalField” o archivo de puntos. Para describir el proceso de manera más gráfica, se tiene como ayuda visual las Figuras 22, 23, 24, 25 y 26. Finalmente, en la Figura 27, se observa el resultado de la huella generada en ABAQUS.

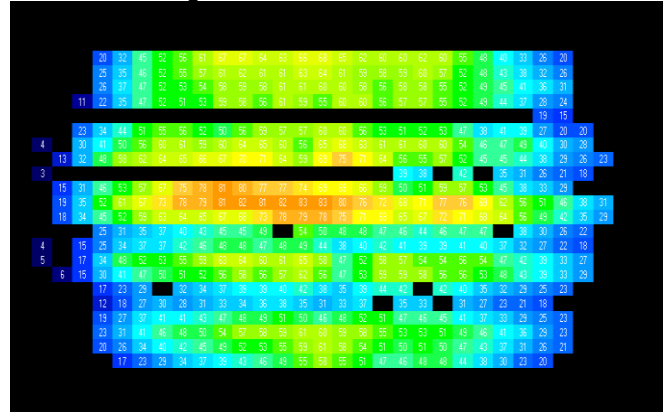


Figura 22. Paso 1. Huella generada en iScan (iScan, 2016)

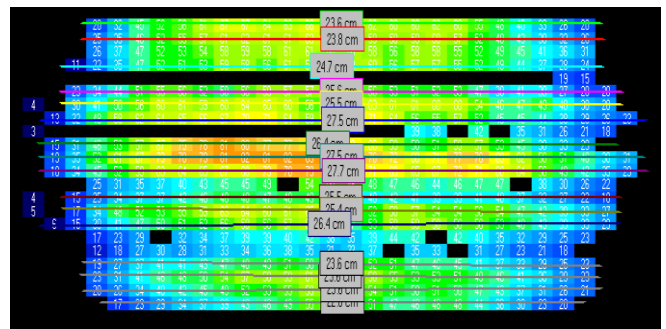


Figura 23. Paso 2. Obtención de los datos de presión (iScan, 2016)

En la figura 23, se observa cómo se realizó el mapeo de las distintas huellas. Se dividió en 5 distintas franjas: extremo 1, intermedio 1, centro, intermedio 2 y extremo 2. De arriba hacia abajo, cada franja constaba de 4 hileras para los extremos y 3 para los intermedios. A partir de ese mapeo, se obtenía un archivo .csv que posteriormente se adecuaba al sistema de coordenadas establecido en ABAQUS.

DATOS DE ENTRADA ABAQUS											
X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Presión de contacto (Pa)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Presión de contacto (Pa)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Presión de contacto (Pa)
1.355	1.555	4.00	0.00	1.355	1.545	4.00	0.00	1.355	1.535	4.00	0.00
1.365	1.555	4.00	186158.52	1.365	1.545	4.00	193053.28	1.365	1.535	4.00	151684.72
1.375	1.555	4.00	227527.08	1.375	1.545	4.00	268895.64	1.375	1.535	4.00	234421.84
1.385	1.555	4.00	275790.40	1.385	1.545	4.00	351632.76	1.385	1.535	4.00	317158.96
1.395	1.555	4.00	330948.48	1.395	1.545	4.00	406790.84	1.395	1.535	4.00	372317.04
1.405	1.555	4.00	420580.36	1.405	1.545	4.00	441264.64	1.405	1.535	4.00	406790.84
1.415	1.555	4.00	503317.48	1.415	1.545	4.00	496422.72	1.415	1.535	4.00	475738.44
1.425	1.555	4.00	530896.52	1.425	1.545	4.00	537791.28	1.425	1.535	4.00	524001.76
1.435	1.555	4.00	510212.24	1.435	1.545	4.00	524001.76	1.435	1.535	4.00	530896.52
1.445	1.555	4.00	489527.96	1.445	1.545	4.00	517107.00	1.445	1.535	4.00	530896.52
1.455	1.555	4.00	524001.76	1.455	1.545	4.00	530896.52	1.455	1.535	4.00	524001.76
1.465	1.555	4.00	537791.28	1.465	1.545	4.00	530896.52	1.465	1.535	4.00	475738.44
1.475	1.555	4.00	517107.00	1.475	1.545	4.00	517107.00	1.475	1.535	4.00	413685.60
1.485	1.555	4.00	530896.52	1.485	1.545	4.00	524001.76	1.485	1.535	4.00	399896.08
1.495	1.555	4.00	524001.76	1.495	1.545	4.00	524001.76	1.495	1.535	4.00	406790.84
1.505	1.555	4.00	489527.96	1.505	1.545	4.00	503317.48	1.505	1.535	4.00	427475.12

Figura 24. Paso 3. Datos de entrada al ABAQUS en un sistema de coordenadas.

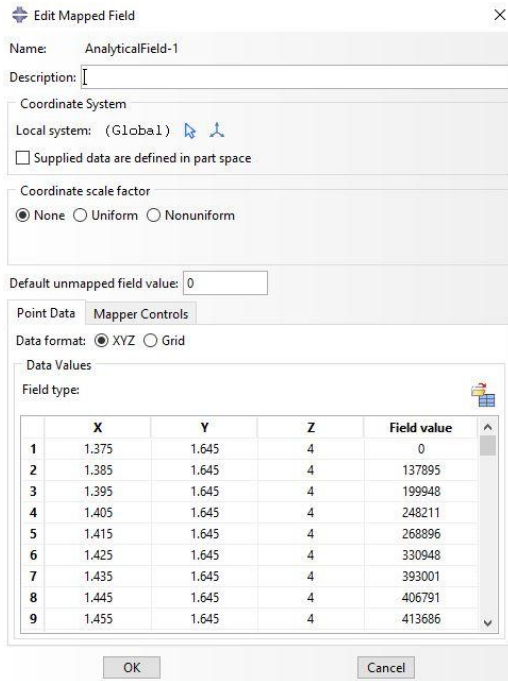


Figura 25. Paso 4. Creación del "AnalyticalField" (ABAQUS, 2018)

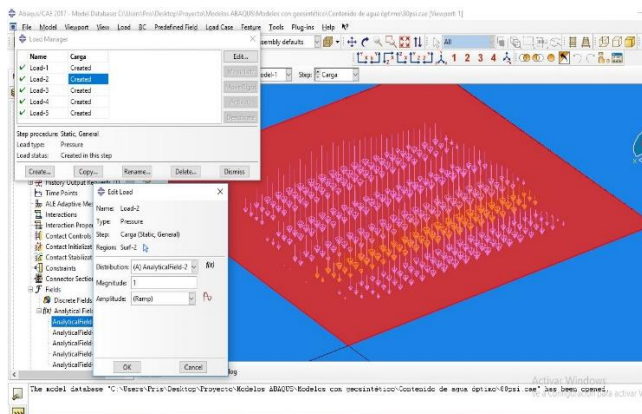


Figura 26. Representación gráfica del mapeo de la carga en ABAQUS.

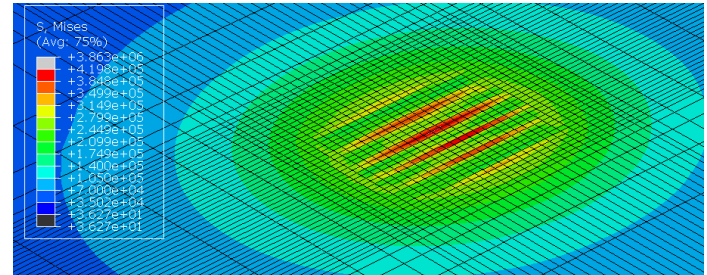


Figura 27. Ejemplo de huella generada en ABAQUS

4. Creación del modelo definitivo: Las características de los materiales que se utilizaron como datos de entrada para el modelo se obtuvieron mediante la investigación de los valores típicos de módulo resiliente para materiales de base, subbase, acorde a lo sugerido por la Administración Federal de aviación (FAA) por sus siglas en inglés, así como lo especificado en la Guía de Diseño Mecanicista – Empírica, preparada por el Programa Cooperativo Nacional de Investigación de Autopistas (NCHRP) por sus siglas en inglés. Se verificó que los valores utilizados cumplieran con el CR-2010, norma vigente en Costa Rica para los valores mínimos para materiales en carretera.

Con el fin de considerar la no linealidad y el contenido de agua, se utilizó el modelo exponencial de módulo resiliente que fue desarrollado en la tesis *Efecto del contenido de agua en el módulo resiliente de las subrasantes*. Se utilizó el modelo exponencial, pues, era el que poseía el valor de r^2 más alto de todos los modelos desarrollados igual. Como datos de entrada, se calculó una succión de 10 kPa para el contenido saturado de agua y de 70 kPa para un contenido óptimo de agua, acorde a la ecuación 7. Como fue explicado con anterioridad, el módulo resiliente depende tanto del estado de esfuerzos como del contenido de agua. La capa de subrasante se subdividió en tres capas de distintos espesores con el objetivo de considerar la no linealidad de material. Mediante un proceso iterativo, se determinaron tres módulos distintos (uno por cada capa) para cada condición de humedad, con el estado de esfuerzos más

crítico que era de 61,7kN y 115psi (793kPa). Se asignó como primer estado de esfuerzos el valor de 70MPa a la capa de subrasante, ya que fue el valor utilizado durante la validación del modelo. Seguidamente, se procedió a analizar los esfuerzos en el centro de cada una de las subdivisiones realizadas en la capa subrasante y se introdujeron los datos en la ecuación 7. Este procedimiento se llevó a cabo en el modelo con geosintético y el modelo sin geosintético.

Fue necesario realizar una serie de iteraciones hasta alcanzar la convergencia de los valores de módulo resiliente con un porcentaje de error menor al 5%.

Otro detalle importante en la elaboración de los modelos es que para poder simular las condiciones reales de una estructura de pavimento se deben configurar las condiciones de contorno, las cuales asemejan el confinamiento que tiene el material en su extensión, se limitan los desplazamientos y las

rotaciones en la parte inferior del modelo. Para los extremos, se colocaron patines en toda la longitud con el objetivo de restringir los desplazamientos en el plano xy pero que permitieran el movimiento en el plano z; es decir, los desplazamientos verticales.

Como objetivo final, se realizó un modelo predictivo para las respuestas críticas en el pavimento que son utilizadas como parámetros de diseño. Este incluye como variables independientes las características que se variaron dentro del estudio paramétrico, como la carga, la presión, el contenido de agua del material de subrasante en presencia del contenido óptimo de agua y en estado saturado y si contiene refuerzo geosintético o no, además de la profundidad, para determinar el punto específico en el cual se desea obtener la respuesta. Los modelos se llevaron a cabo por medio de una regresión lineal múltiple utilizando el programa MS Excel. Los modelos de respuesta generados son para la deflexión, la deformación unitaria vertical y la deformación unitaria radial.

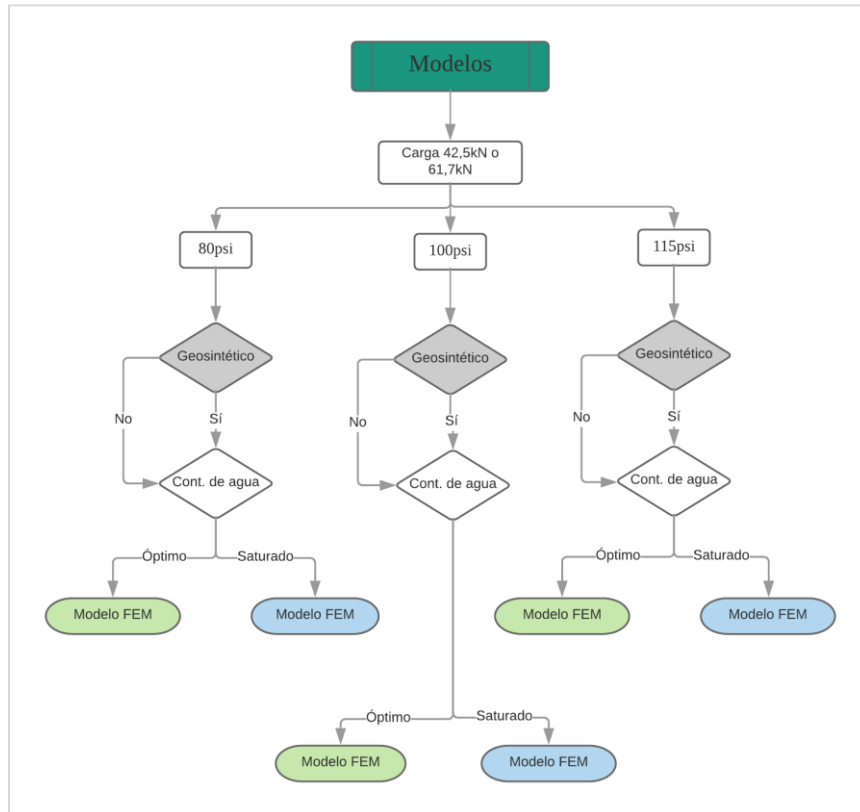


Figura 27. Diagrama de modelos generados.

Posteriormente se efectuó el análisis de los resultados obtenidos con investigaciones previas.

En la Figura 29, se observa un diagrama de flujo de la metodología con la cual se desarrolló el proyecto.

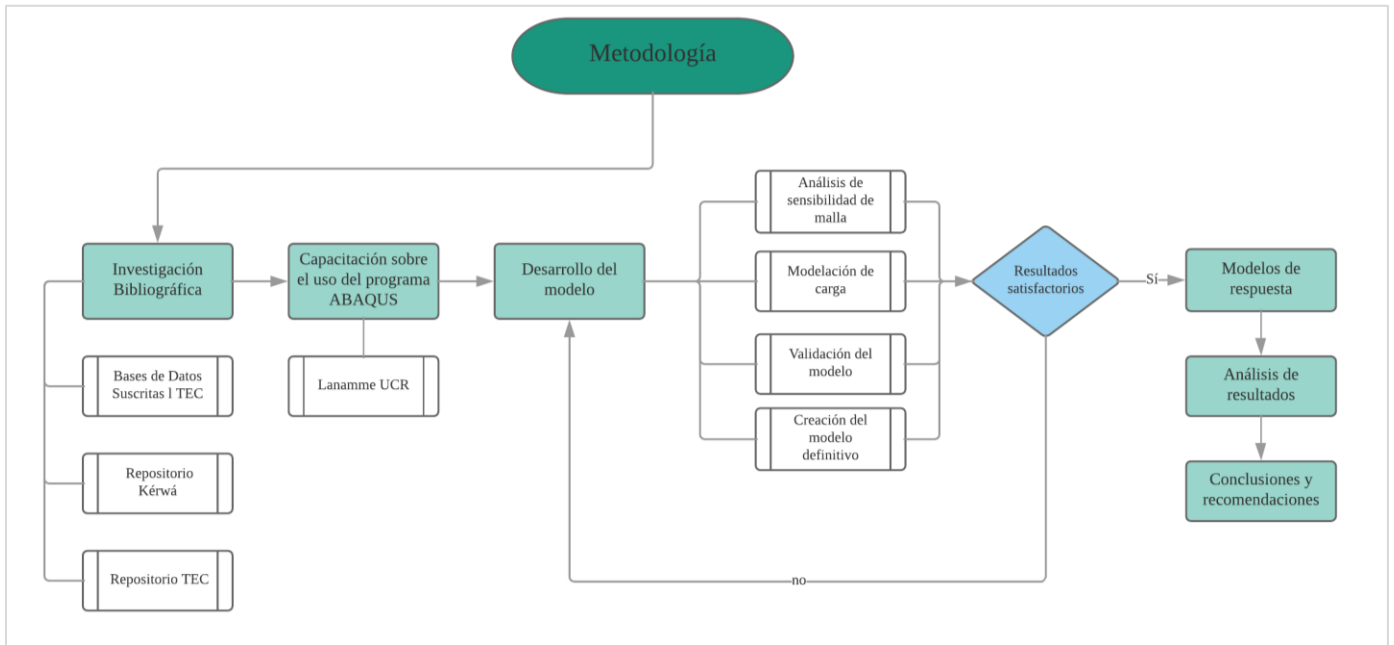


Figura 28. Diagrama de flujo metodología a seguir

Resultados

Análisis de sensibilidad de malla

Para la elaboración del modelo en ABAQUS, se decidió dar dimensiones de 3m x 3m en extensión de área, acorde a la bibliografía consultada, donde se utiliza en los modelos de entre 2,16 - 36 m² (Hernandez & Al-Qadi, 2017), (Xia, 2010), (Wang, 2011), (Helwany, Dyer, & Leidy, 1998), (Park, Martin, Jeong, & Lee, 2008), (Park, Martin, & Masad, 2005), con una profundidad de 10,15m.

En el Cuadro 1, se encuentran los datos correspondientes al análisis de sensibilidad de la malla, con las distribuciones de los elementos en sentido vertical y horizontal, además del valor máximo de las respuestas críticas (deflexión máxima y esfuerzo máximo). En las últimas dos columnas, se muestra la distribución de los elementos en metros; es decir, los elementos van desde 1 cm hasta los 70cm para la distribución horizontal para la malla 1.

CUADRO 1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE MALLA						
Malla	Nº Nodos	Nº Elementos	Deflexión (U)	Esfuerzo (S)	TM Horizontal	TM Vertical
1	96800	90396	8.409.E-04	4.844.E+05	0,01-0,70	0,08-0,90
2	105875	99144	8.409.E-04	4.844.E+05	0,01-0,65	0,07-0,85
3	126711	119168	8.444.E-04	4.840.E+05	0,01-0,60	0,06-0,80
4	153164	144652	8.463.E-04	4.841.E+05	0,01-0,50	0,05-0,75
5	210357	199888	8.484.E-04	4.841.E+05	0,01-0,40	0,04-0,60
6	276138	263568	8.497.E-04	4.841.E+05	0,01-0,30	0,03-0,50
7	317583	303800	8.499.E-04	4.841.E+05	0,01-0,275	0,03-0,475
8	360000	344988	8.502.E-04	4.841.E+05	0,01-0,25	0,03-0,45
9	391314	375440	8.503.E-04	4.841.E+05	0,01-0,225	0,03-0,45
10	433026	416000	8.504.E-04	4.841.E+05	0,01-0,20	0,03-0,45
11	502928	484075	8.465.E-04	4.679.E+05	0,01-0,20	0,02-0,40

En las Figuras 29 y 30, se muestra la convergencia de las respuestas máximas.

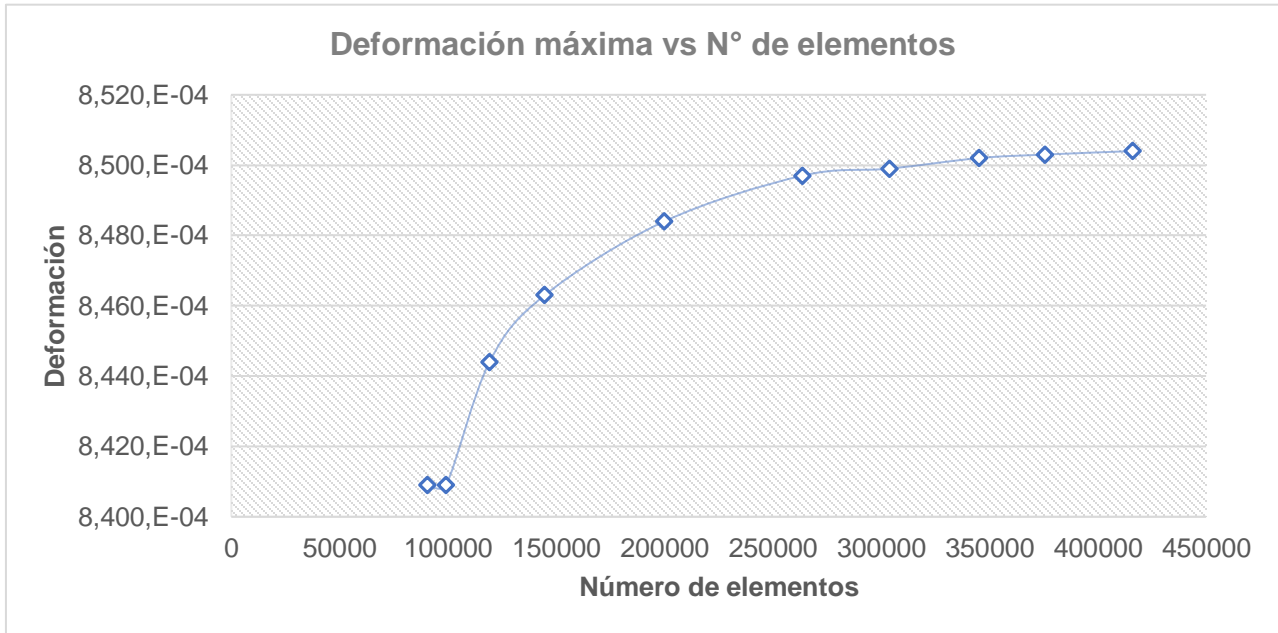


Figura 29. Gráfico de la variación de la deformación con respecto al número de elementos.

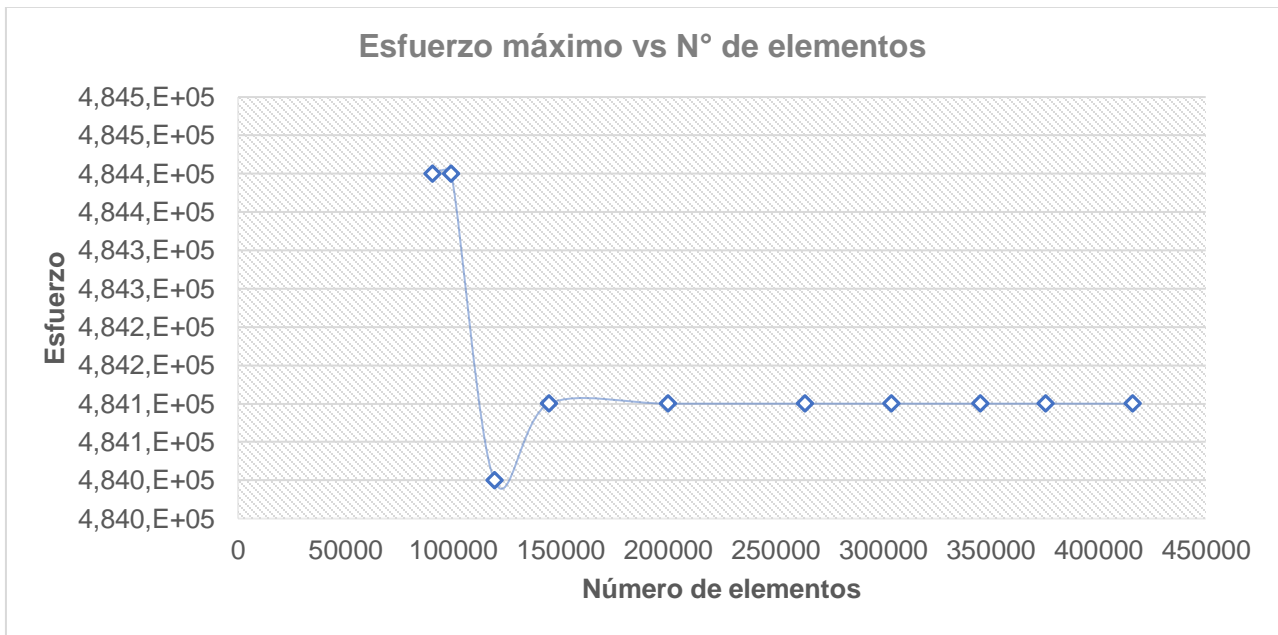


Figura 30. Gráfico de la variación del esfuerzo con respecto al número de elementos.

Validación del modelo

Para realizar la validación, se elaboró un modelo en ABAQUS y uno en el software de análisis de Multicapa elástica, PITRAPave,

que contenía las características de los materiales de la pista de prueba AC3 del HVS del PAVELab de Lanamme UCR, especificadas en el Cuadro 2.

CUADRO 2. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES				
Capa	Espesor (cm)	Módulo de Young (MPa)	Módulo de Poisson	Propiedades del material
Carpeta Asfáltica	13,2	3800	0,35	Isotrópico, elástico lineal
Base	31,0	170	0,4	Isotrópico, elástico lineal
Subbase	30,1	140	0,4	Isotrópico, elástico lineal
Subrasante	—	70	0,45	Isotrópico, elástico lineal

Fuente: Leiva, Aguiar & Loría (2014)

En la validación, se utilizó una configuración de carga un eje simple con carga circular con 40 kN de magnitud, una presión de 100 psi y un radio de 0,1360 m.

En la Figura 31, se muestra la interfaz del software de multicapa elástica con el modelo de la estructura de pavimento.

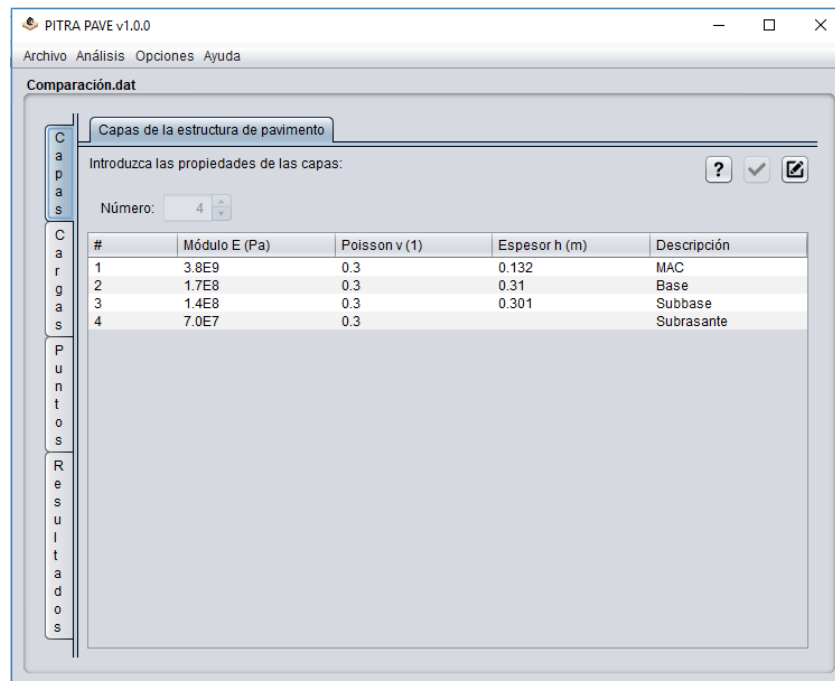


Figura 31. Modelo en software multicapa (PITRAPave, 2018)

Para poder realizar la comparación de las respuestas críticas en el pavimento, obtenidas en los distintos modelos, se determinaron 5 puntos de control. Estos se ubican: en la superficie de la carpeta asfáltica, en la fibra inferior de la carpeta, en el medio de la capa se base, en el medio de la capa de la subbase y en la fibra superior de la subrasante.

En el Cuadro 3, se encuentran los resultados obtenidos en los puntos de control de 5 distintas respuestas deformación unitaria radial (E11), deformación unitaria vertical (E33), esfuerzo radial (S11), esfuerzo vertical (S33), deflexión vertical (U3), con el programa de multicapa elástica PITRAPave.

CUADRO 3. RESPUESTAS CRÍTICAS OBTENIDAS EN PITRAPave					
Puntos	E11	E33	S11	S33	U3
1	-2.45E-04	7.49E-05	-1.62E+06	-6.90E+05	-4.74E-04
2	8.52E-06	-9.52E-05	-1.47E+05	-4.50E+05	-4.72E-04
3	2.42E-04	-2.37E-04	1.25E+06	-1.49E+05	-4.62E-04
4	1.48E-04	-4.42E-04	5.03E+03	-7.21E+04	-3.66E-04
5	8.91E-05	-2.06E-04	7.32E+03	-2.45E+04	-2.75E-04
6	9.10E-05	-2.51E-04	2.11E+03	-1.63E+04	-2.47E-04

Se inició la validación con el modelo inicial de ABAQUS, utilizado en el análisis de sensibilidad de malla y se procedió a comparar las respuestas críticas con las obtenidas en el PITRAPave.

En el Cuadro 4, se muestran los valores de errores promedio en las respuestas críticas y la variación de los elementos.

CUADRO 4. PORCENTAJE DE ERROR PRMEDIO EN LAS RESPUESTAS CRÍTICAS					
Respuesta	Malla1 (260406)	Malla1 (329715)	Malla1 (370881)	Malla1 (375752)	Malla1 (482850)
E11	14.7%	12.9%	12.5%	14.6%	14.7%
S11	23.7%	22.9%	22.4%	23.6%	23.6%
S33	2.2%	1.7%	1.4%	2.2%	2.1%
U3	77.1%	79.3%	79.5%	77.2%	77.1%

Debido al alto porcentaje de error en las respuestas del pavimento, se decidió realizar un análisis de profundidad, para lo cual se elaboró un análisis de sensibilidad al comparar la deflexión obtenida en la fibra superior de la subrasante de 6 distintos modelos que tenían un área de 9 m², pero con distintas profundidades. Las profundidades son las siguientes: 10.15 m, 8,0m, 6,0m, 4,0m y 2.5m, respectivamente. Los valores obtenidos en los modelos de elementos finitos se comparan con el valor obtenido en el modelo de análisis de multicapa elástica y se determina el porcentaje de error entre las respuestas.

En el Cuadro 5, se muestran los valores obtenidos en la deflexión vertical (U3).

CUADRO 5. ANÁLISIS DE PROFUNDIDAD		
Profundidad (m)	Deflexión (m)	% de Error
10.15	-5.27E-04	113%
8.00	-4.29E-04	74%
6.00	-3.35E-04	35%
4.00	-2.38E-04	4%
2.50	-1.67E-04	32%

En la Figura 32, se puede observar de manera gráfica el comportamiento de la deflexión respecto a la variación de profundidad.

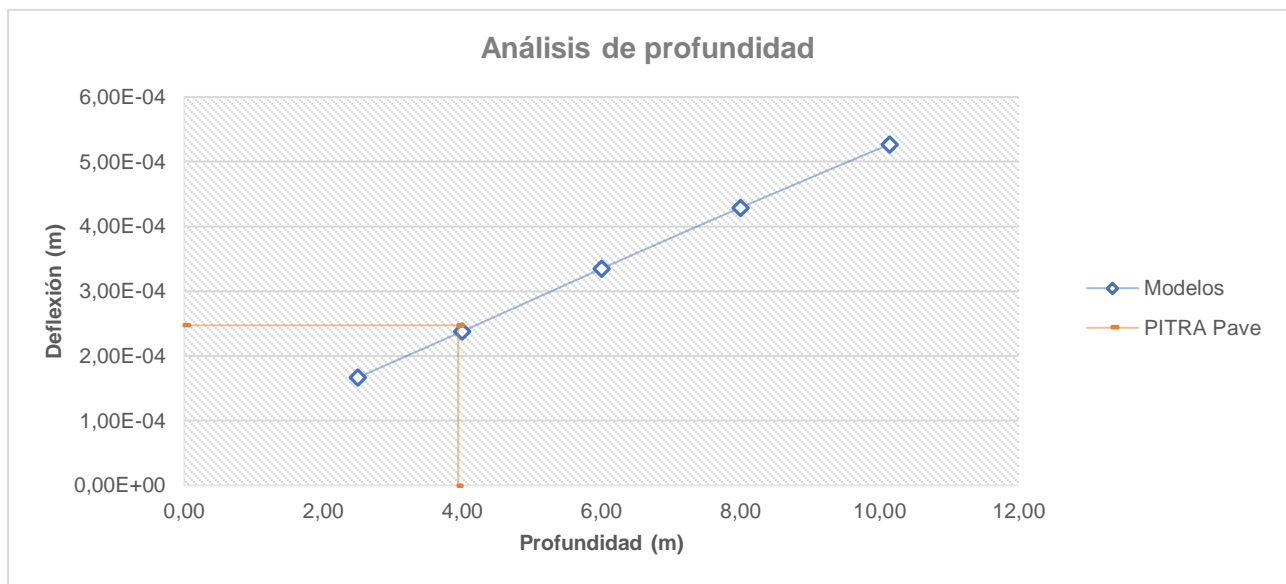


Figura 32. Gráfico análisis de profundidad

Con el fin de optimizar los resultados y obtener valores de las respuestas críticas dentro de un rango de 0-10% de error con respecto a las obtenidas en el análisis de multicapa, fue necesario realizar cambios en cuanto al mallado y tipo de elementos del modelo de ABAQUS con las nuevas dimensiones 3x3x4m. Se procedió a variar de elementos lineales a cuadráticos con un total de 140180 elementos hexaédricos cuadráticos y 584735 nodos en total, debido a que el error disminuye considerablemente al pasar de elementos lineales a elementos cuadráticos. En el Cuadro 6, se muestran los porcentajes de error promedio obtenidos en las respuestas del pavimento entre los dos tipos de elementos.

Respuesta	Tipo de elementos	
	Cuadráticos	Lineales
E11 (unitaria)	9.06%	18.18%
S11 (Pa)	10.06%	15.08%
S33 (Pa)	1.17%	4.25%
U3 (m)	0.96%	7.33%
E33(unitaria)	1.82%	8.24%

En la Figura 33, se muestra una vista 3D del modelo creado en ABAQUS.

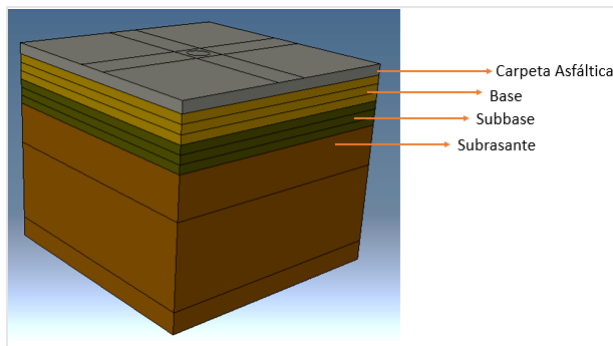


Figura 33. Modelo FEM
(ABAQUS, 2018)

Determinación de los módulos resilientes considerando el contenido de humedad

Modelo con geosintético

En el Cuadro 7, se muestran las iteraciones realizadas para determinar el módulo resiliente con el contenido óptimo de agua.

CUADRO 7. CÁLCULO DE MÓDULO RESILIENTE CON CONTENIDO DE AGUA ÓPTIMO					
Iteración 1					
Profundidad (m)	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	M_R (kPa)
0.943	5.827	1.521	2.030	8.869	140785.231
1.693	3.220	1.884	0.630	6.988	141952.830
3.071	2.570	2.038	0.251	6.647	142319.101
Iteración 2					
Profundidad (m)	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	M_R (kPa)
0.943	7.724	1.453	2.956	10.631	140163.544
1.693	3.656	1.806	0.872	7.267	141736.934
3.071	2.608	2.028	0.273	6.665	142296.508
Iteración 3					
Profundidad (m)	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	M_R (kPa)
0.943	7.716	1.456	2.951	10.629	140169.300
1.693	3.655	1.806	0.872	7.267	141737.552
3.071	2.608	2.028	0.273	6.665	142296.526
Iteración 4					
Profundidad (m)	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	M_R (kPa)
0.943	7.716	1.456	2.951	10.629	140169.249
1.693	3.655	1.806	0.872	7.267	141737.541
3.071	2.608	2.028	0.273	6.665	142296.526
Iteración 5					
Profundidad (m)	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	M_R (kPa)
0.943	7.716	1.456	2.951	10.629	140169.249
1.693	3.655	1.806	0.872	7.267	141737.541
3.071	2.608	2.028	0.273	6.665	142296.526

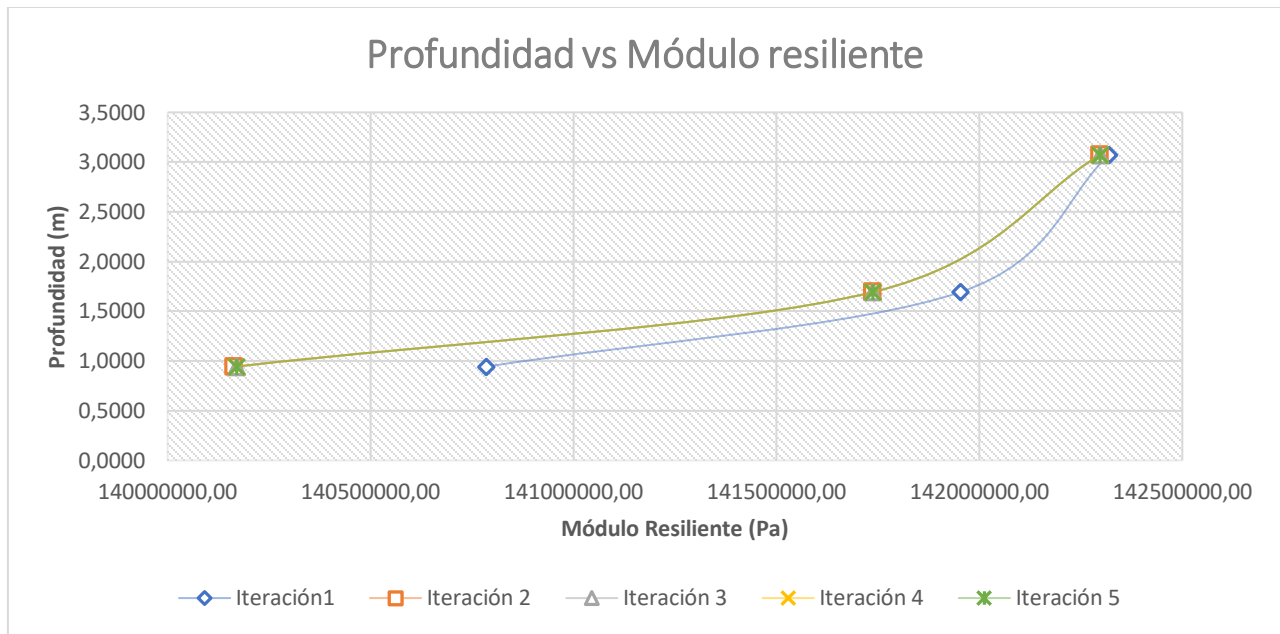


Figura 34. Gráfico de convergencia de Módulo Resiliente contenido óptimo de agua

CUADRO 8. CÁLCULO DE MÓDULO RESILIENTE CON CONTENIDO DE AGUA SATURADO					
Iteración 1					
Profundidad (m)	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	M_R (kPa)
0.943	5.827	1.521	2.030	8.869	107955.028
1.693	3.220	1.884	0.630	6.988	108850.350
3.071	2.570	2.038	0.251	6.647	109131.209
Iteración 2					
Profundidad (m)	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	M_R (kPa)
0.943	6.960	1.464	2.591	9.887	107655.429
1.693	3.479	1.836	0.775	7.150	108750.647
3.071	2.592	2.032	0.264	6.657	109120.921
Iteración 3					
Profundidad (m)	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	M_R (kPa)
0.943	6.955	1.466	2.588	9.886	107658.294
1.693	3.478	1.835	0.774	7.149	108750.592
3.071	2.592	2.032	0.264	6.657	109120.925
Iteración 4					
Profundidad (m)	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	M_R (kPa)
0.943	6.955	1.466	2.588	9.886	107658.283
1.693	3.478	1.835	0.774	7.149	108750.590
3.071	2.592	2.032	0.264	6.657	109120.925

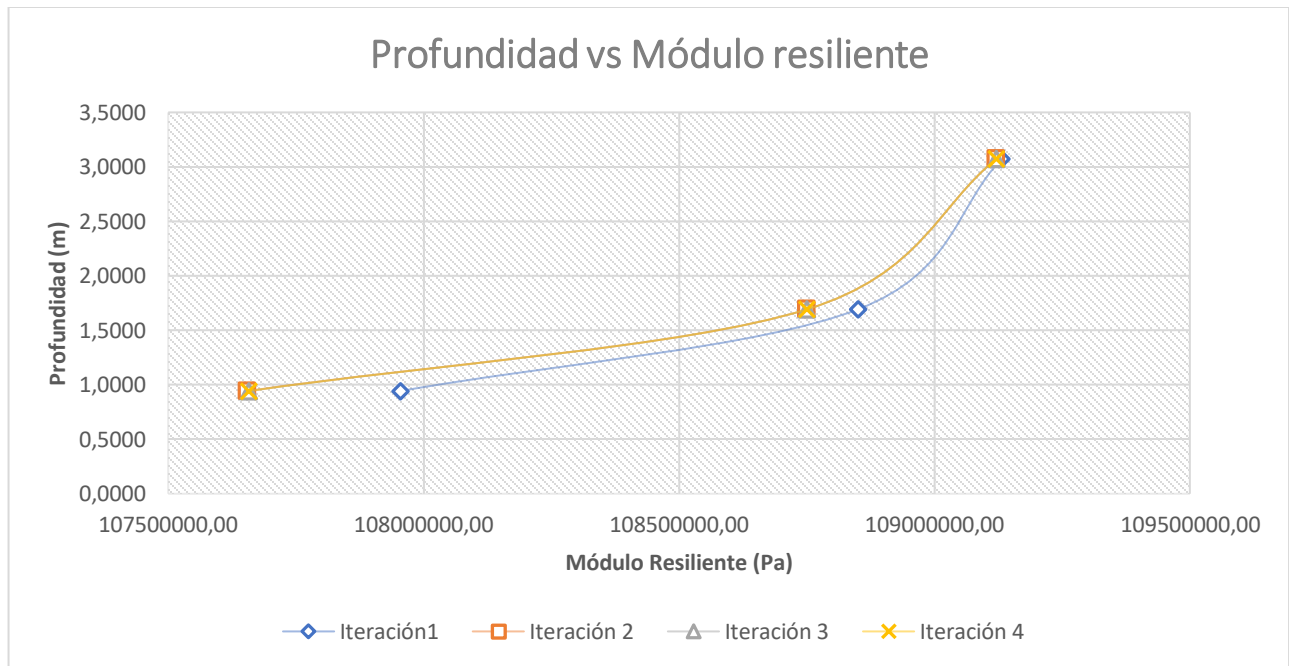


Figura 35. Gráfico de convergencia de Módulo Resiliente contenido saturado de humedad

Modelo sin geosintético

CUADRO 9. CÁLCULO DE MÓDULO RESILIENTE CON CONTENIDO DE AGUA ÓPTIMO					
Iteración 1					
Profundidad (m)	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	M_R (kPa)
0,943	5,903	1,458	2,095	8,818	140691,933
1,693	3,220	1,879	0,632	6,978	141947,819
3,071	2,570	2,039	0,250	6,647	142319,370
Iteración 2					
Profundidad (m)	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	M_R (kPa)
0,943	7,840	1,361	3,054	10,562	140026,331
1,693	3,656	1,799	0,875	7,254	141729,716
3,071	2,607	2,028	0,273	6,664	142296,963
Iteración 3					
Profundidad (m)	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	M_R (kPa)
0,943	7,831	1,365	3,048	10,560	140032,909
1,693	3,655	1,799	0,875	7,253	141730,351
3,071	2,607	2,028	0,273	6,664	142296,972
Iteración 4					
Profundidad (m)	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	M_R (kPa)
0,943	7,831	1,365	3,048	10,560	140032,821
1,693	3,655	1,799	0,875	7,253	141730,351
3,071	2,607	2,028	0,273	6,664	142296,972

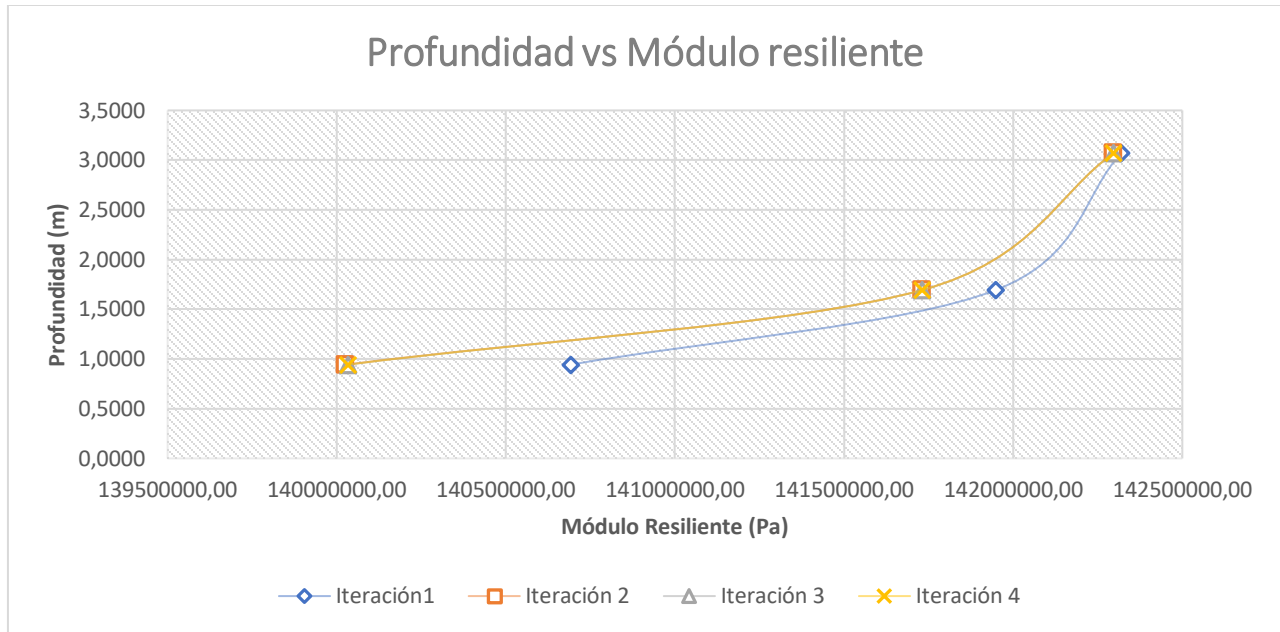


Figura 36. Gráfico de convergencia de Módulo Resiliente contenido óptimo de humedad

CUADRO 10. CÁLCULO DE MÓDULO RESILIENTE CON CONTENIDO DE AGUA SATURADO					
Iteración 1					
Profundidad (m)	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	M_R (kPa)
0.943	5.903	1.458	2.095	8.818	107883.486
1.693	3.220	1.879	0.632	6.978	108846.508
3.071	2.570	2.039	0.250	6.647	109131.415
Iteración 2					
Profundidad (m)	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	M_R (kPa)
0.943	7.059	1.383	2.676	9.825	107563.705
1.693	3.478	1.830	0.777	7.138	108745.601
3.071	2.592	2.033	0.264	6.657	109121.210
Iteración 3					
Profundidad (m)	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	M_R (kPa)
0.943	7.053	1.385	2.672	9.824	107566.942
1.693	3.478	1.830	0.777	7.138	108745.906
3.071	2.592	2.033	0.264	6.657	109121.221
Iteración 4					
Profundidad (m)	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	M_R (kPa)
0.943	7.053	1.385	2.672	9.824	107566.907
1.693	3.478	1.830	0.777	7.138	108745.906
3.071	2.592	2.033	0.264	6.657	109121.221

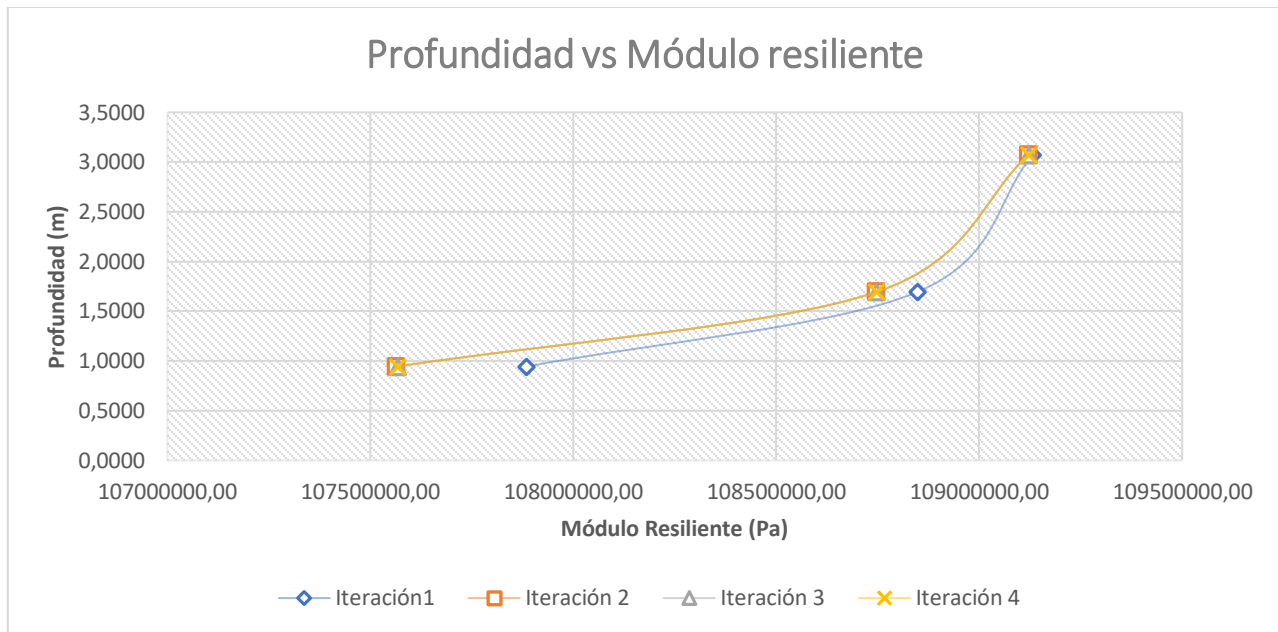


Figura 37. Gráfico de convergencia de Módulo Resiliente contenido saturado de humedad

CUADRO 11. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES MODELO EN ABAQUS				
Capa	Espesor (m)	Módulo de Young (MPa)	Módulo de Poisson	Propiedades del material
Carpeta Asfáltica	0,132	3800	0,35	Isotrópico, elástico lineal
Geosintético	0.004	72000	0,35	Isotrópico, elástico lineal
Base	0,310	300	0,4	Isotrópico, elástico lineal
Subbase	0,301	200	0,4	Isotrópico, elástico lineal
Subrasante	3,257	Variable	0,45	Isotrópico, elástico lineal

Respuestas críticas

Con el fin de determinar el desempeño del geosintético, se obtuvieron las repuestas críticas en diversos puntos de control. Estos puntos se ubican, en la parte superior, en la mitad y en la parte interior de la carpeta, así como en la mitad

de la base y la subbase y en la parte superior de la subrasante. Seguidamente, se compararon las respuestas en el modelo con geosintético y sin geosintético para cada una de las configuraciones de carga

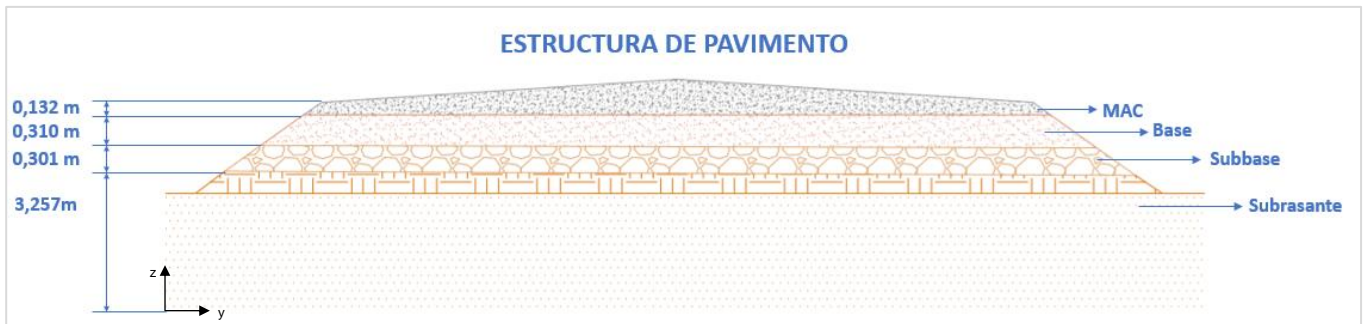


Figura 38. Diagrama de la estructura utilizada en los modelos sin geosintético



Figura 39. Diagrama de la estructura utilizada en los modelos con geosintético

Modelo de 42,5 kN con 80psi

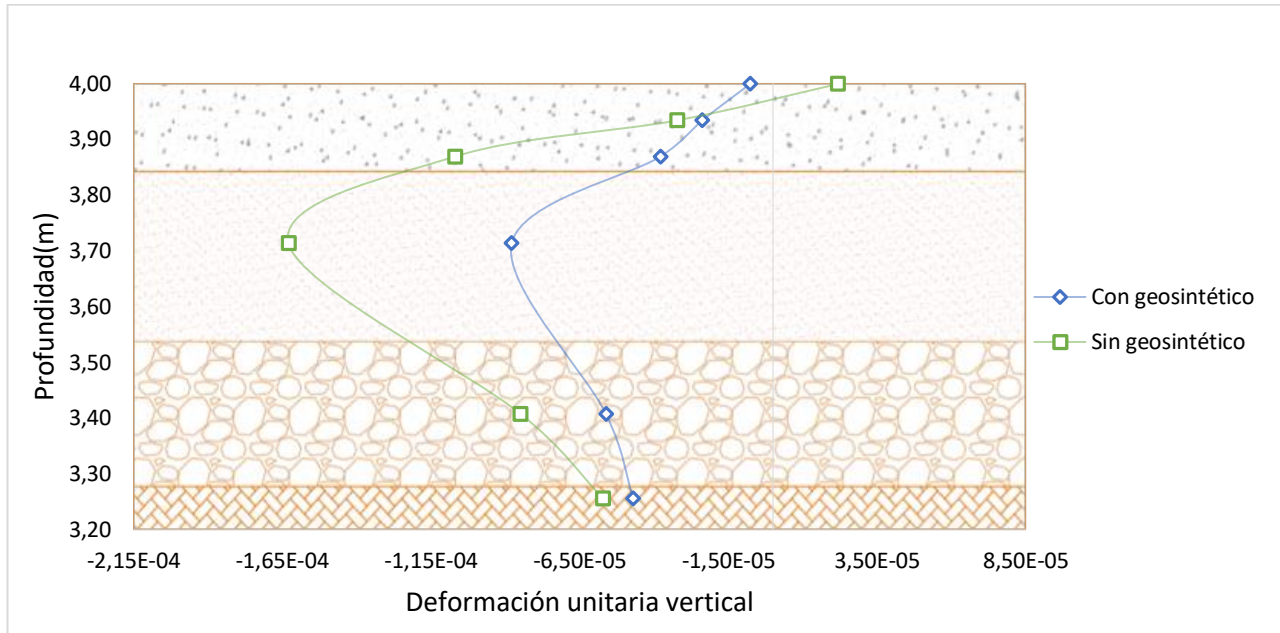


Figura 40. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje z, contenido óptimo de agua

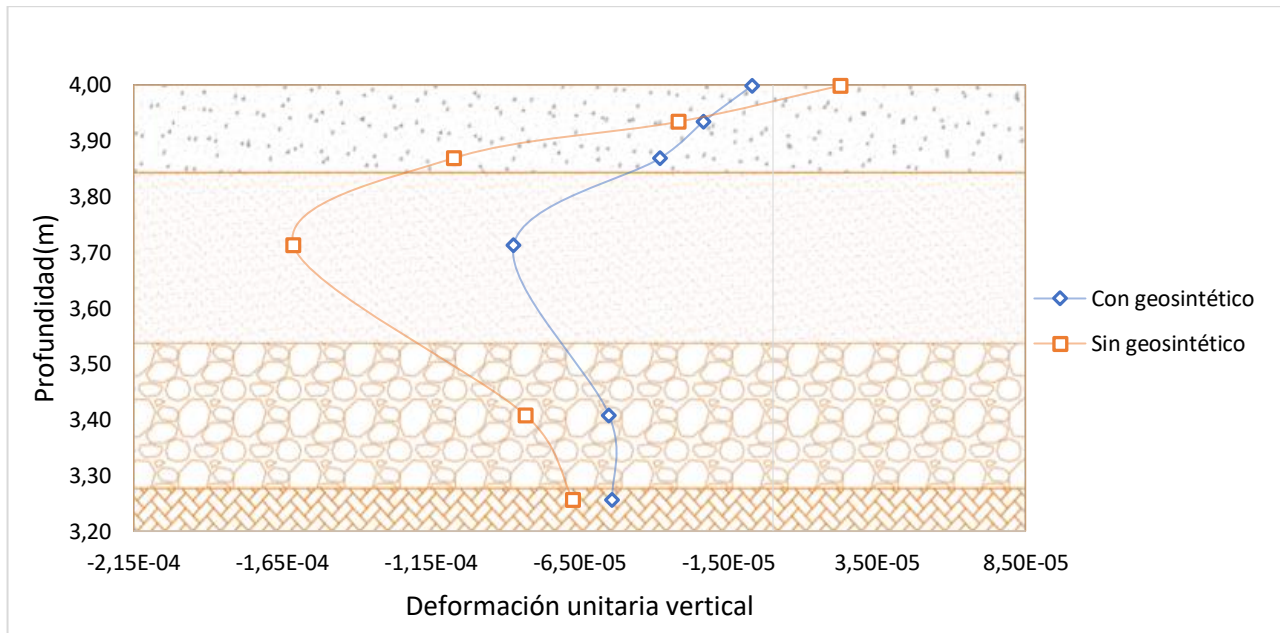


Figura 41. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje z, contenido saturado de agua

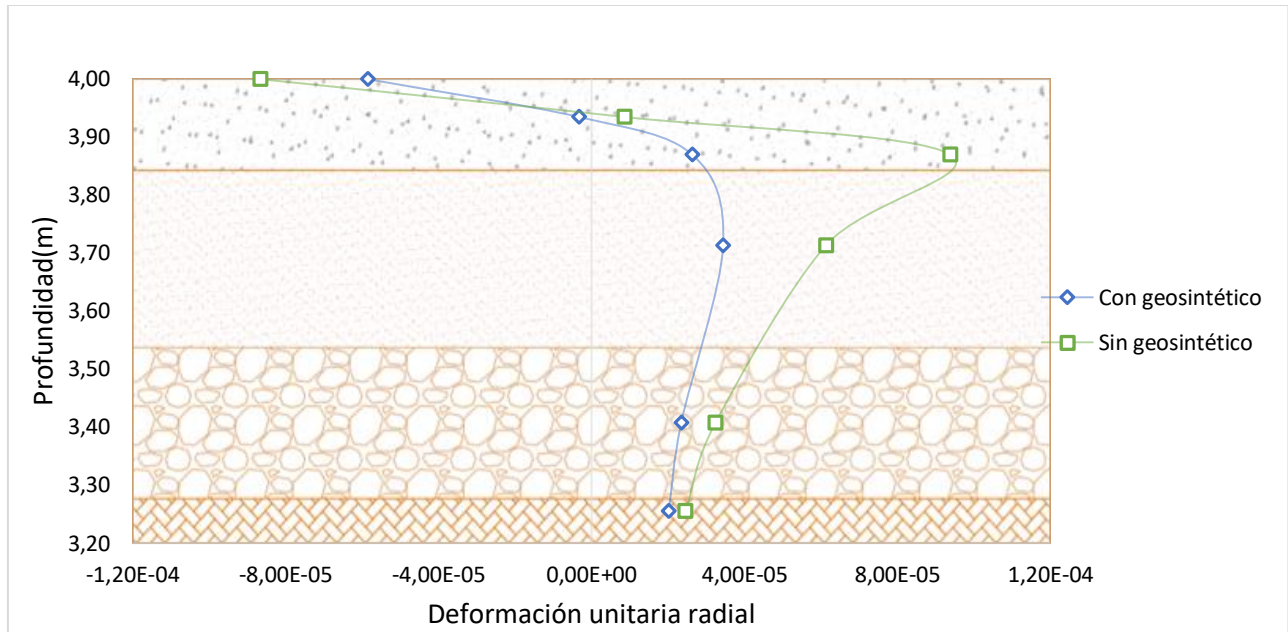


Figura 42. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje x, contenido óptimo de agua

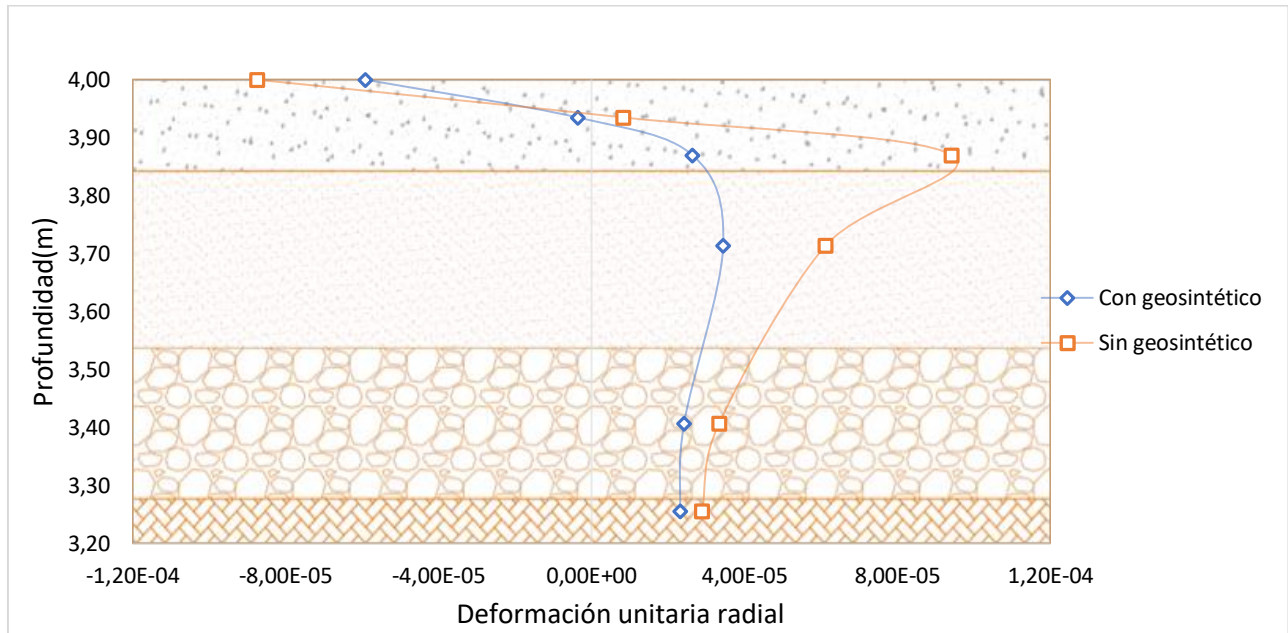


Figura 43. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje x, contenido saturado de agua

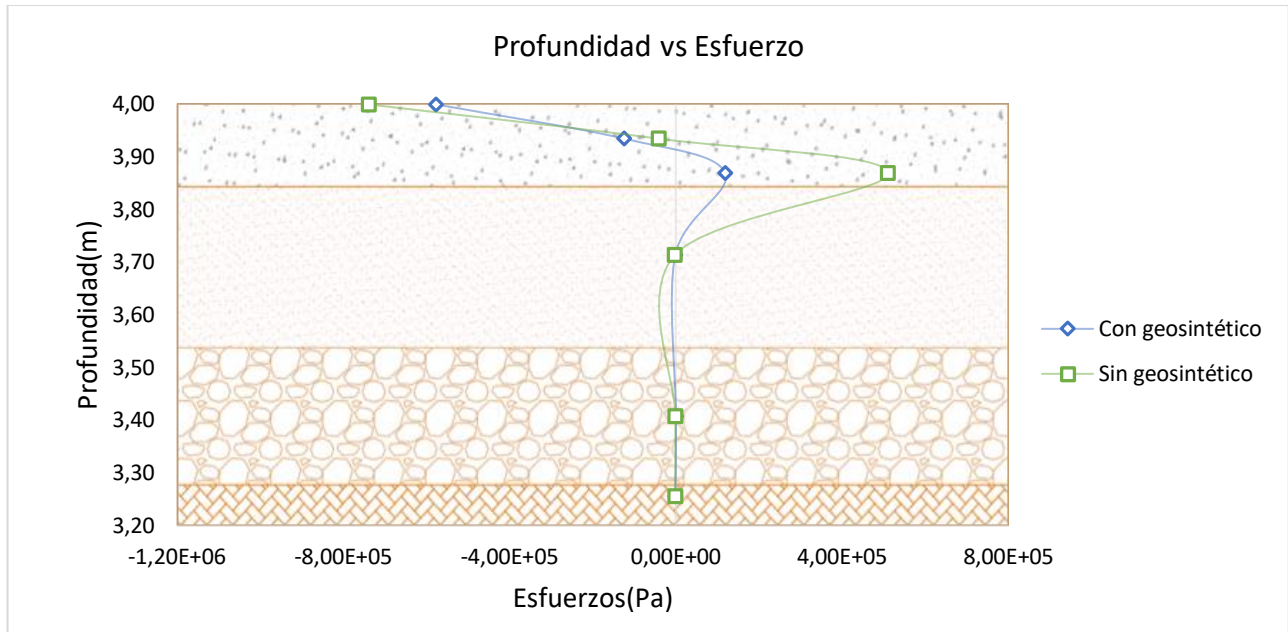


Figura 44. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje x, contenido óptimo de agua

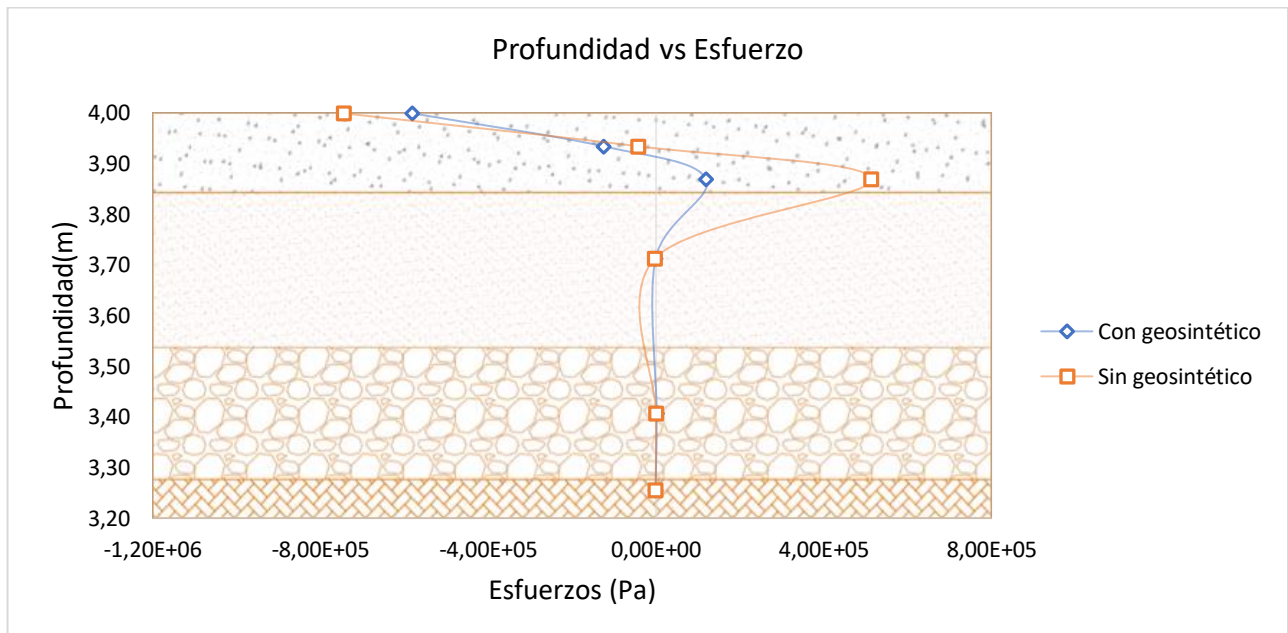


Figura 45. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje x, contenido saturado de agua

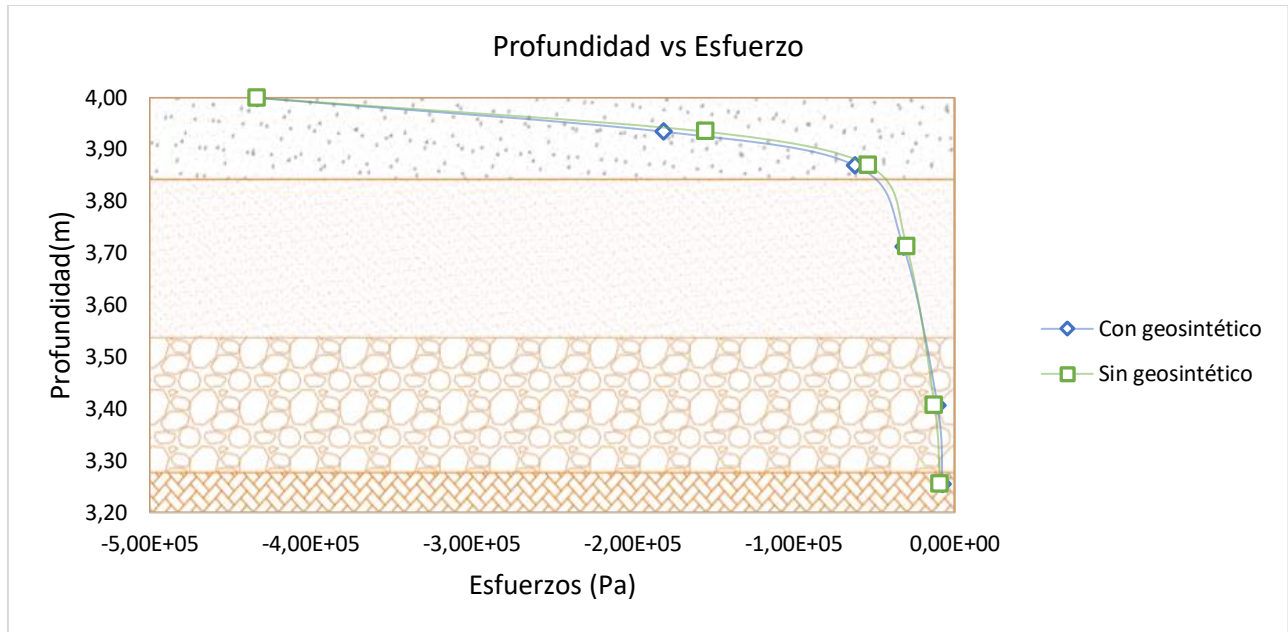


Figura 46. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje z, contenido óptimo de agua

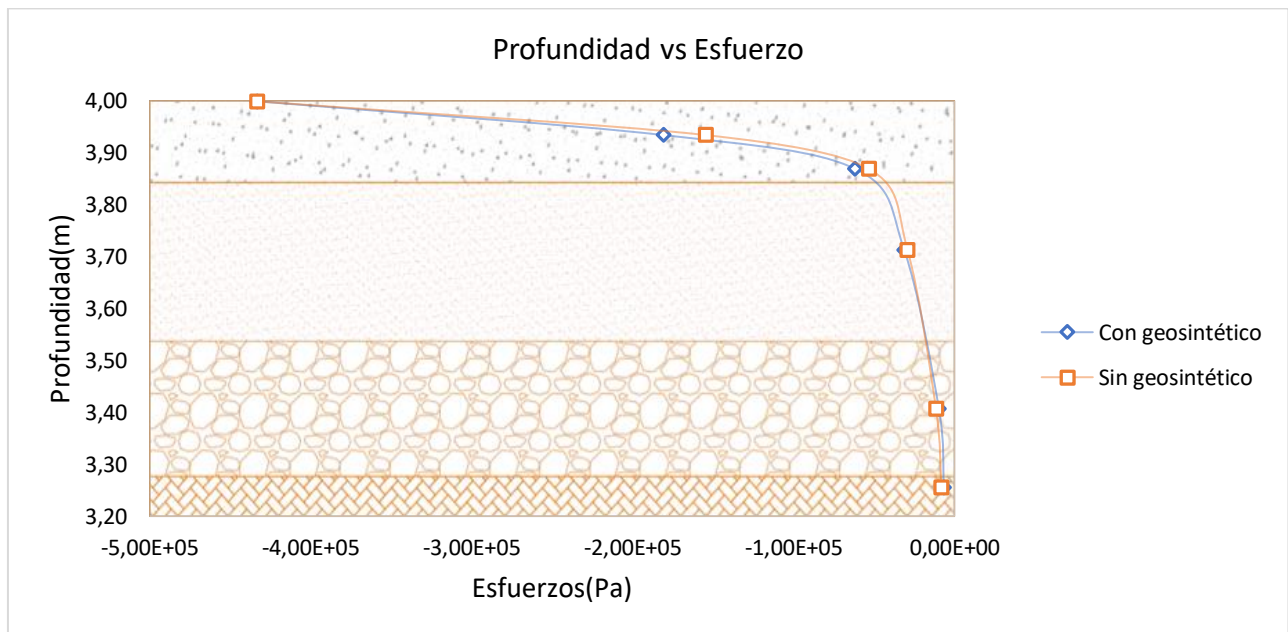


Figura 47. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje z, contenido saturado de agua

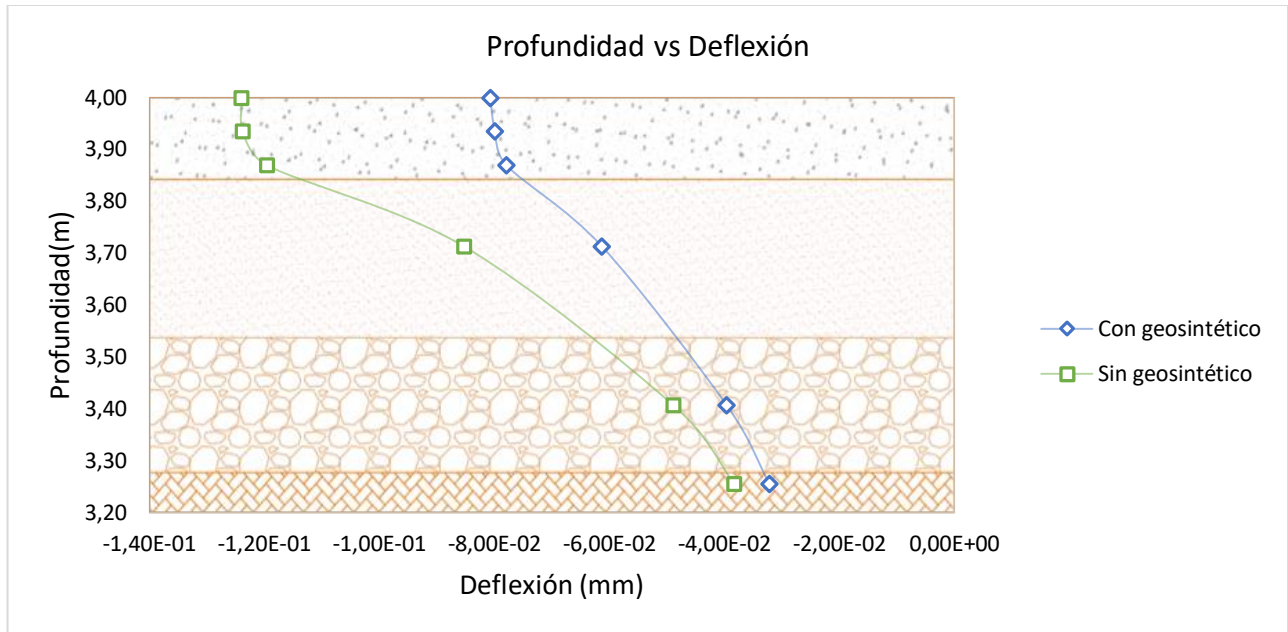


Figura 48. Gráfico de profundidad vs deflexión, contenido óptimo de agua

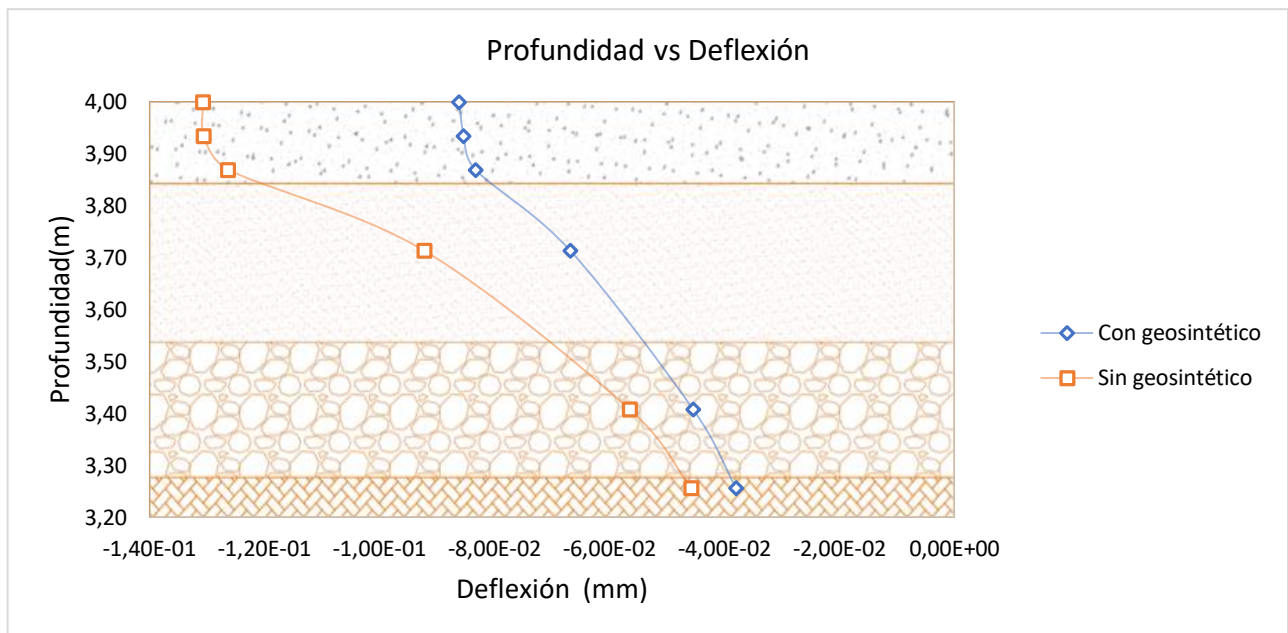


Figura 49. Gráfico de profundidad vs deflexión, contenido saturado de agua

Modelo de 42,5 kN con 100 psi

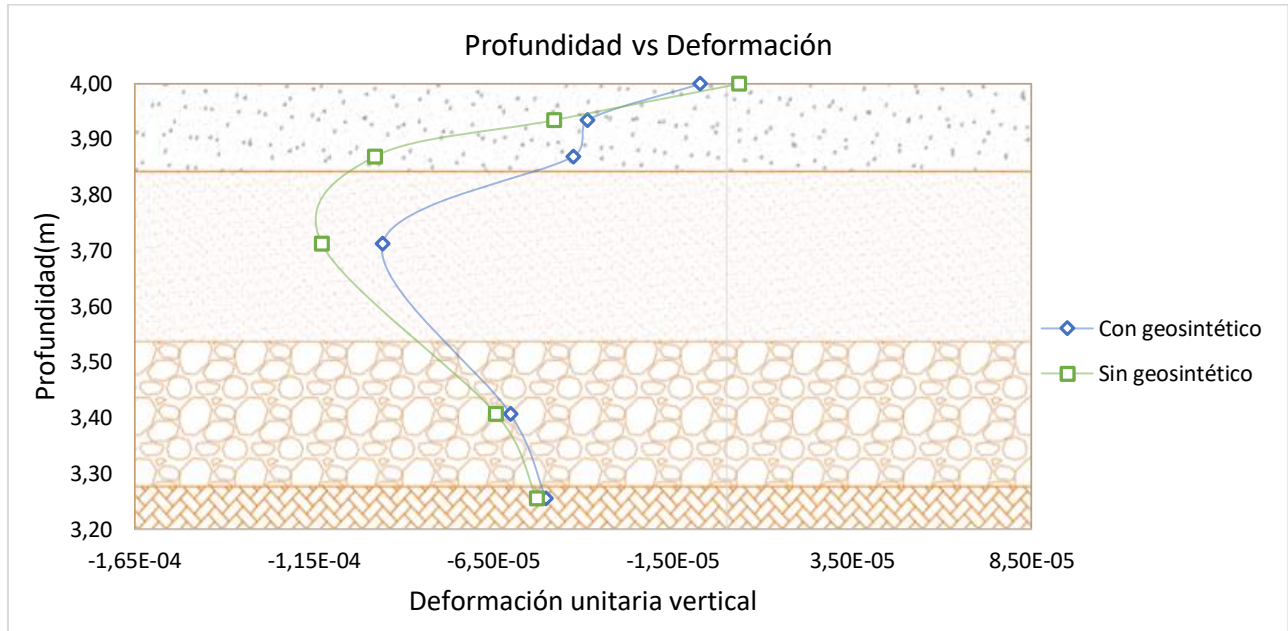


Figura 50. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje z, contenido óptimo de agua

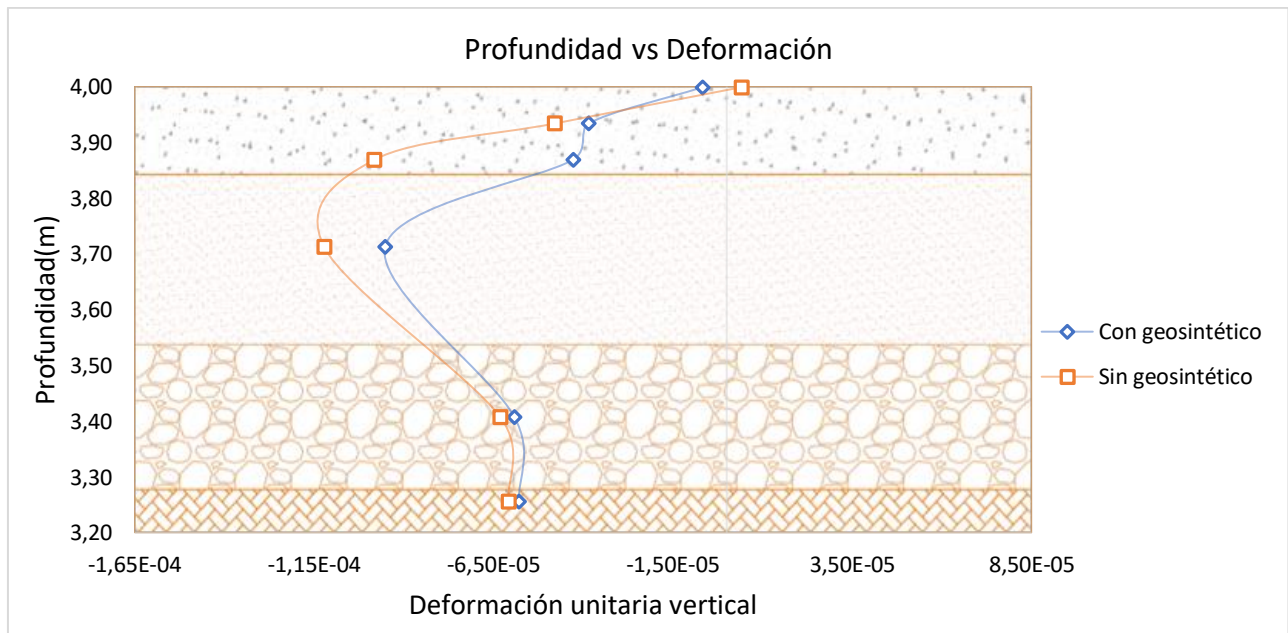


Figura 51. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje z, contenido saturado de agua

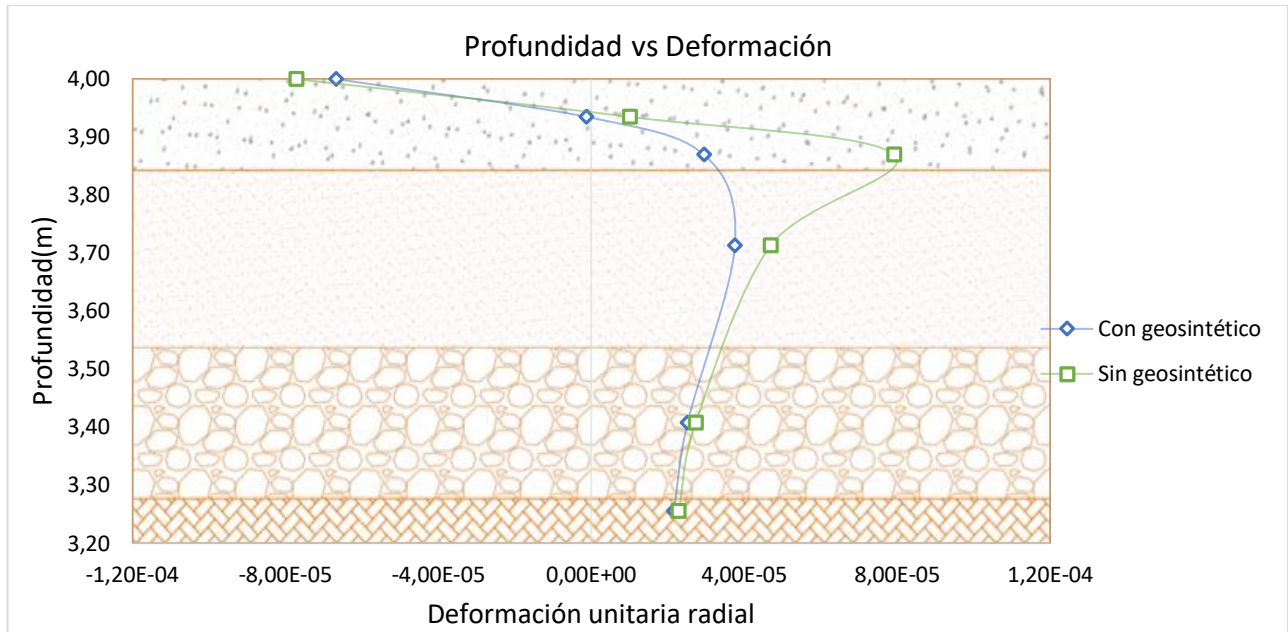


Figura 52. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje x, contenido óptimo de agua

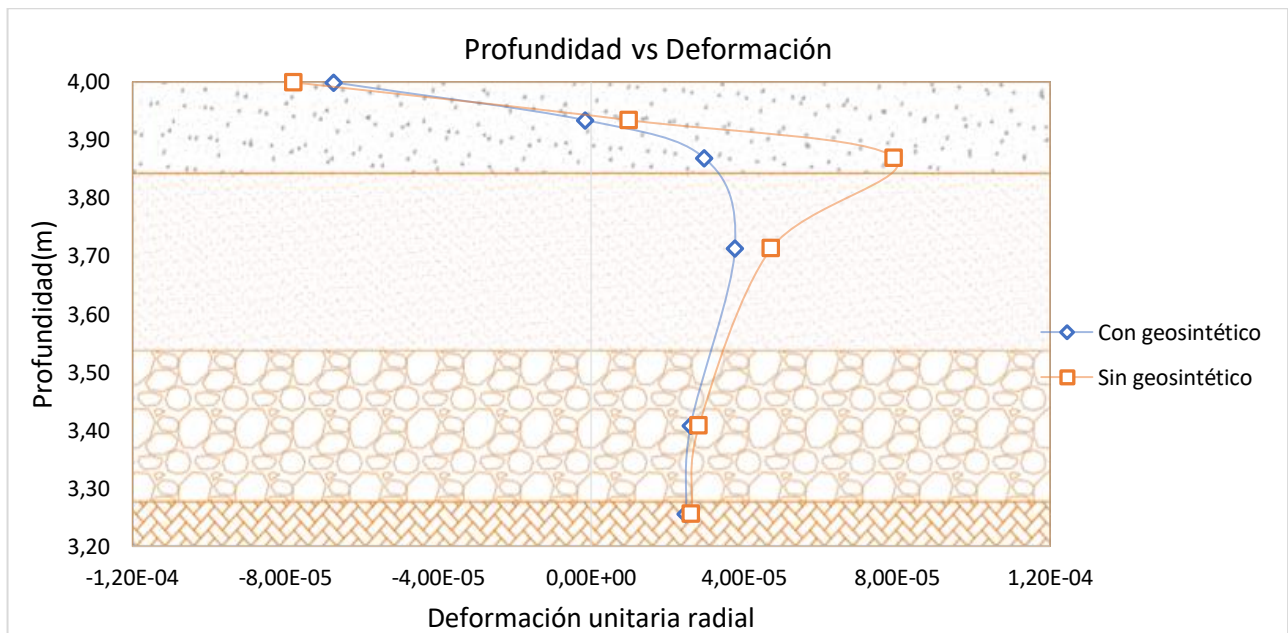


Figura 53. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje x, contenido saturado de agua

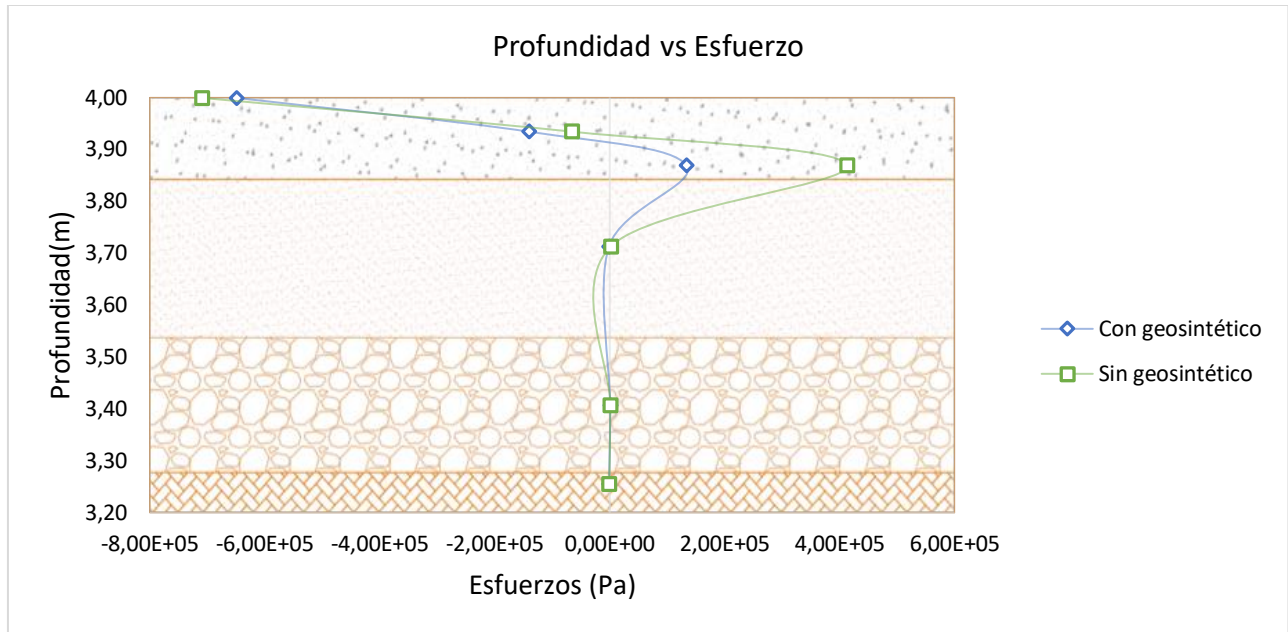


Figura 54. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje x, contenido óptimo de agua

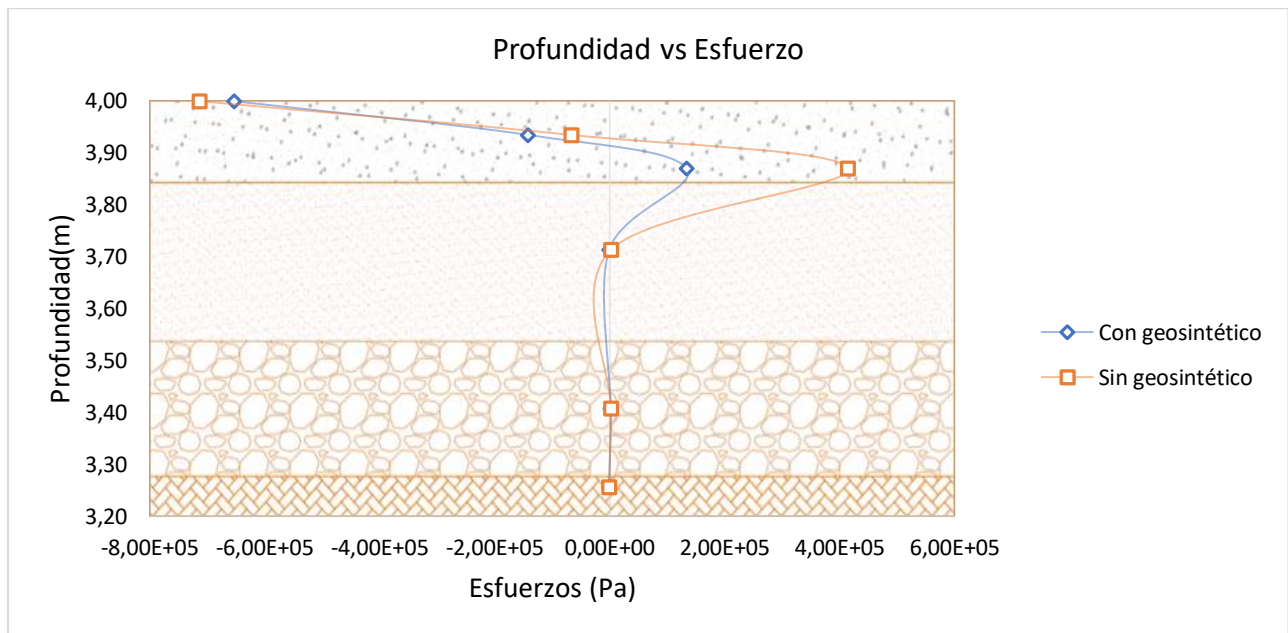


Figura 55. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje x, contenido saturado de agua

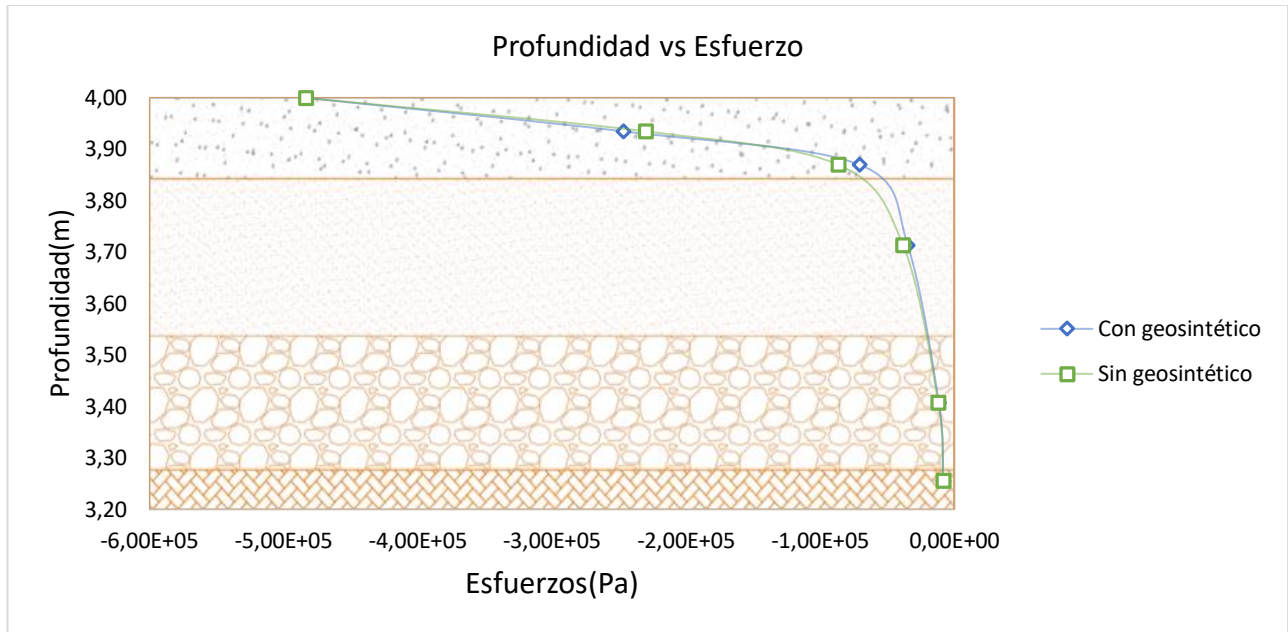


Figura 56. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje z, contenido óptimo de agua

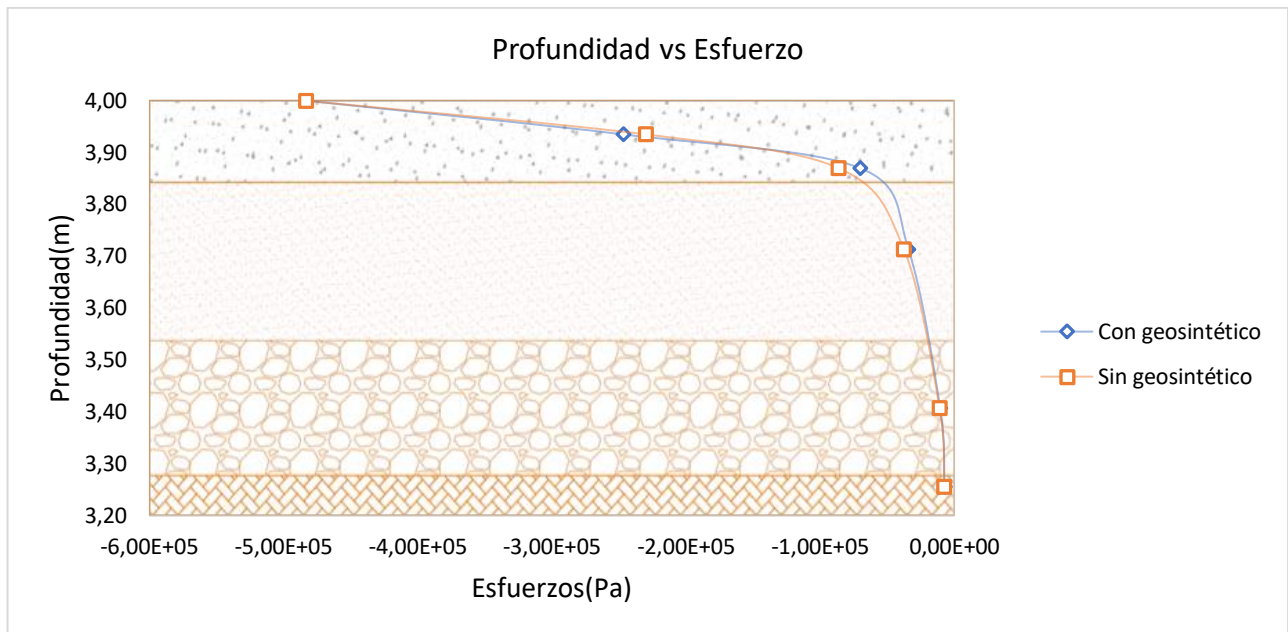


Figura 57. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje z, contenido saturado de agua

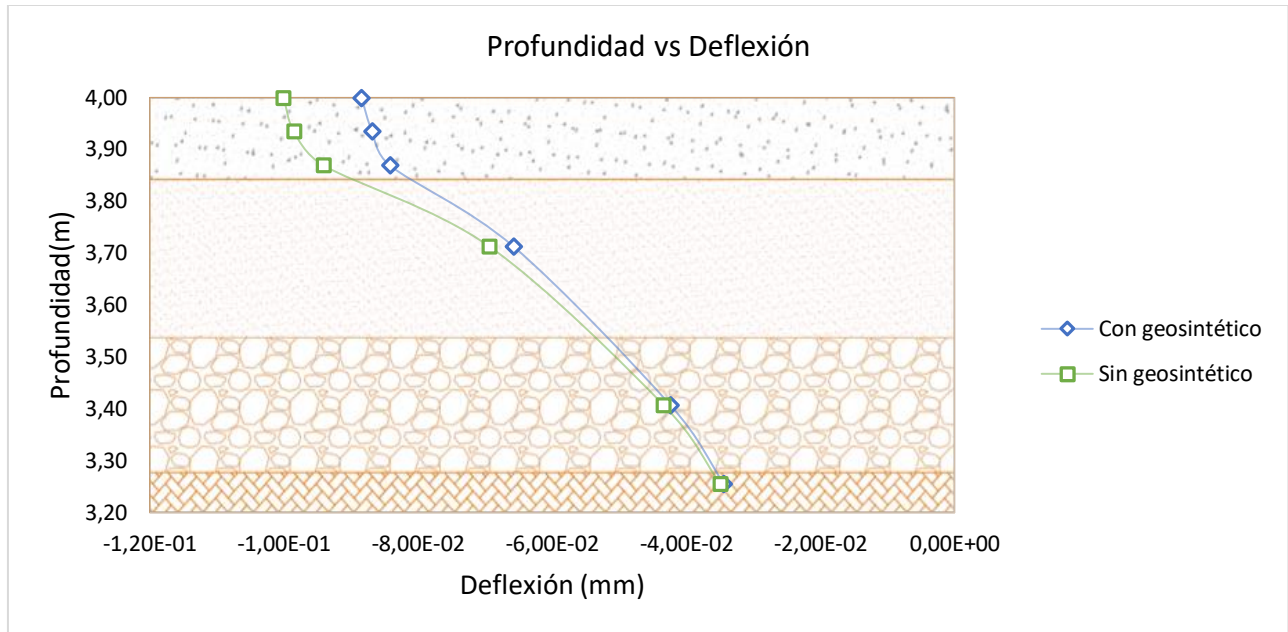


Figura 58. Gráfico de profundidad vs deflexión, contenido óptimo de agua

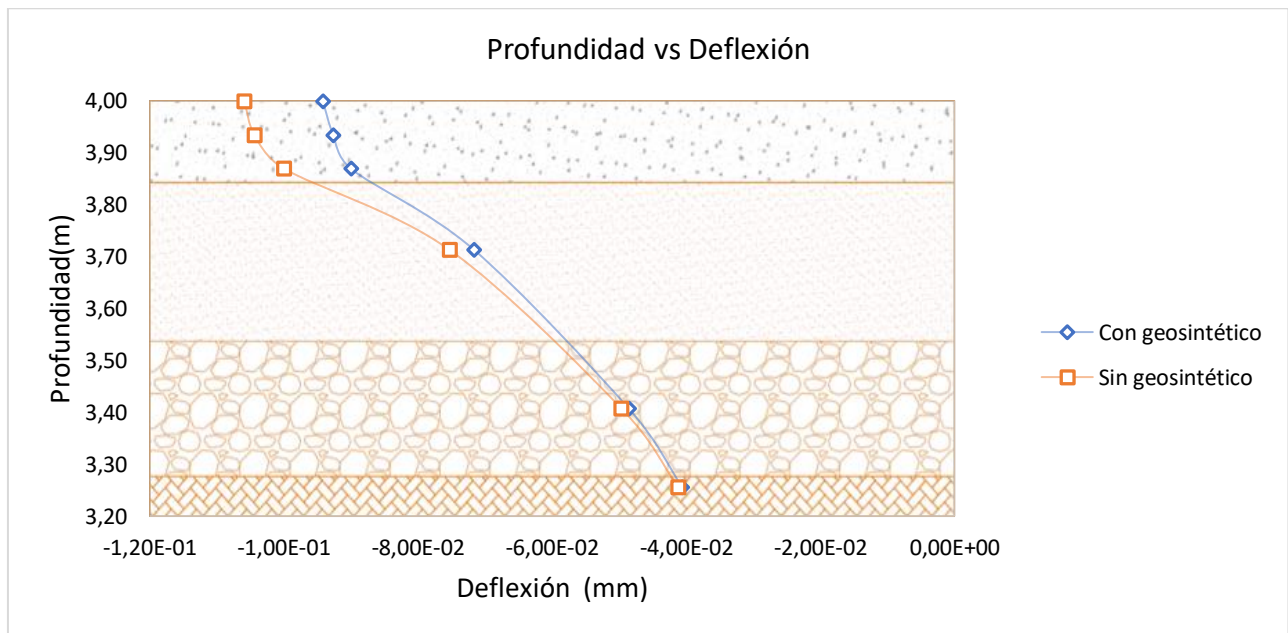


Figura 59. Gráfico de profundidad vs deflexión, contenido saturado de agua

Modelo de 42,5 kN con 115 psi

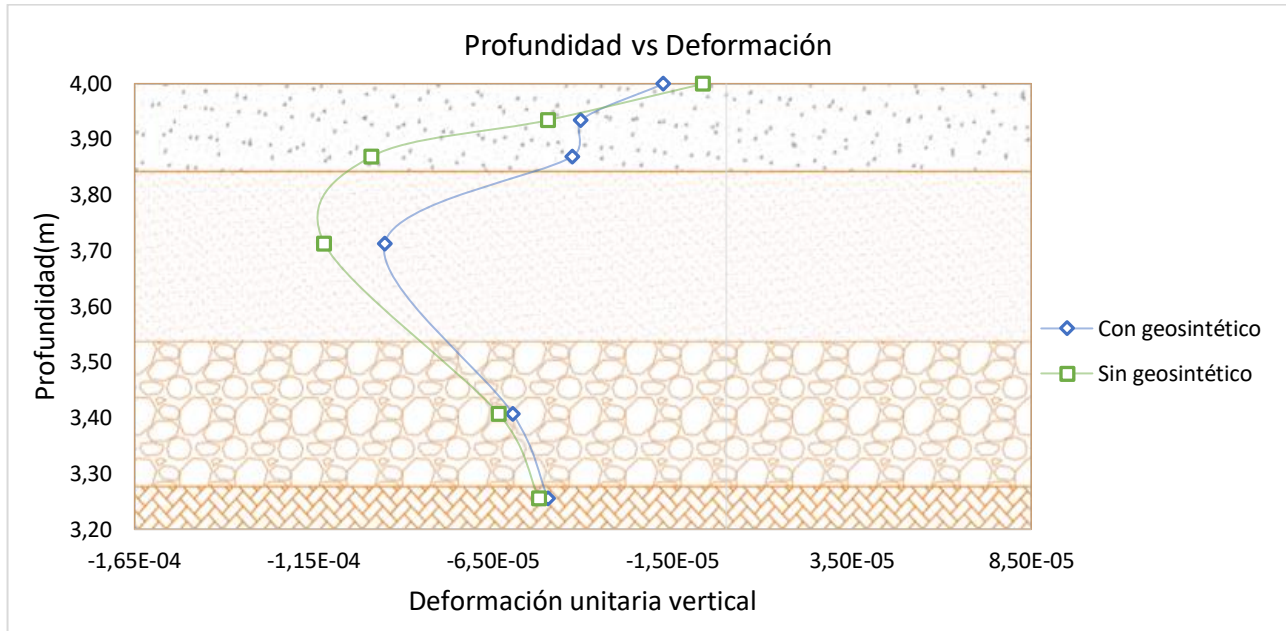


Figura 60. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje z, contenido de óptimo agua

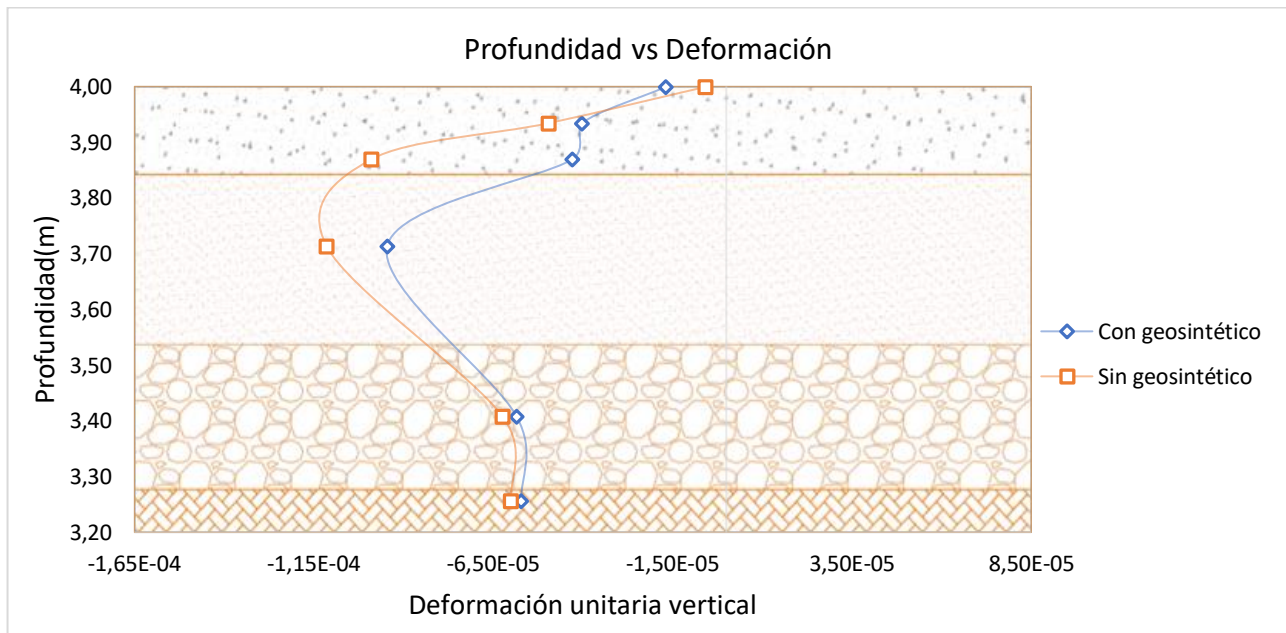


Figura 61. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje z, contenido saturado de agua

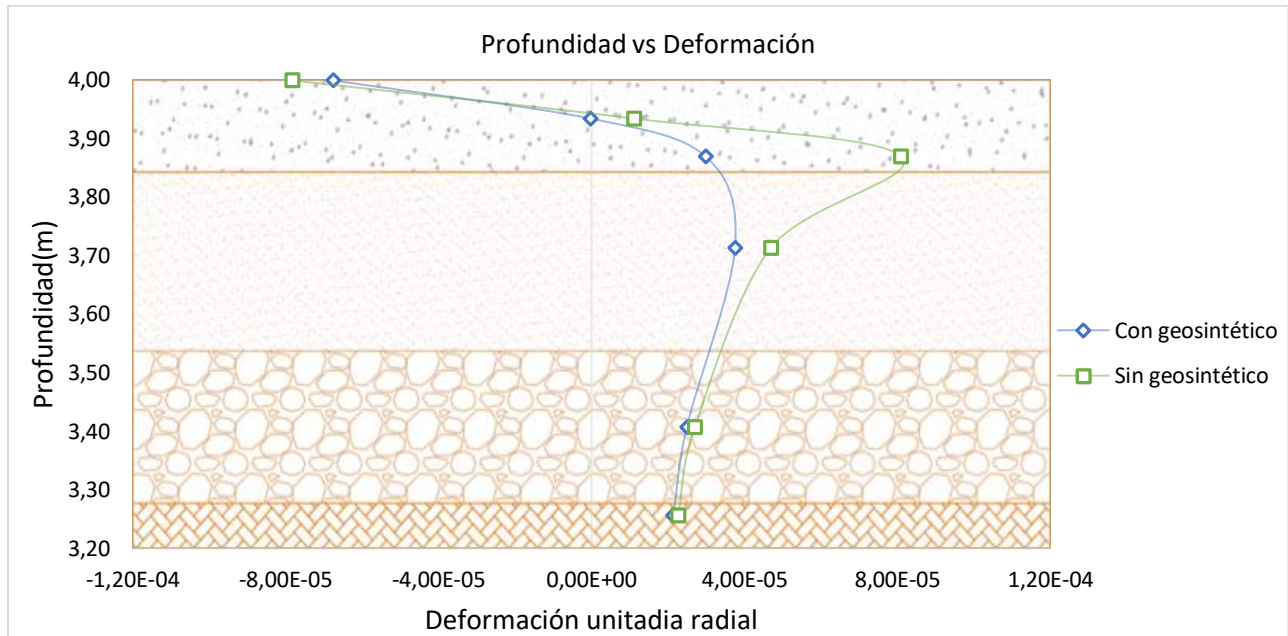


Figura 62. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje x, contenido óptimo de agua

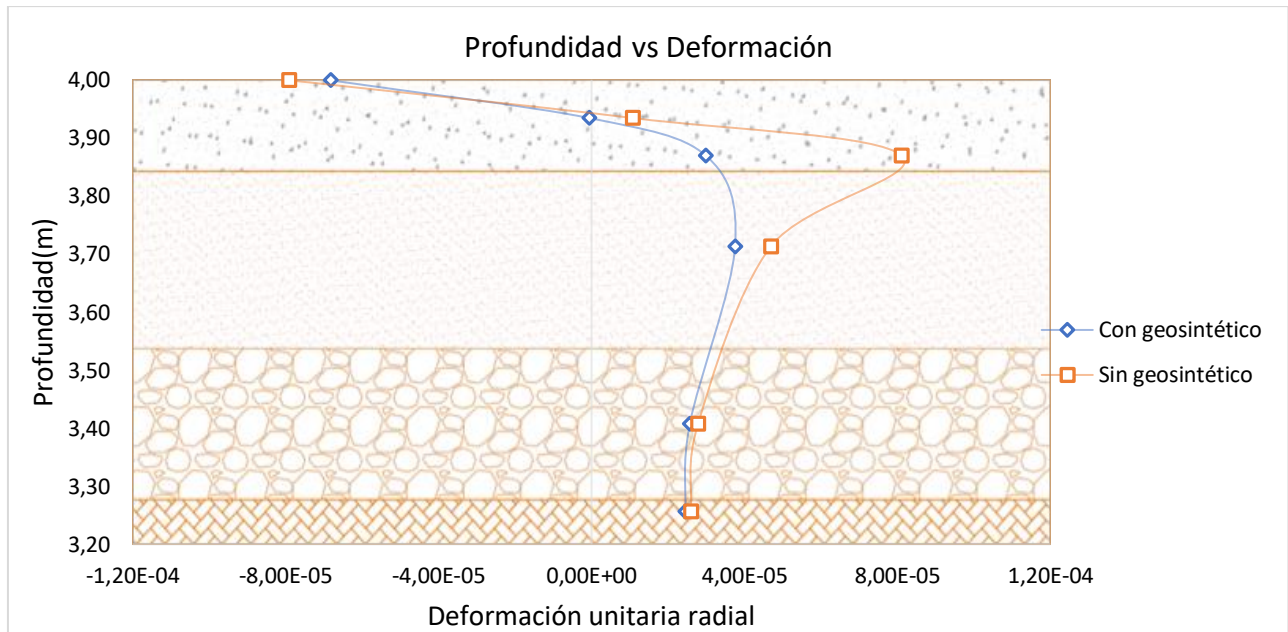


Figura 63. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje x, contenido saturado de agua

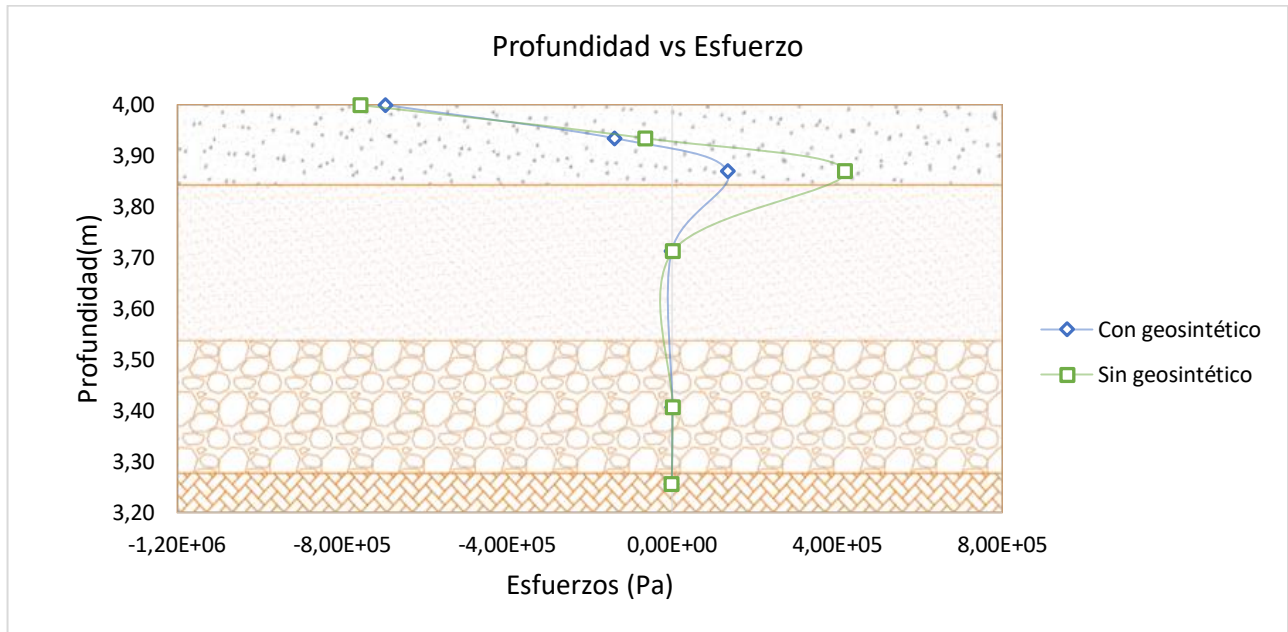


Figura 64. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje x, contenido óptimo de agua

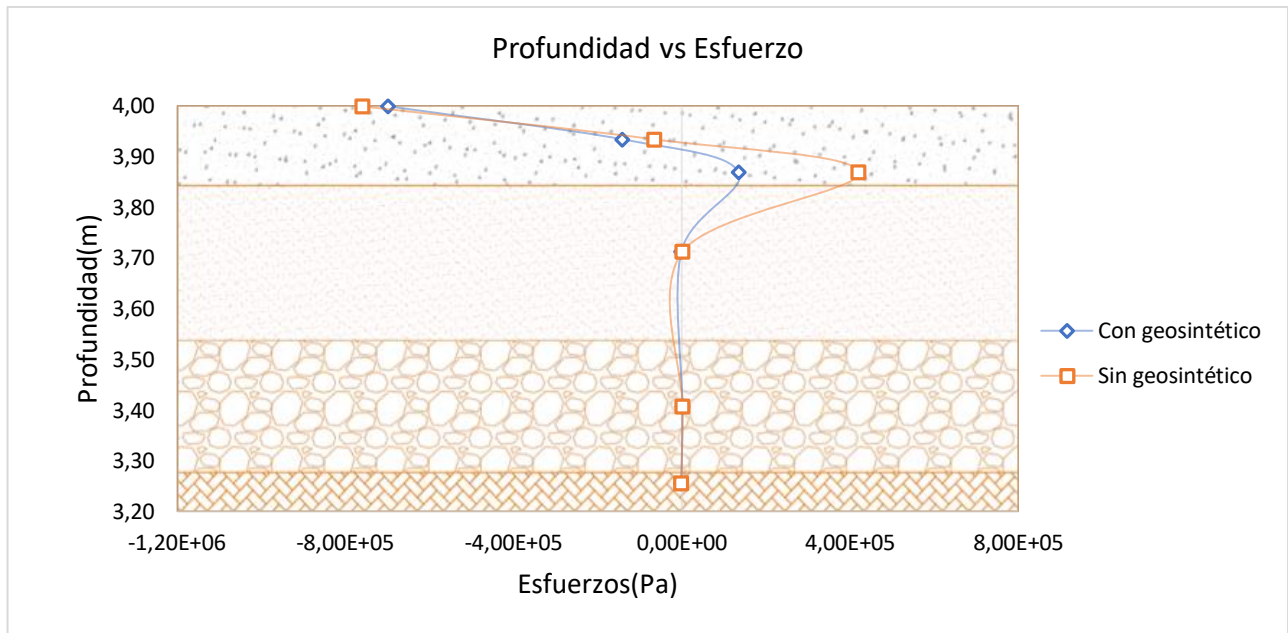


Figura 65. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje x, contenido saturado de agua

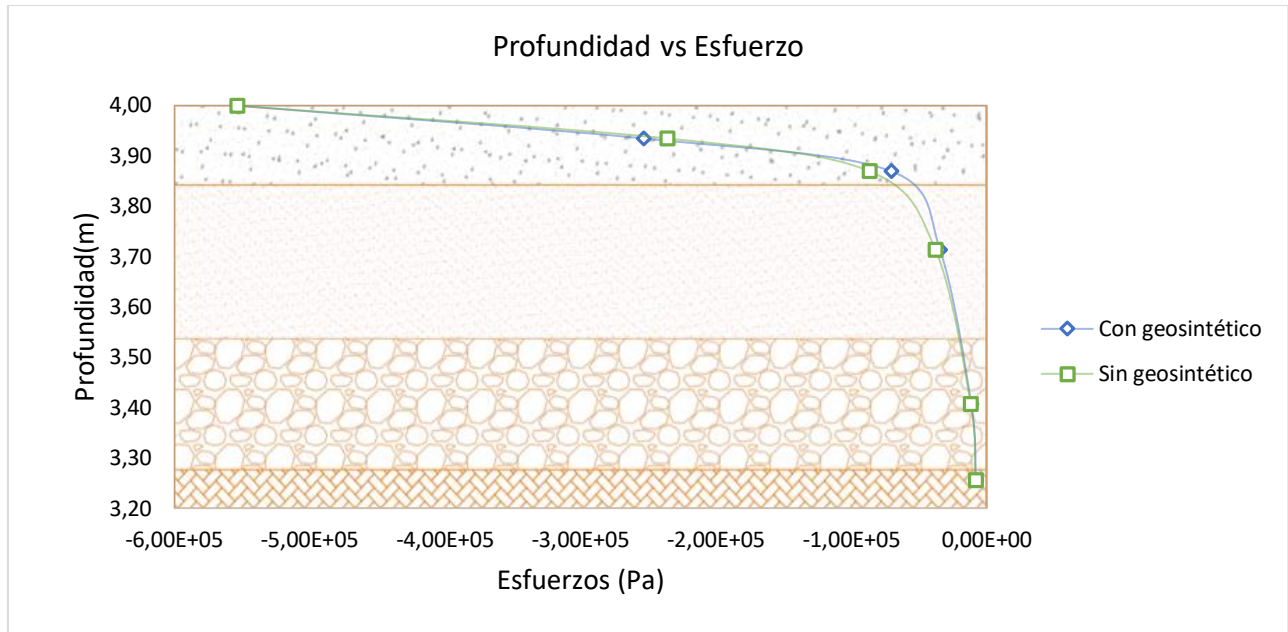


Figura 66. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje z, contenido óptimo de agua

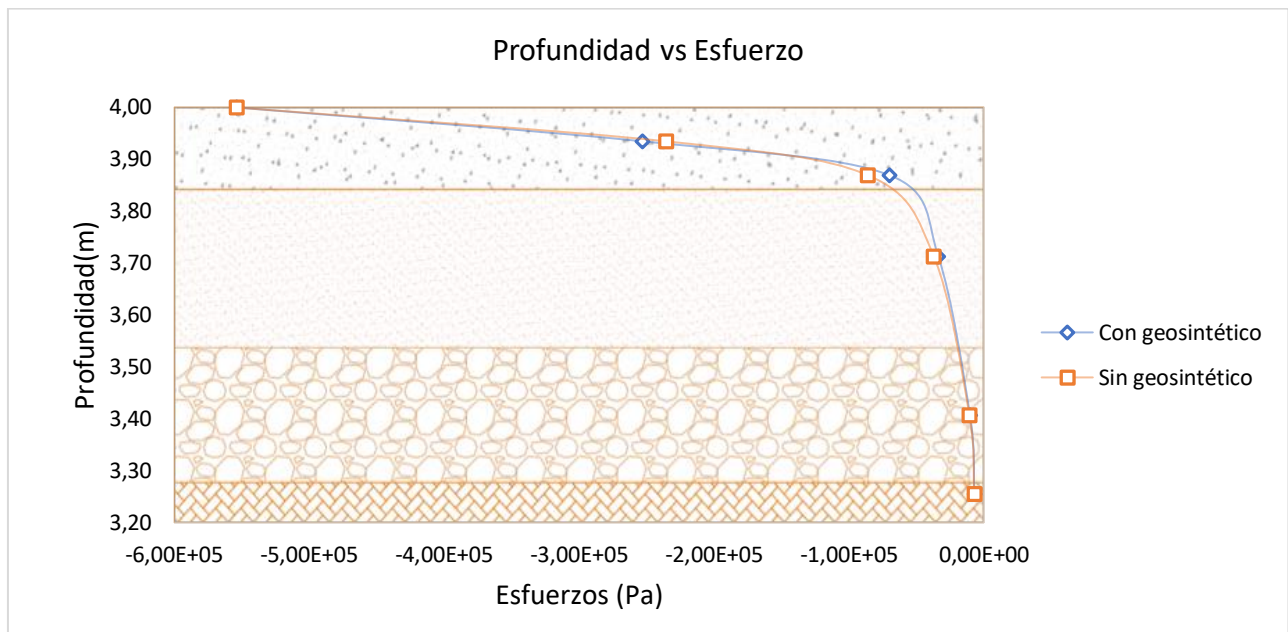


Figura 67. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje z, contenido saturado de agua.

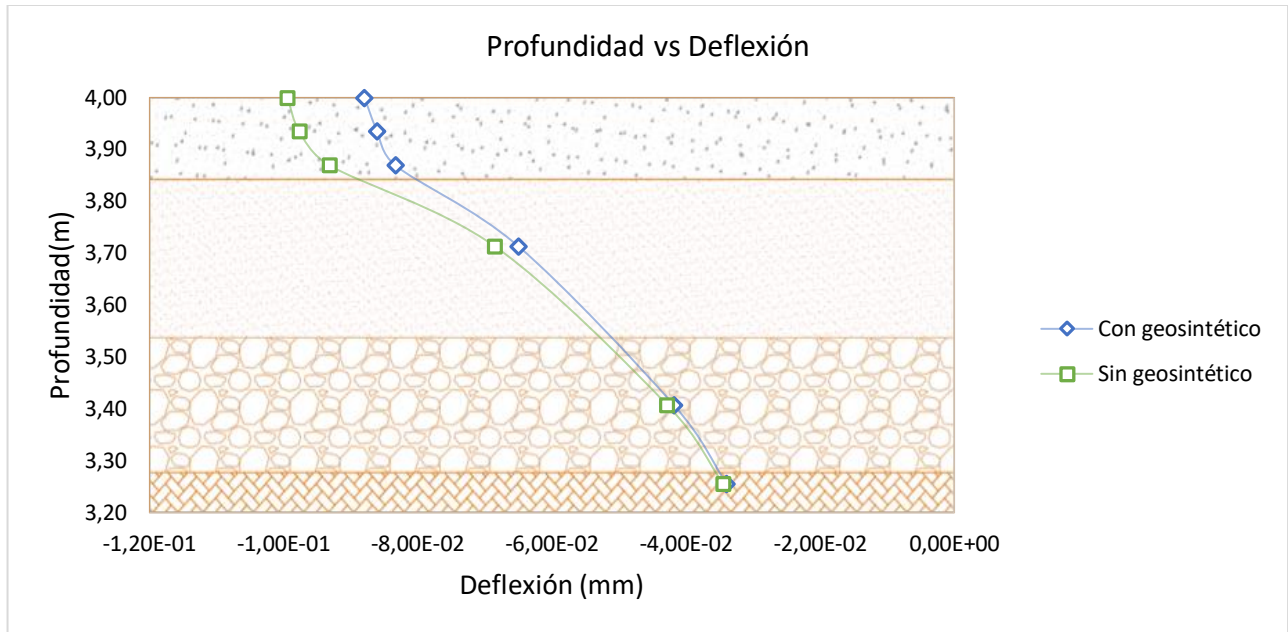


Figura 68. Gráfico de profundidad vs deflexión, contenido óptimo de agua

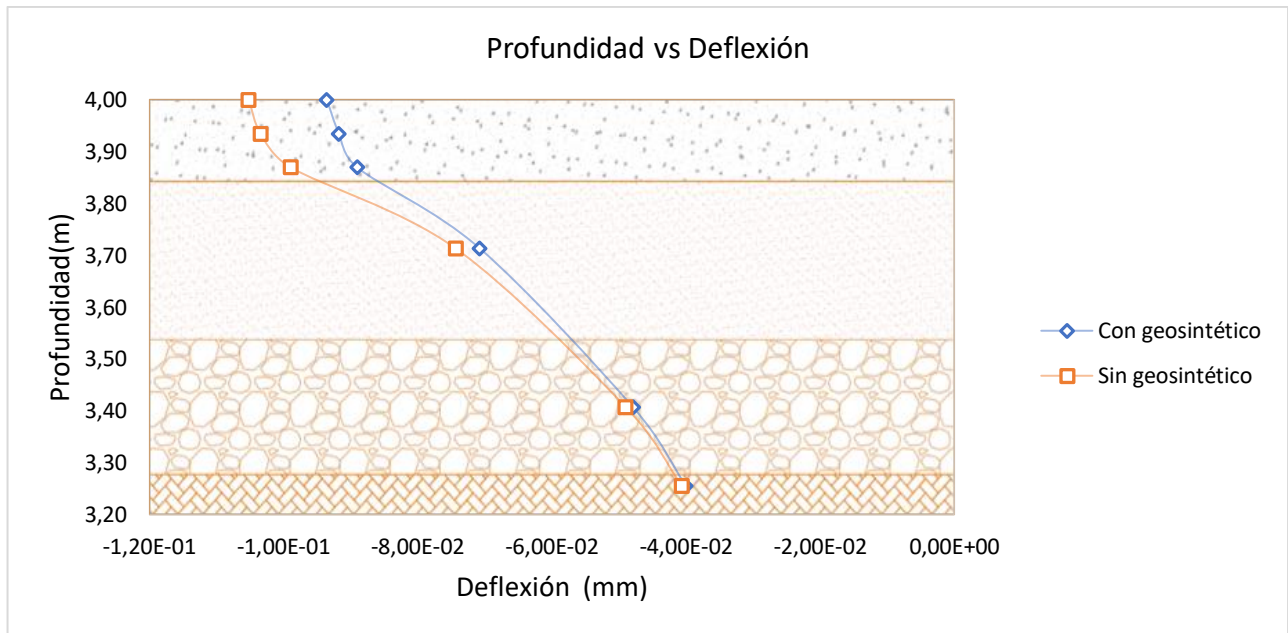


Figura 69. Gráfico de profundidad vs deflexión, contenido saturado de agua

Modelo de 62,5 kN con 80 psi

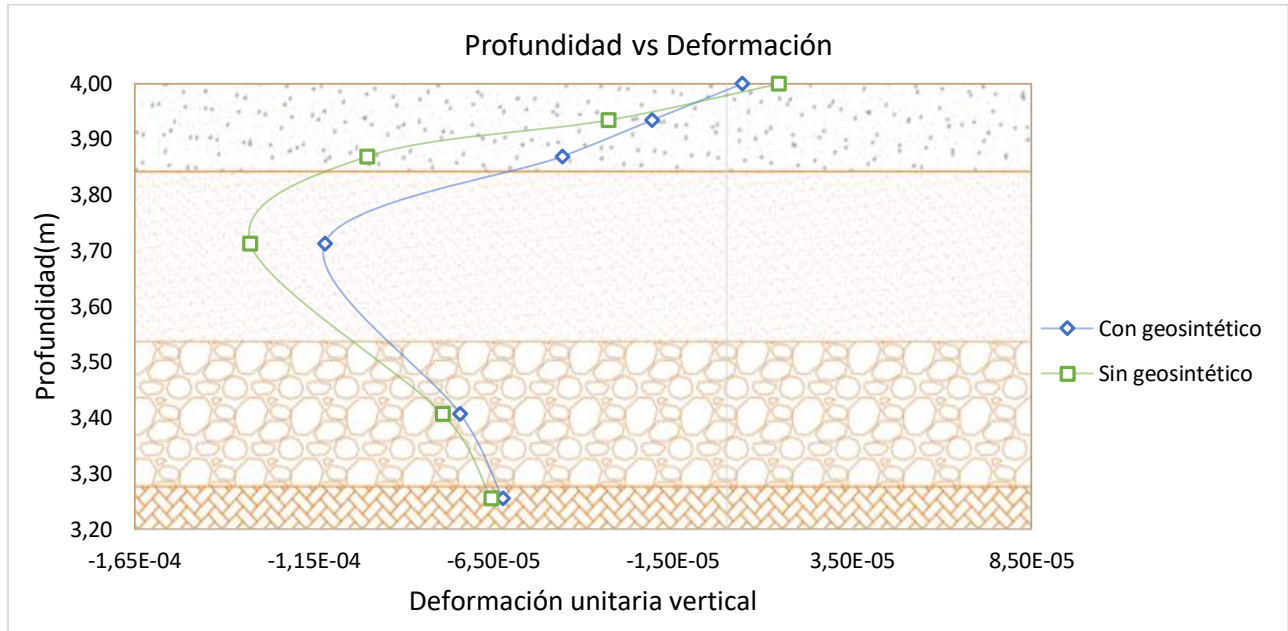


Figura 70. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje z, contenido óptimo de agua

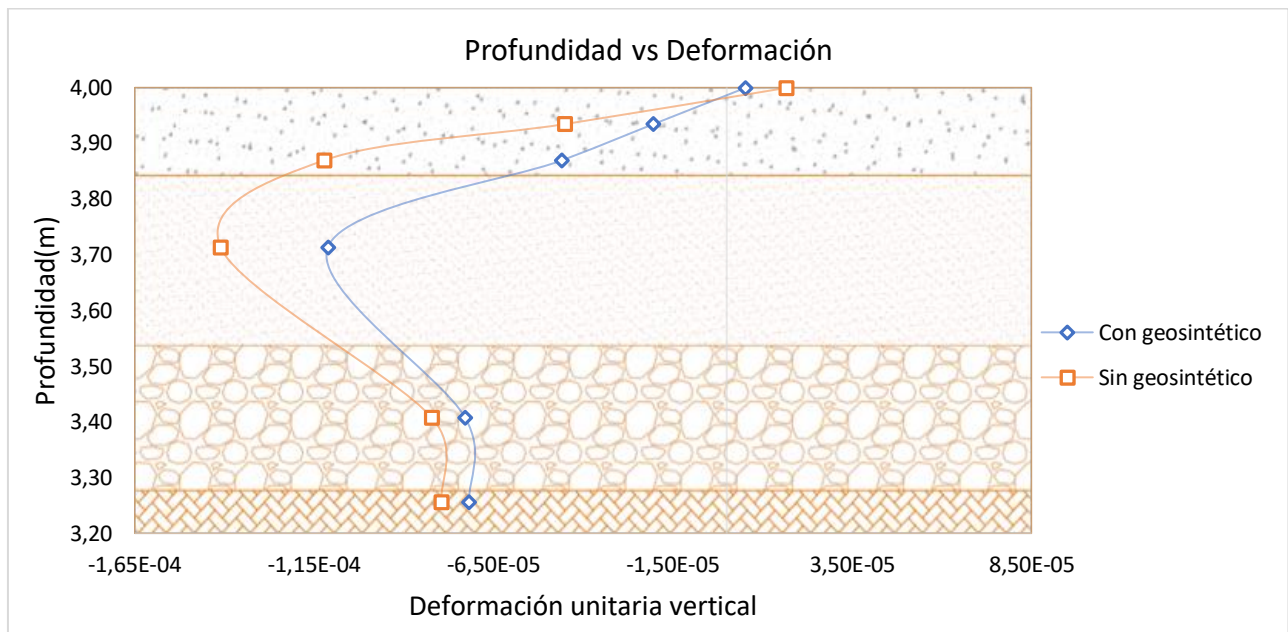


Figura 71. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje z, contenido saturado de agua

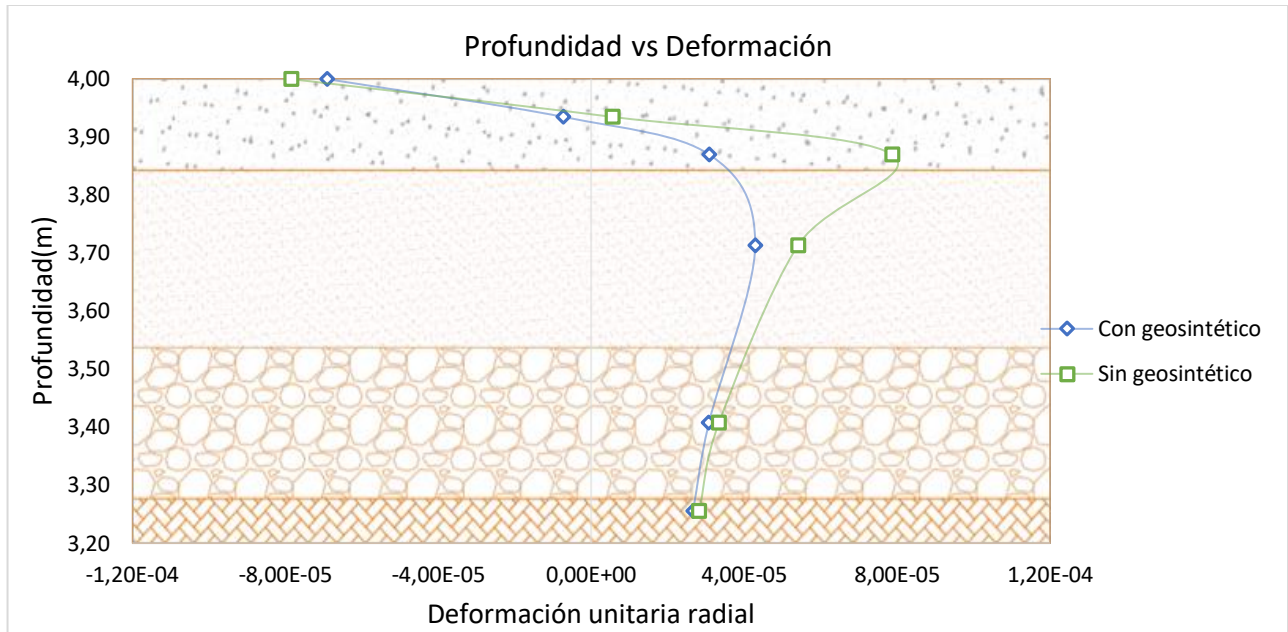


Figura 72. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje x, contenido óptimo de agua

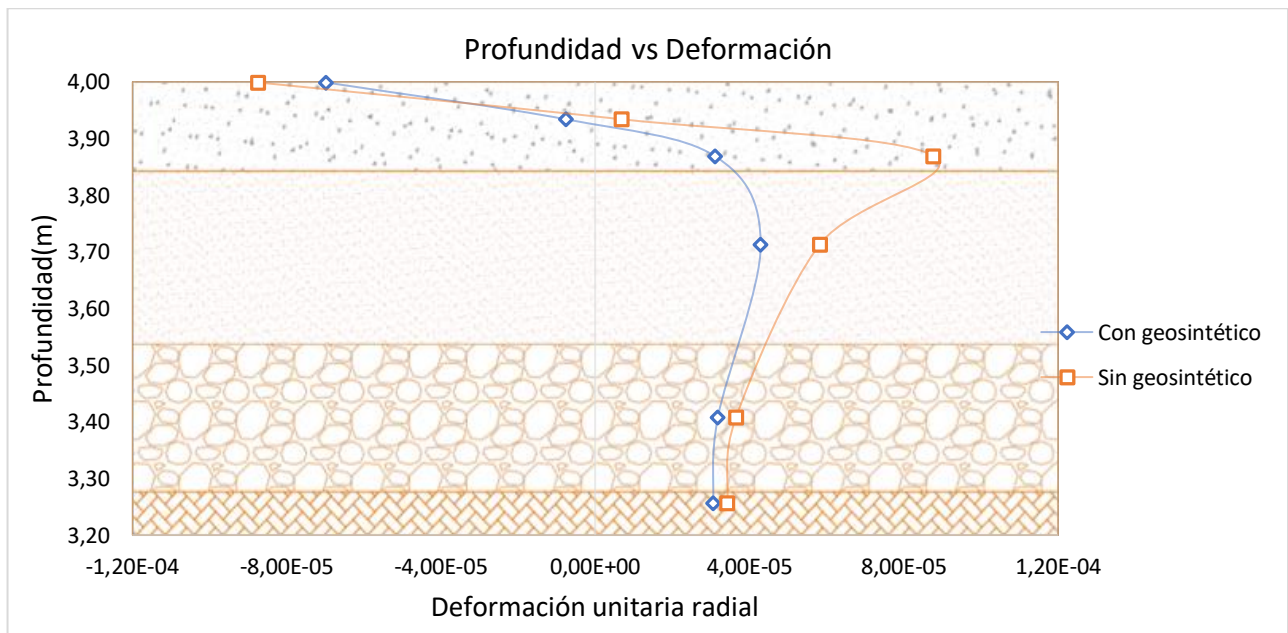


Figura 73. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje x, contenido saturado de agua

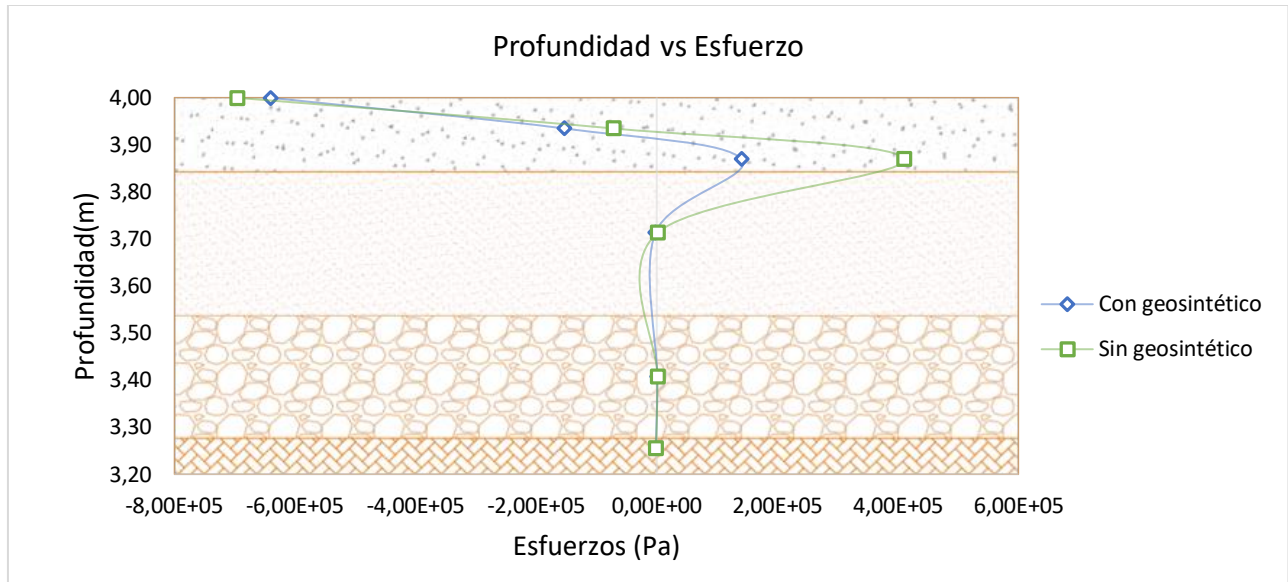


Figura 74. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje x, contenido óptimo de agua

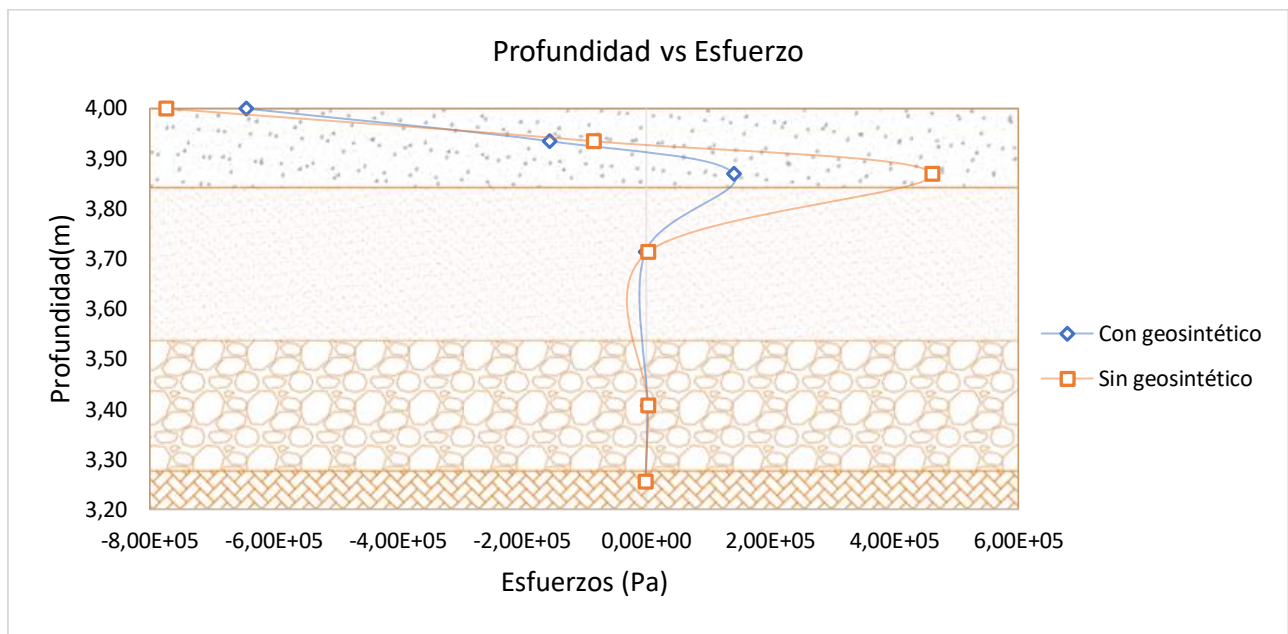


Figura 75. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje x, contenido saturado de agua

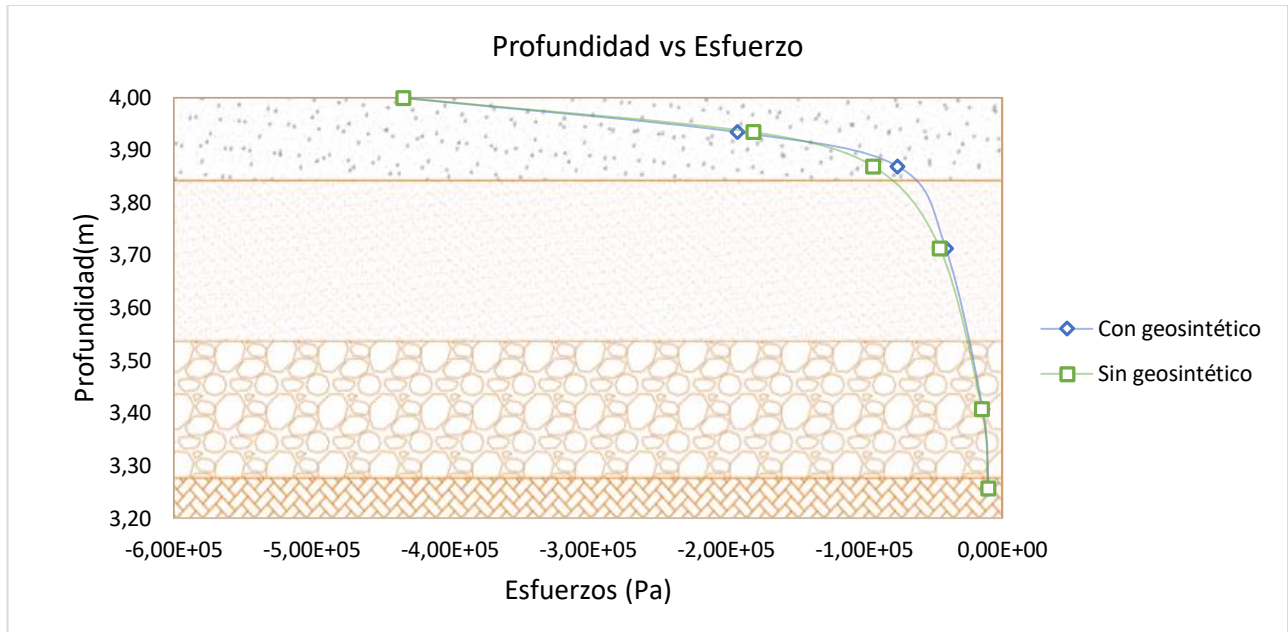


Figura 76. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje z, contenido óptimo de agua

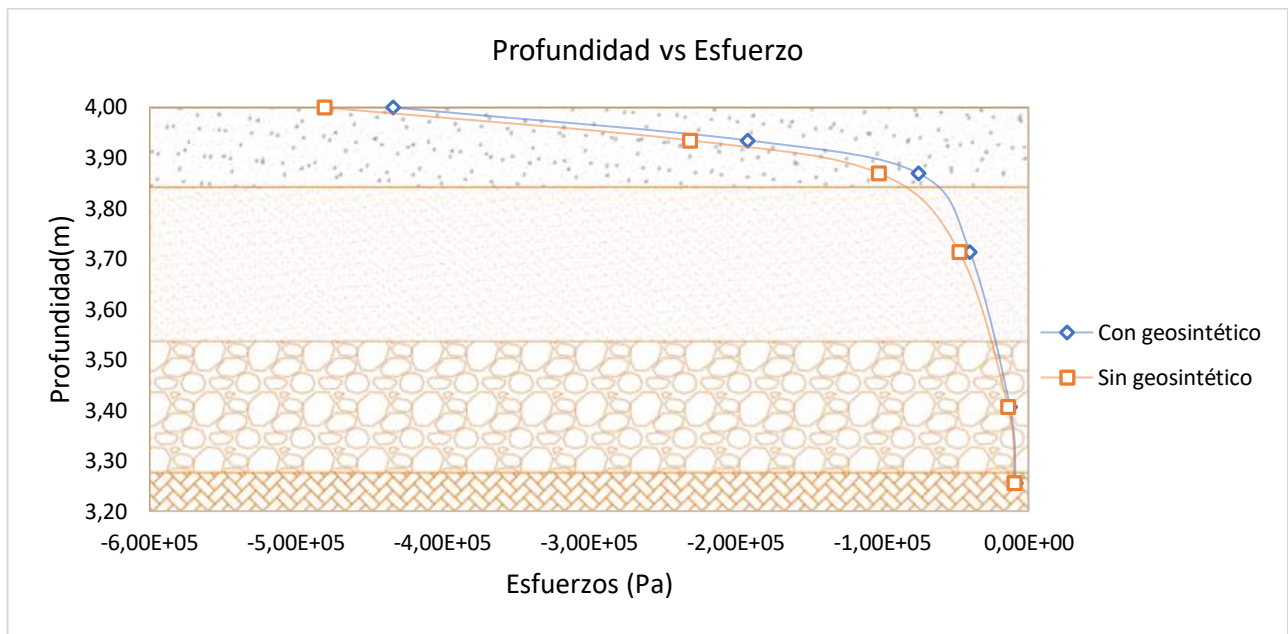


Figura 77. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje z, contenido saturado de agua

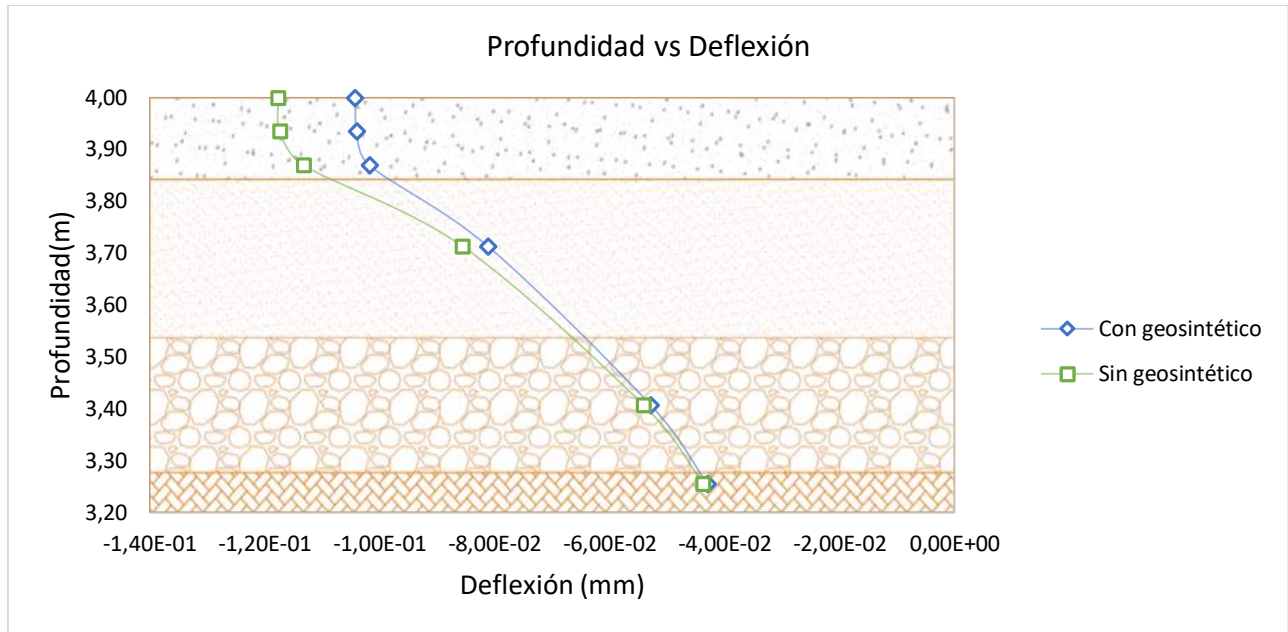


Figura 78. Gráfico de profundidad vs deflexión, contenido óptimo de agua

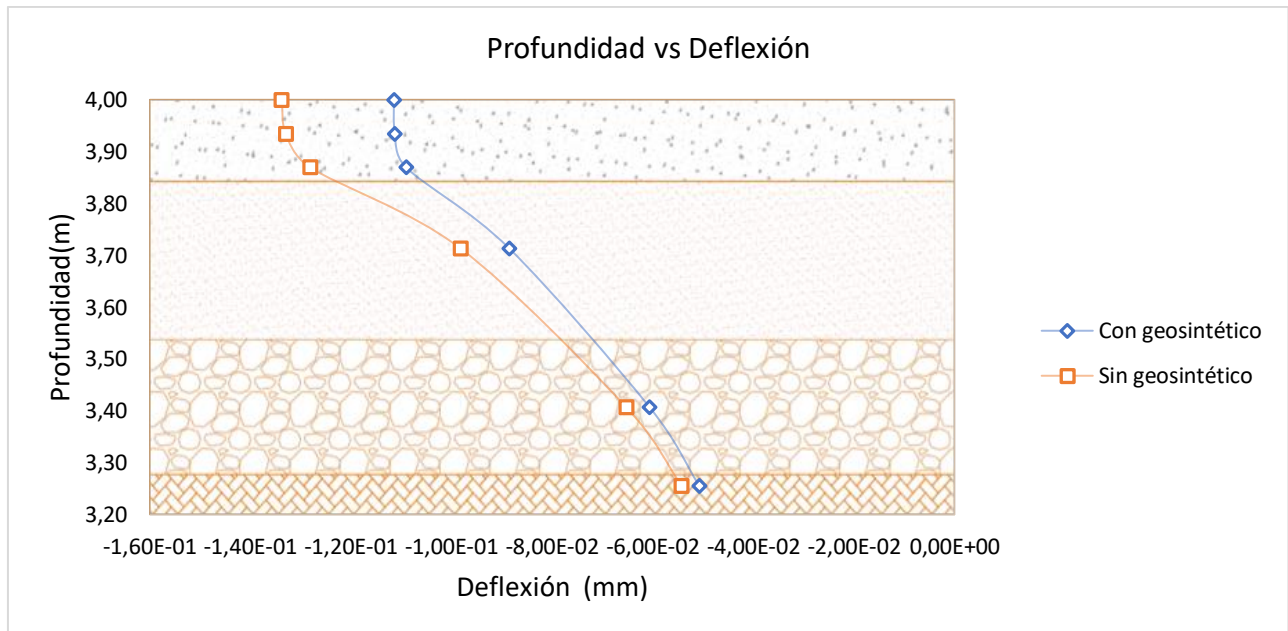


Figura 79. Gráfico de profundidad vs deflexión, contenido saturado de agua

Modelo de 61,7 kN con 100 psi

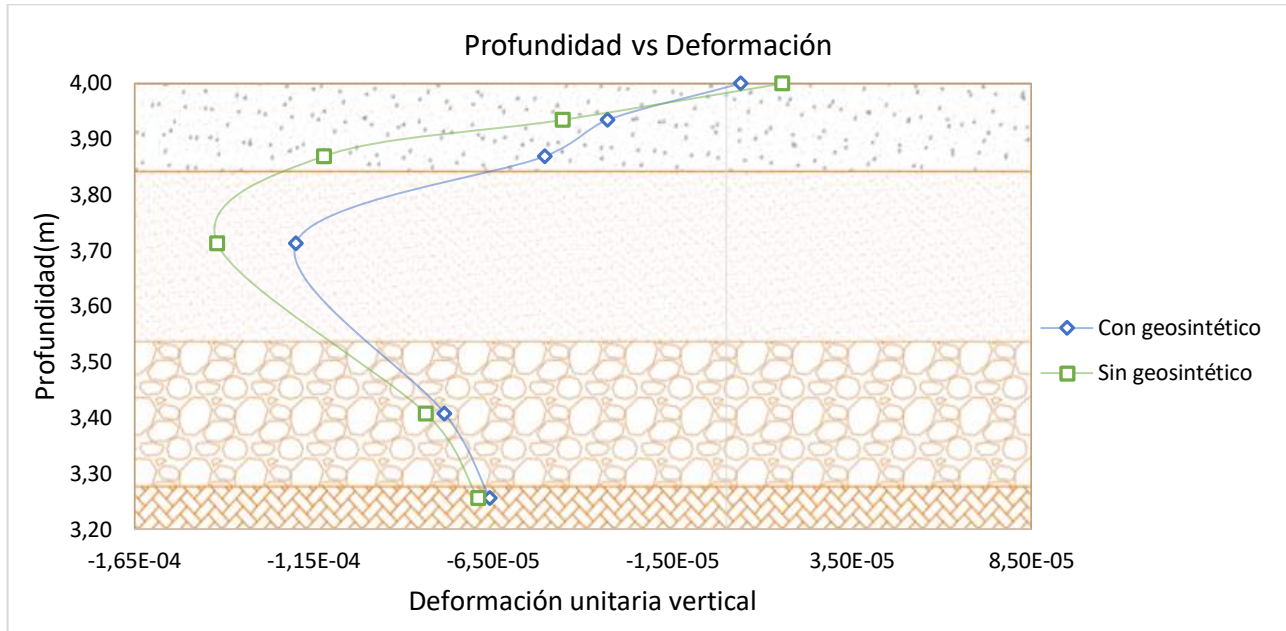


Figura 80. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje z, contenido óptimo de agua

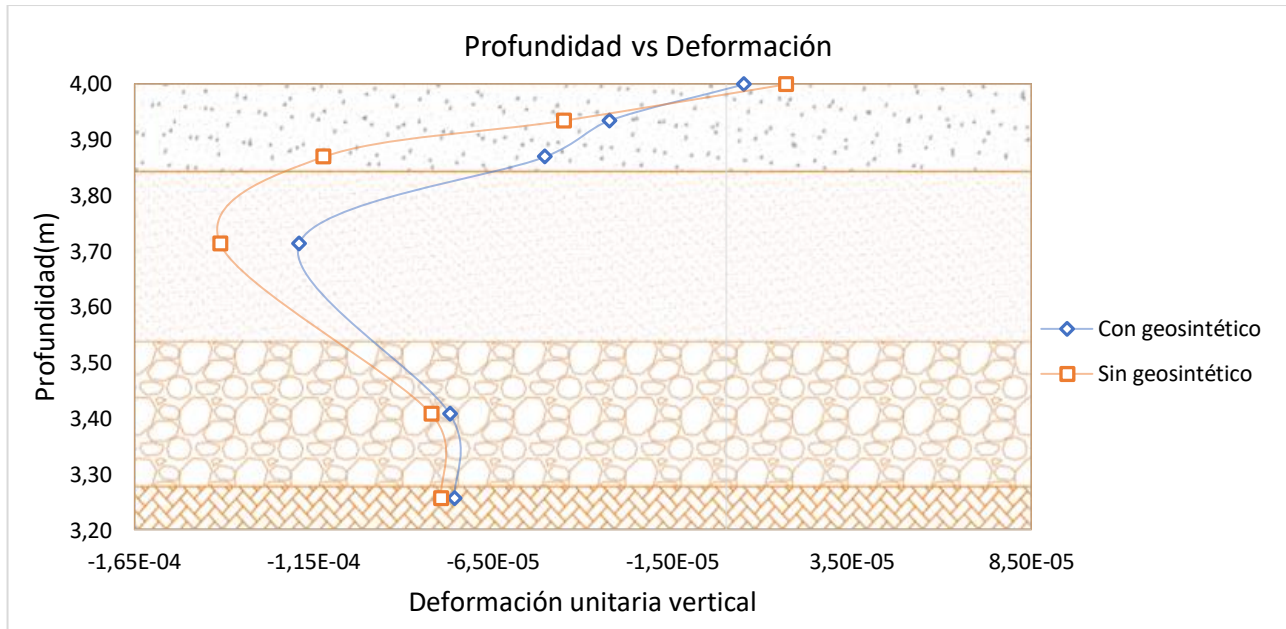


Figura 81. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje z, contenido saturado de agua

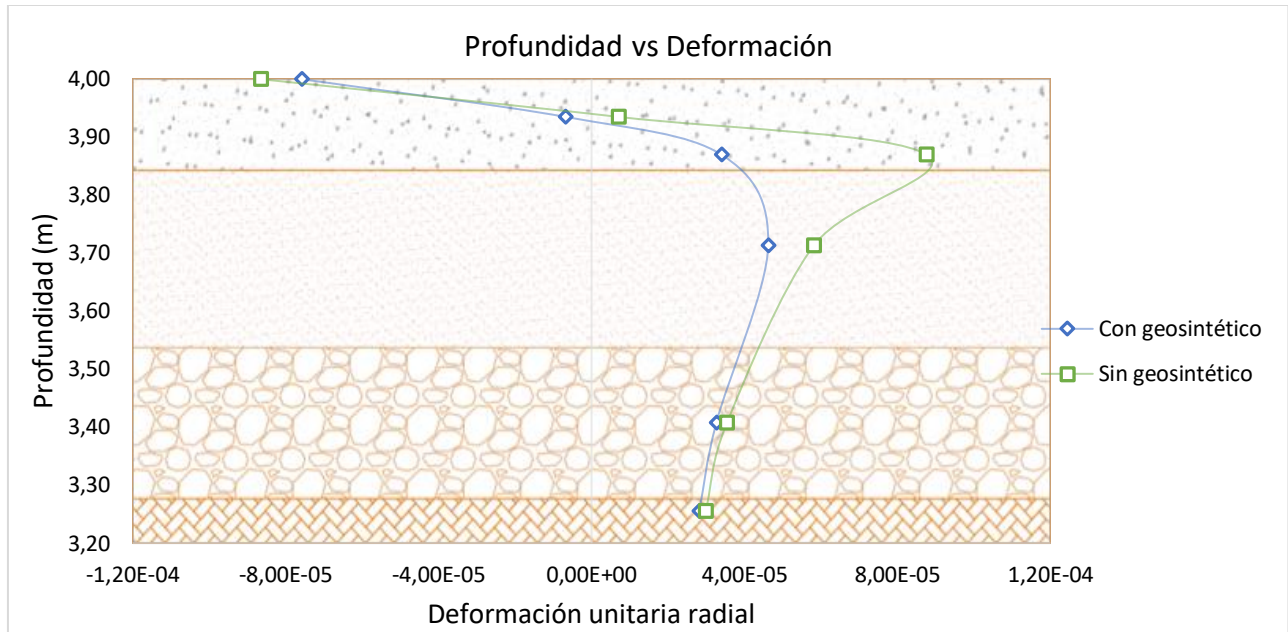


Figura 82. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje x, contenido óptimo de agua

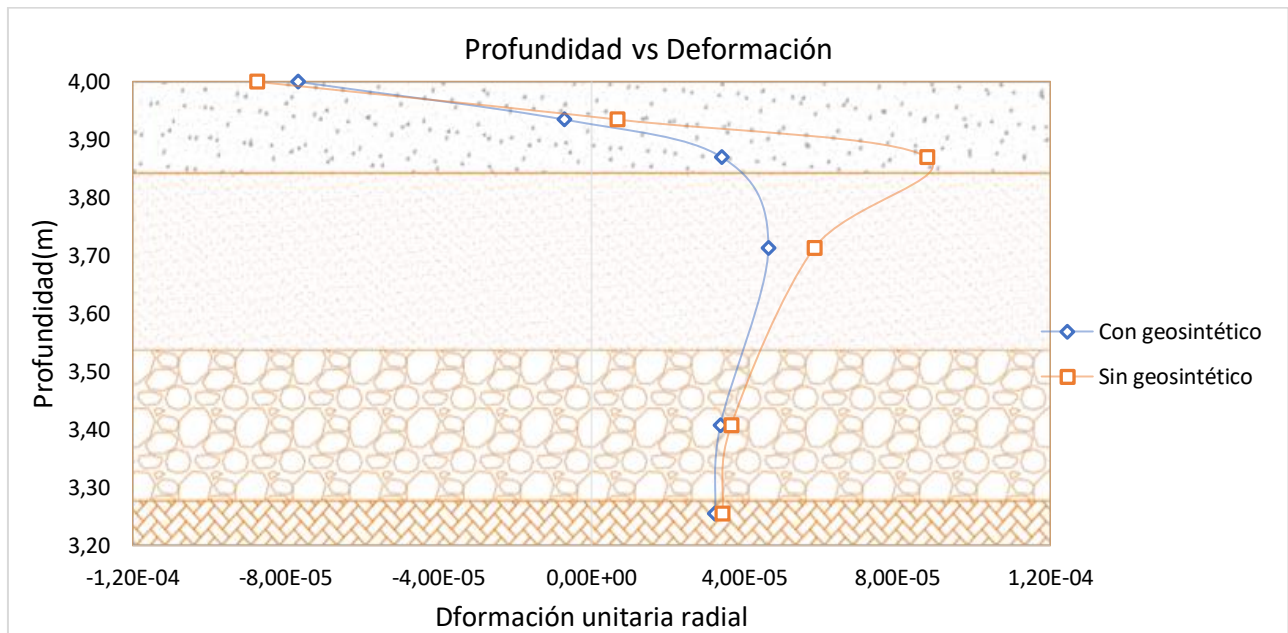


Figura 83. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje x, contenido saturado de agua

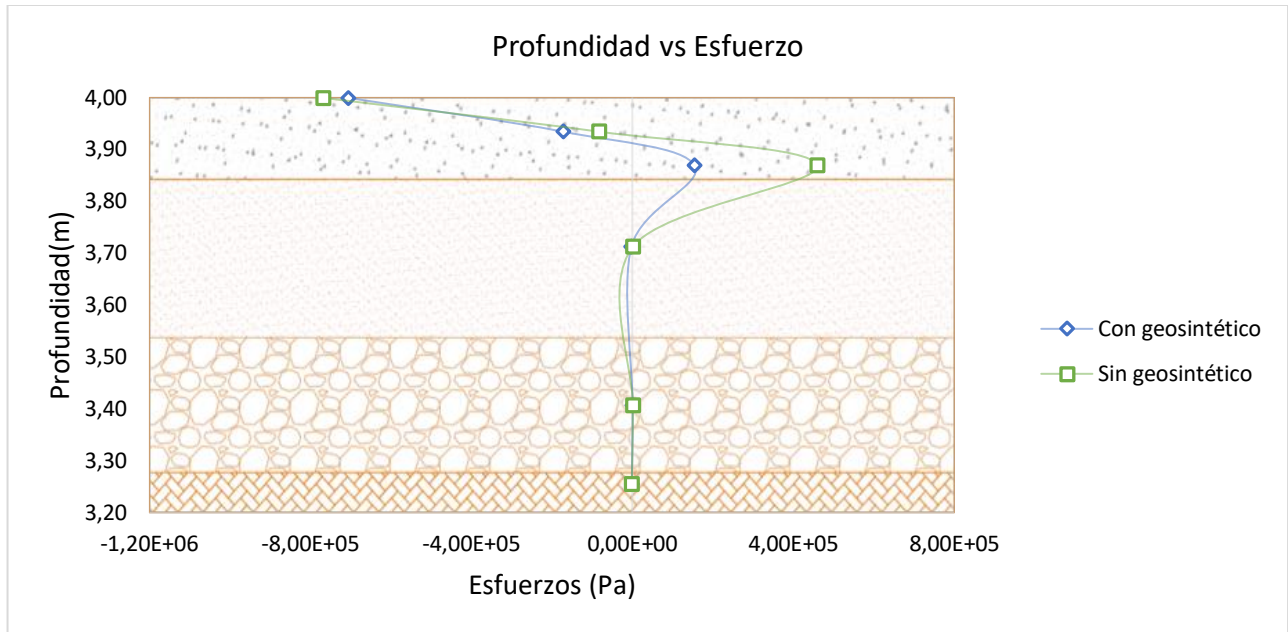


Figura 84. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje x, contenido óptimo de agua

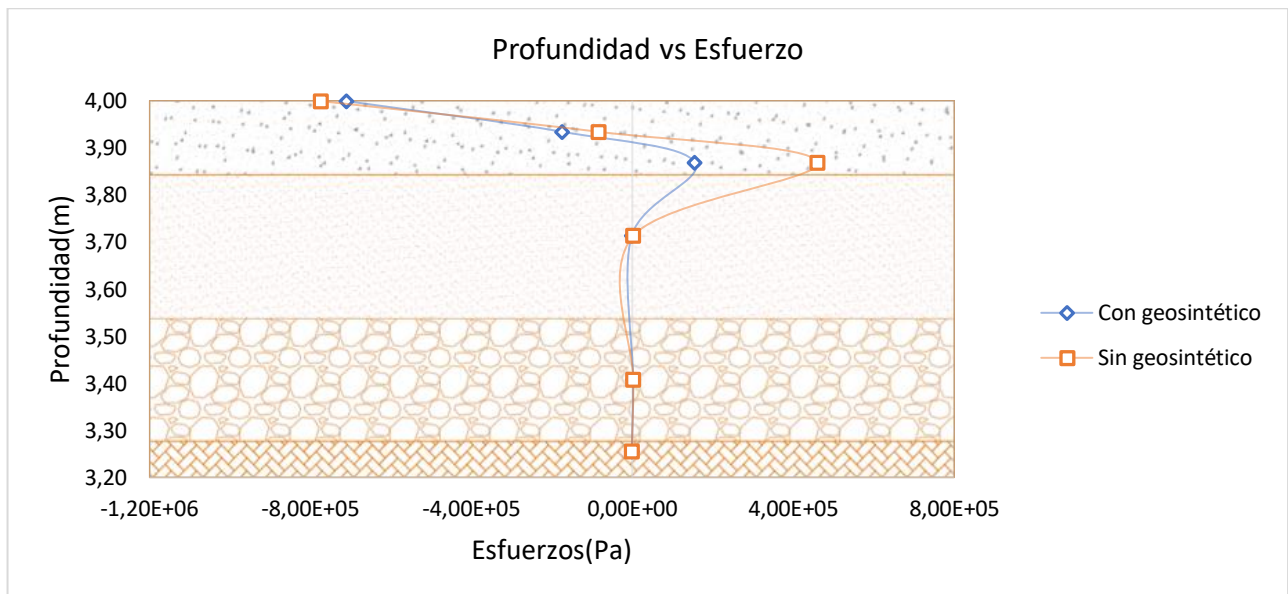


Figura 85. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje x, contenido saturado de agua

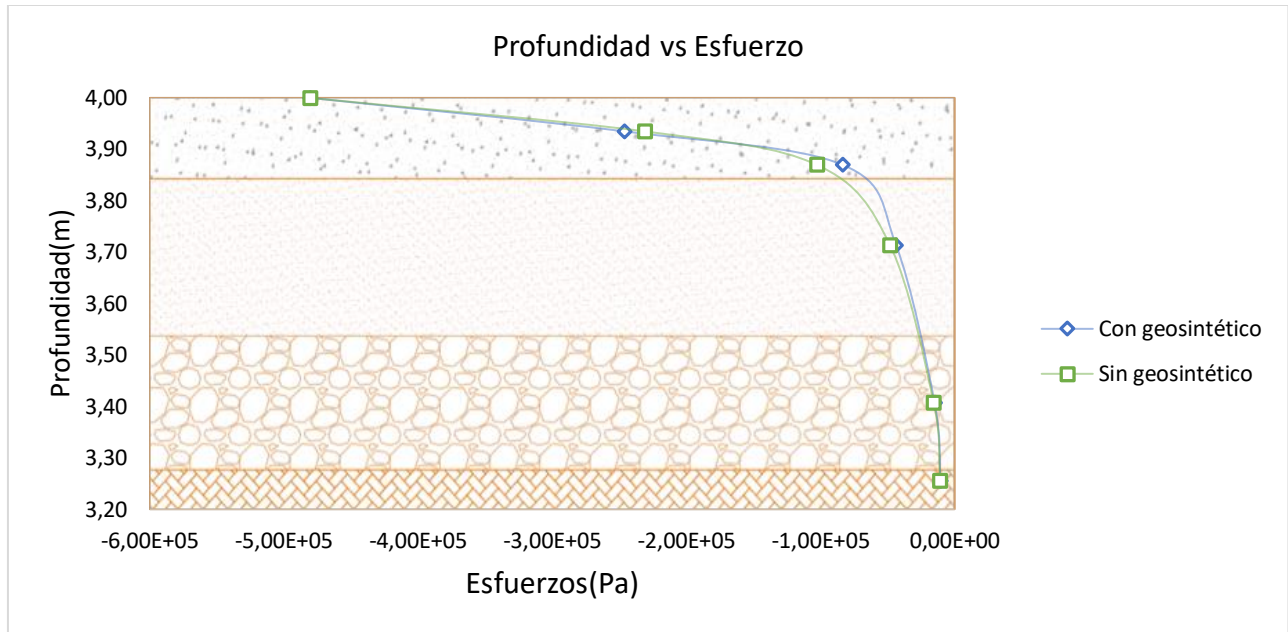


Figura 86. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje z, contenido óptimo de agua

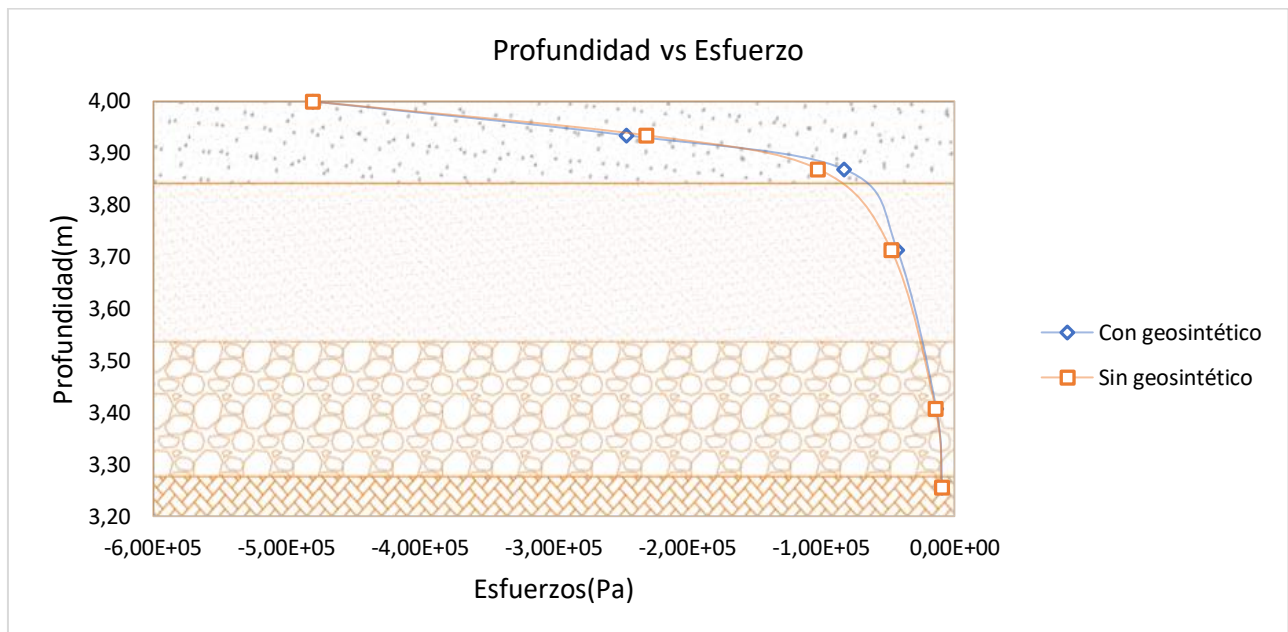


Figura 87. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje z, contenido saturado de agua

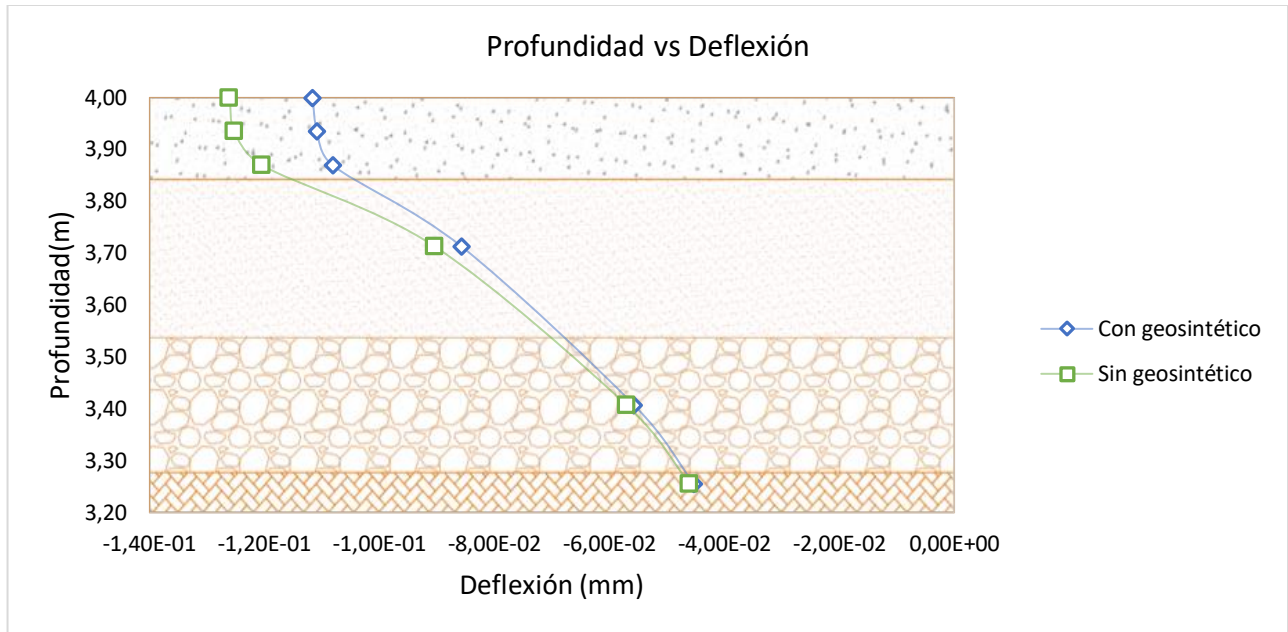


Figura 88. Gráfico de profundidad vs deflexión, contenido óptimo de agua

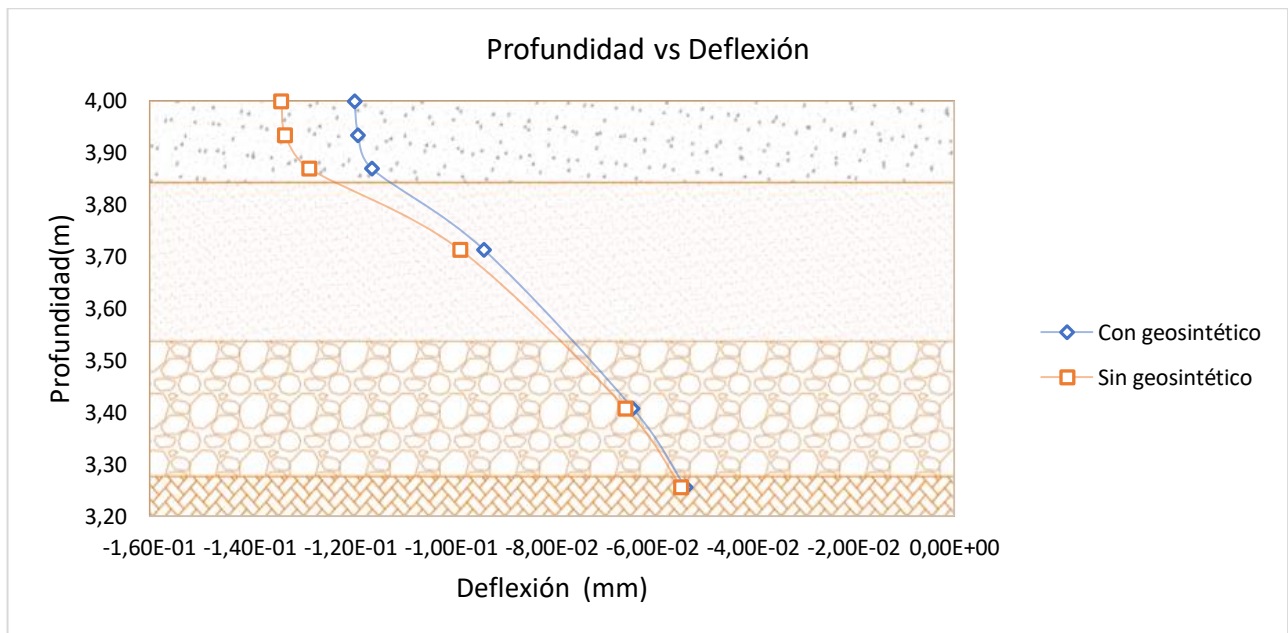


Figura 89. Gráfico de profundidad vs deflexión, contenido saturado de agua

Modelo de 61,7 kN con 115 psi

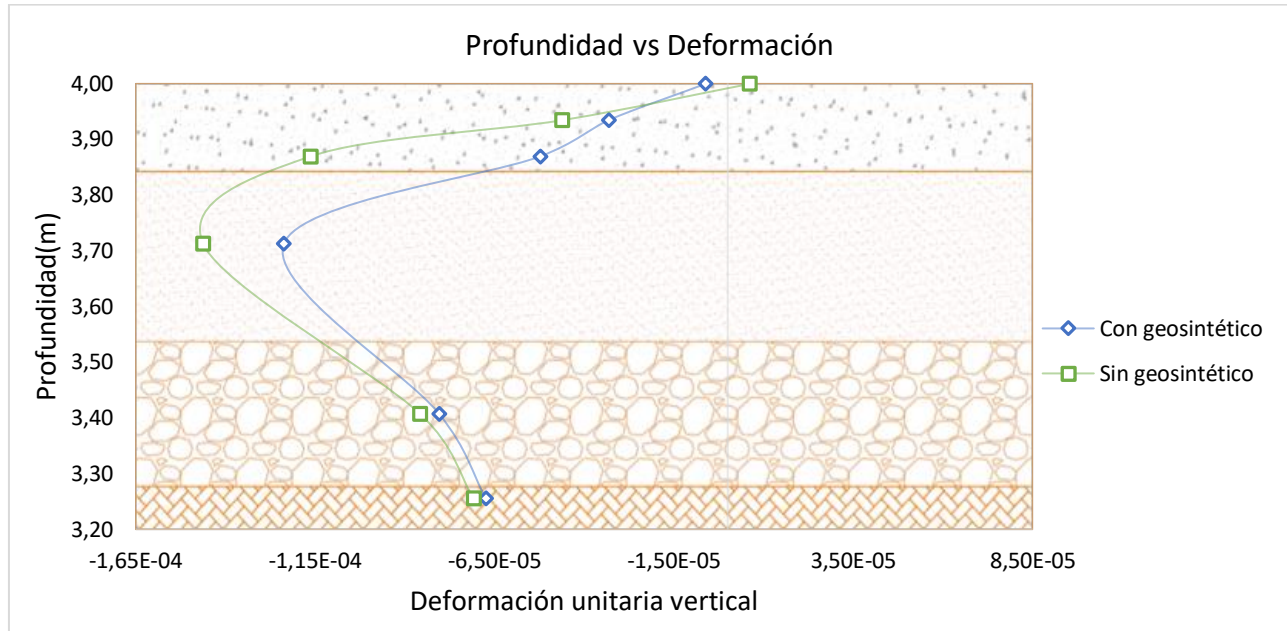


Figura 90. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje z, contenido óptimo de agua

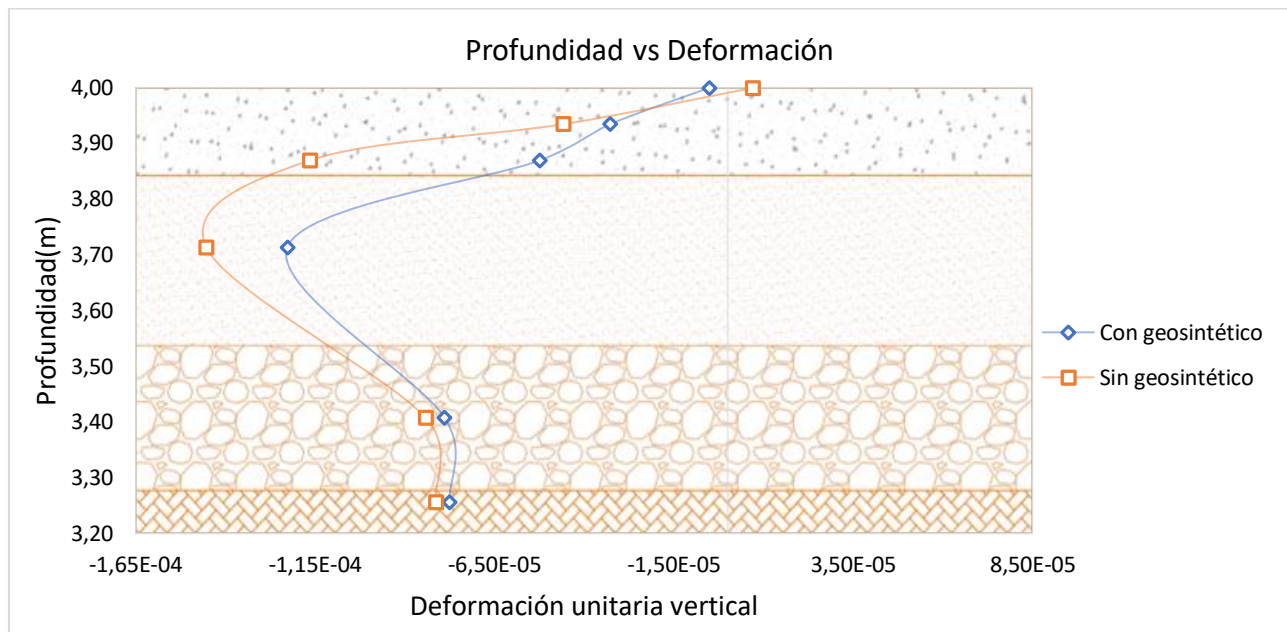


Figura 91. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje z, contenido saturado de agua

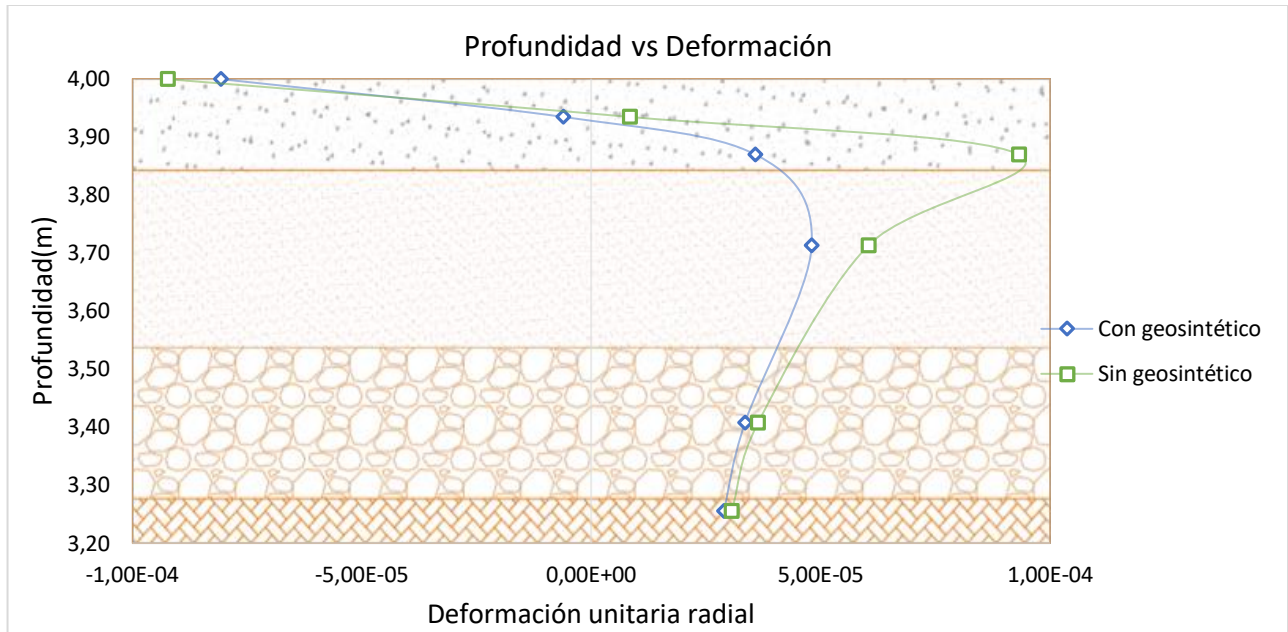


Figura 92. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje x, contenido óptimo de agua

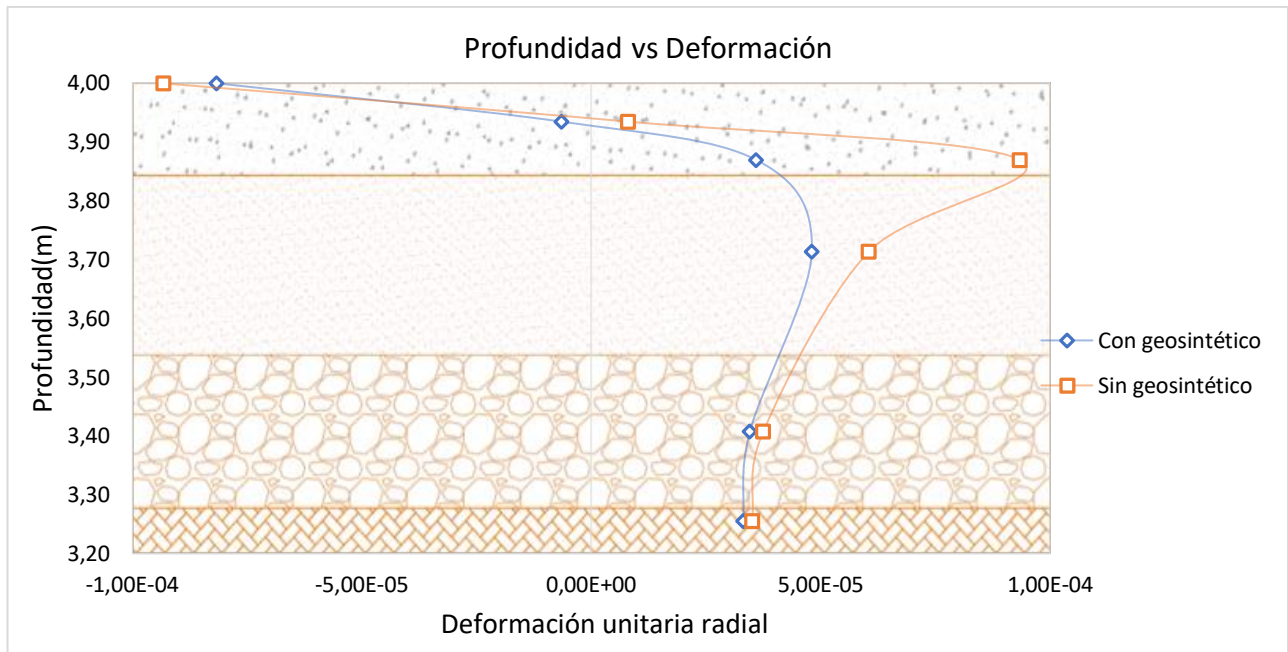


Figura 93. Gráfico de profundidad vs deformación en el eje x, contenido saturado de agua

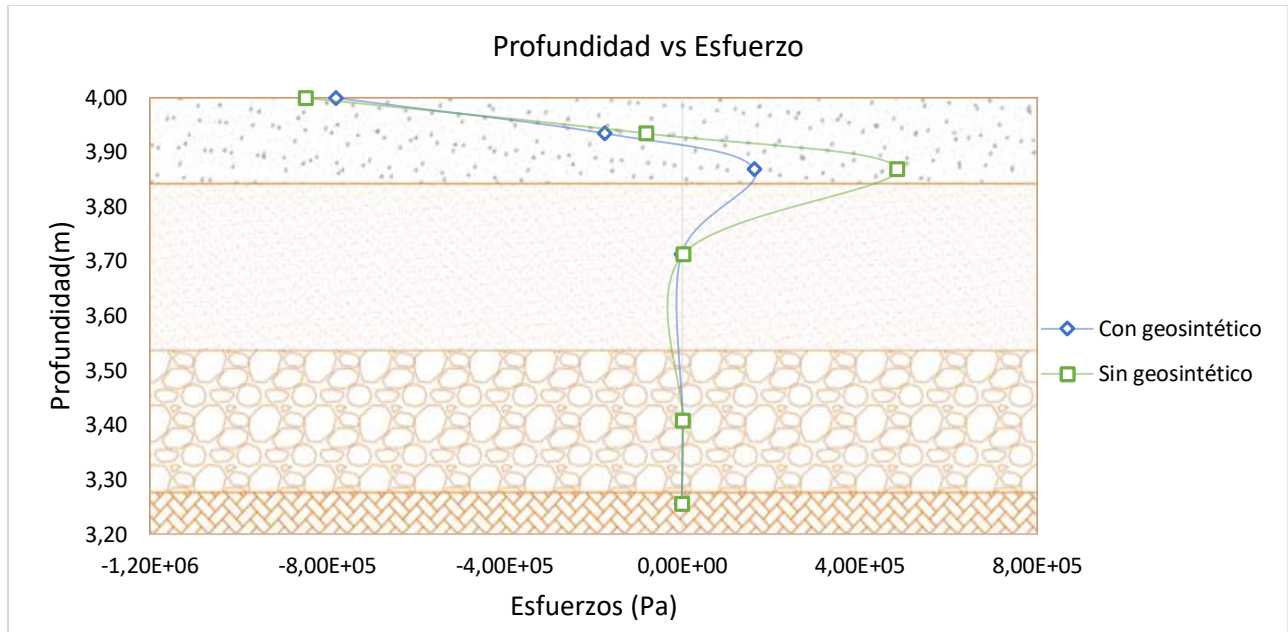


Figura 94. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje x, contenido óptimo de agua

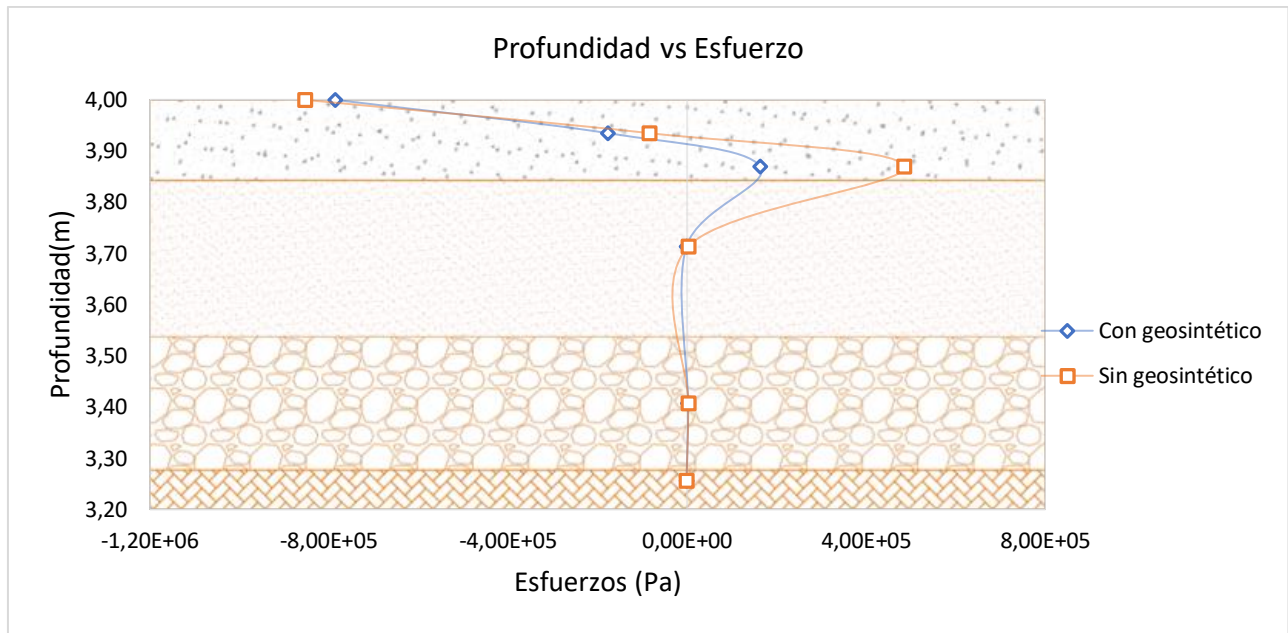


Figura 95. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje x, contenido saturado de agua

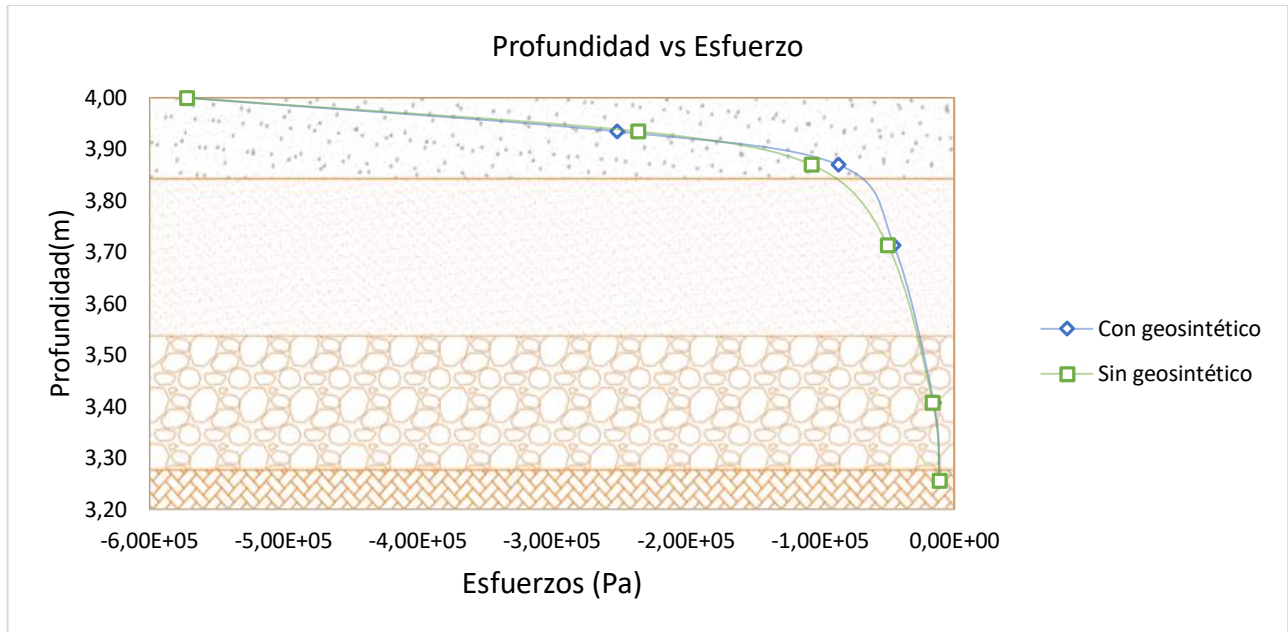


Figura 96. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje z, contenido óptimo de agua

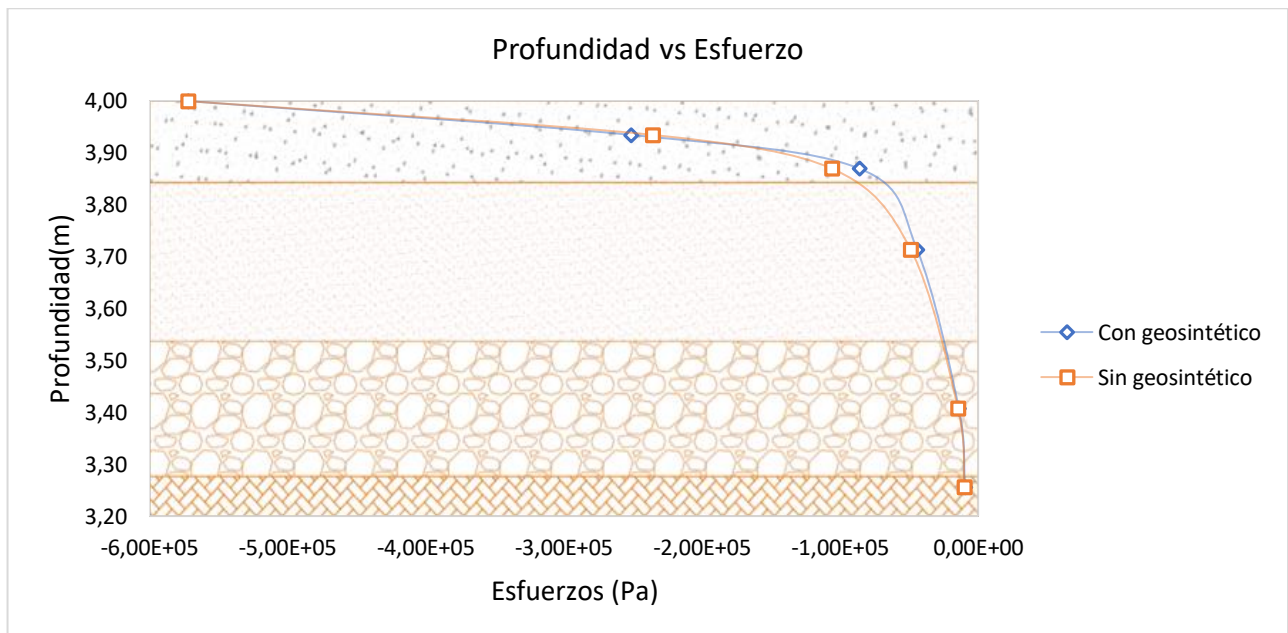


Figura 97. Gráfico de profundidad vs esfuerzos en el eje z, contenido saturado de agua

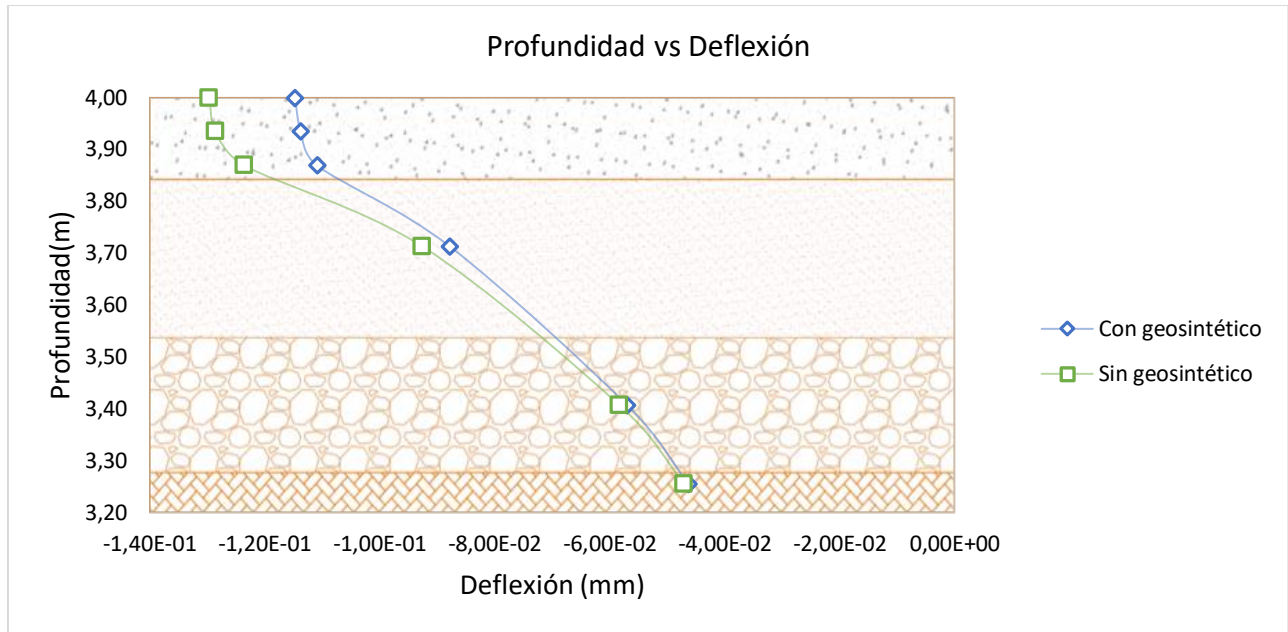


Figura 98. Gráfico de profundidad vs deflexión, contenido óptimo de agua

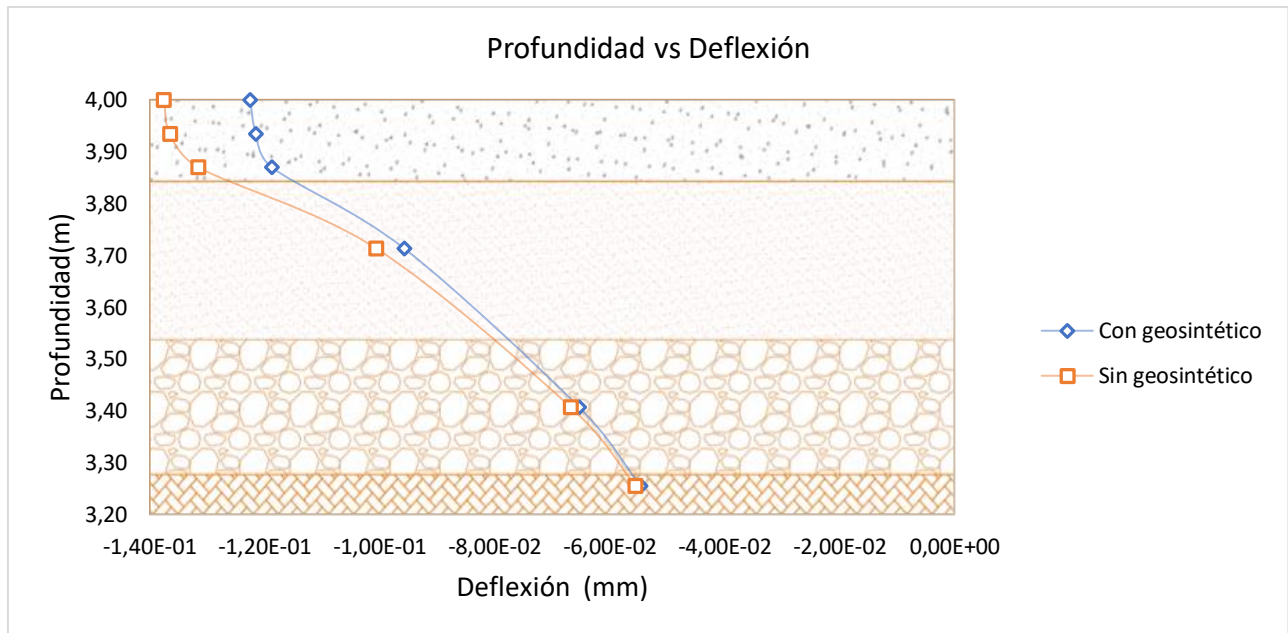


Figura 99. Gráfico de profundidad vs deflexión, contenido saturado de agua

Modelos de respuesta

Los modelos de regresión o modelos predictivos son la representación de la relación entre dos (o más) variables a través de un modelo formal. Este supone describir con una expresión lógico-matemática que, aparte de resumir cómo es esa relación, va a permitir realizar predicciones de los valores que tomará la variable de salida o de respuesta Y , a partir de los valores de la variable o las variables explicativas X (Molina & Rodrigo, 2010).

La regresión lineal múltiple es una versión extendida o generalizada de la regresión lineal simple; pues, en vez de considerar únicamente una variable explicativa cuantitativa, permite considerar varias variables de este tipo. La regresión lineal simple se expresa mediante esta ecuación:

$$\hat{Y} = B_0 + B_1 X_1$$

Donde B_0 es el origen y B_1 es la pendiente del modelo o el valor o proporción con el cual varía el valor de Y con respecto de X .

El modelo de regresión lineal múltiple se expresa con la siguiente ecuación generalizada:

$$\hat{Y} = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 \dots B_n X_n$$

Un parámetro importante dentro de los modelos predictivos es el coeficiente de determinación (r^2). Este valor indica qué tan similar es el modelo con respecto a los datos originales. Para los modelos de predicción múltiple, se toma como parámetro el coeficiente de determinación ajustado, puesto que este considera el efecto que tienen todas las variables dentro del modelo. En cambio, el r^2 simple tiende a aumentar a medida que aumentan la cantidad de variables explicativas, por lo cual no es representativo.

Al igual que el coeficiente de determinación, existe el coeficiente de correlación múltiple. Este factor indica en qué proporción varía la variable de respuesta o Y en relación con el conjunto de variables explicativas o X que se consideran dentro del modelo.

Para determinar las pendientes, el origen y los parámetros estadísticos dentro de una regresión lineal, se emplea el método de mínimos

cuadrados ordinarios (OLS por sus siglas en inglés). Este consiste en un método de estimaciones numéricas que minimiza la suma de los cuadrados de las distancias entre cada punto de la nube generada por las observaciones muestrales y el asignado por la recta (Novales, 2010).

Por medio de una regresión lineal múltiple, se generaron modelos de respuesta para algunas de las respuestas evaluadas, como la deflexión, la deformación unitaria vertical y la deformación unitaria radial. Estos valores normalmente son utilizados como criterios en el diseño de los pavimentos flexibles. Por lo general, estos datos se comparan con límites establecidos admisibles, referentes a la fatiga, la deformación o ahuellamiento y la deflexión que puede soportar una estructura de pavimento flexible.

Los modelos generados consideran como variables explicativas la presión en los neumáticos, la carga aplicada, la profundidad, la adición de geosintético y el contenido de agua el material de subrasant. Estos modelos tienen como objetivo determinar la relación o la variación que ejercen esas variables en las respuestas determinadas: la deflexión, la deformación unitaria vertical y la deformación unitaria radial.

En el Cuadro 12, se observan las ecuaciones o rectas de mejor ajuste determinadas para cada una de las respuestas, así como su respectivo coeficiente de determinación y coeficiente de correlación múltiple. La nomenclatura para los modelos es la siguiente:

U3: Deflexión en mm

E33: Deformación unitaria vertical

E11: Deformación unitaria radial

X1: Presión en psi

X2: Carga en kN

X3: Profundidad en m

X4: Contenido de agua

- X4=0 contenido óptimo de agua
- X4=1 contenido saturado de agua

X5: Geosintético

- X5=1 Con geosintético
- X5=0 Sin geosintético

CUADRO 12. MODELOS DE RESPUESTA

<i>Parámetro</i>	<i>Modelo</i>	<i>R² Ajustado</i>
Deflexión (mm)	$U_3 = -5,89x10^{-9} * X_1 - 9,56x10^{-7} * X_2 - 9,80x10^{-5} * X_3 - 7,45x10^{-6} * X_4 + 1,14x10^{-5} * X_5 + 3,27x10^{-4}$	0,9312
Deformación unitaria vertical	$E_{33} = -1,66x10^{-6} * X_1 - 5,93x10^{-6}X_2 - 4,67x10^{-3} * X_3 - 1,50x10^{-6} * X_4 + 1,70x10^{-5} * X_5 + 6,47x10^{-4} * X_3^2 - 4,28x10^{-7} * X_1 * X_3 + 1,49x10^{-6} * X_3 * X_2 + 8,33x10^{-3}$	0,7475
Deformación unitaria radial	$E_{11} = -6,87x10^{-9} * X_1 + 1,17x10^{-7}X_2 + 4,54x10^{-3} * X_3 + 7,55x10^{-7} * X_4 - 1,23x10^{-5} * X_5 - 6,36x10^{-4} * X_3^2 - 8,03x10^{-3}$	0,6037

Análisis de los resultados

Análisis de sensibilidad

Un modelo de elementos finitos requiere diversos análisis y controles que aseguren que los resultados obtenidos son confiables. Entre ello, se puede mencionar análisis de sensibilidad, validación de modelos con otras metodologías o la de calibración de modelos a escala real y de manera experimental.

En el presente proyecto, se elaboró un modelo inicial de 3x3x10m para realizar un análisis de sensibilidad de malla. Este tiene como objetivo determinar la distribución óptima de elementos, para alcanzar una convergencia en los resultados, minimizar la cantidad de elementos y disminuir los tiempos de corrida.

En el Cuadro 1, se muestran las distribuciones de elementos tanto horizontal como vertical, así como el número de elementos y nodos que posee el modelo.

En las Figuras 30 y 31, se grafican las respuestas del pavimento en cada uno de los modelos, la deformación máxima y el esfuerzo máximo. Se observa que en ambos gráficos la convergencia de los resultados se alcanza en el modelo número 6 que posee una distribución de elementos horizontales de 0,01-0,3m y en la distribución vertical desde 0,03-0,5m con un total de 263568 elementos; es decir, un modelo con una malla a partir de esa distribución o más fina va a dar resultados confiables. Con respecto a lo especificado en el Cuadro 1, se observa que en la malla 11 los resultados varían considerablemente; pues, el número de elementos excede la capacidad computacional y la corrida del modelo no se ejecuta de manera correcta, por lo que a partir de los 484075 elementos el modelo no da resultados confiables.

Validación del modelo

Para la validación del modelo, se utilizó un *software* que emplea la teoría de multicapa elástica en este caso, es el *software* PITRAPave, desarrollado por LanammeUCR. Se procedió a realizar la estructura especificada en el Cuadro 2 y se obtuvieron las respuestas críticas en cinco distintos puntos de control: en la superficie de la carpeta asfáltica, al final de la carpeta, en el medio de la capa de base, en el medio de la capa de la subbase y en la fibra superior de la subrasante. En el Cuadro 3, se muestran las respuestas obtenidas por medio de PITRAPave, las cuales se compararon con los valores obtenidos en el modelo inicial. Sin embargo, se obtuvieron errores muy altos, como se indica en el Cuadro 4; por ello, es necesaria la optimización del modelo inicial al variar la distribución de la malla generada, con lo cual se disminuye el tamaño de los elementos en el eje vertical.

En el Cuadro 4, se indica la cantidad de elementos y el porcentaje de error promedio obtenido en las respuestas críticas. Se observa que el aumento en el número elementos es significativo; no obstante, el porcentaje de error no sufre grandes variaciones. En la primera iteración, la disminución del error es de 1,8%; para la deformación radial, 0,8% y para el esfuerzo radial, 0,5 % en el esfuerzo vertical, inclusive se percibe un aumento en el error de la deflexión vertical de 2,2% y el aumento fue de 69309 elementos de un modelo a otro; por lo tanto, es correcto considerar que afinar la malla en el plano vertical no genera grandes cambios en las respuestas. Las siguientes iteraciones realizadas presentan un comportamiento similar, motivo por el cual se realizó un análisis de profundidad para disminuir el error en los resultados de las deflexiones; pues, es

la respuesta que presentan los valores más altos de error.

En el Cuadro 5, se presentan los valores de profundidad analizados y conforme disminuye la altura se reduce el porcentaje de error en las deflexiones verticales. Esto se debe a que la deflexión presenta un comportamiento totalmente lineal con respecto a la profundidad. En la figura 33, se observa de manera gráfica el comportamiento que presenta la deflexión. Al determinar la ecuación mediante la cual se rige la deflexión para este modelo, se define que la que la profundidad a la cual el error entre el modelo de PITRAPave y ABAQUS es igual a 0%, de 3,94m, por lo cual el modelo de ABAQUS pasó a tener las dimensiones de 3x3x4m.

Se procedió a optimizar el modelo nuevamente variando la distribución de la malla vertical y horizontalmente, afinándola en el centro de carga en el eje vertical. Además, se decidió emplear elementos cuadráticos; es decir, aquellos que poseen mayor número de nodos o puntos, donde se realiza interpolación para determinar el análisis en un elemento. Las respuestas obtenidas son positivas, ya que el error promedio en las respuestas disminuye considerablemente al pasar de elementos lineales a cuadráticos. En el Cuadro 6, se muestran los valores del error promedio en las respuestas obtenidas. Acorde a lo observado, la respuesta que más se ve afectada al pasar de elementos lineales a cuadráticos es la deformación unitaria radial.

Luego de realizar la validación y análisis de sensibilidad al modelo, se llegó a la deducción de que la configuración del modelo que presenta respuestas más confiables es el modelo con las dimensiones de 3x3x4m, con elementos hexaédricos cuadráticos del tipo C3D20R, según la codificación del ABAQUS.

Después de determinar la configuración definitiva del modelo, se delimitaron las características de los materiales especificadas en el Cuadro 11. El único material que va a variar es el módulo resiliente de la subrasante considerando dos variables que influyen directamente en su valor que son el contenido de agua y el estado de esfuerzos.

Con respecto a la magnitud del esfuerzo, ha sido ampliamente demostrado que el valor del módulo resiliente mantiene una relación de proporcionalidad directa con la suma de esfuerzos principales (Rondón & Reyes, 2007). Por esto, se decide utilizar la condición más crítica de

esfuerzos que es con una carga 61,7 kN y una presión de inflado de 115 psi.

Con la finalidad de incorporar el contenido de agua como una variable, se tomó de referencia la investigación de la tesis de maestría titulada *Efecto del contenido de agua en el módulo resiliente de las subrasantes*. Este estudio llevó a cabo ensayos de caracterización física para el material utilizado, se determina que el tipo de suelo es una arena limosa. Seguidamente, se estableció un protocolo de ensayo para obtener el módulo resiliente del suelo en estudio, tomando en consideración el estado de esfuerzos producto de la carga y el contenido de humedad presente en el material a través de la succión matricial.

Según los resultados obtenidos en la investigación utilizada, se determina un valor de succión para las dos condiciones valoradas, el contenido óptimo de agua y el saturado, los cuales corresponden a 71 kPa y 10kPa respectivamente.

Es importante recalcar que como el objetivo del proyecto es determinar el aporte del geosintético se considera el efecto del contenido de agua en el material de subrasante tanto para el modelo con geosintético como para el que no tiene geosintético.

En el Cuadro 7, se muestran los valores de módulo resiliente obtenidos por medio de la ecuación 7, cuando el material se encuentra con el contenido óptimo de agua y adición de geosintético. Los valores contenidos en el Cuadro 8 corresponden a los módulos resilientes obtenidos para el modelo con geosintético cuando la subrasante tiene un contenido saturado de agua.

Para el modelo sin geosintético, se determinaron los módulos resilientes en la condición de saturación y cuando la subrasante se encuentra con el contenido óptimo agua. Los valores obtenidos se encuentran en los Cuadros 9 y 10, respectivamente.

En la Figura 35, se grafica el comportamiento de convergencia en los puntos analizados para el modelo con geosintético en estado óptimo de humedad. Se observa que los valores de módulo resiliente empiezan a converger a partir de la tercera iteración. En la Figura 36, se grafica el comportamiento de convergencia para el modelo que posee el contenido saturado de agua. Se nota una tendencia similar al del contenido óptimo de agua; sin embargo, los valores del módulo son notablemente mucho menores. En las Figuras 37 y 38, se presentan los datos del

comportamiento de convergencia para el modelo que no tienen geosintético.

En las Figuras 100 y 101, se muestra cómo varía el módulo con respecto a la profundidad analizada y el contenido de agua, ya sea óptimo o saturado.

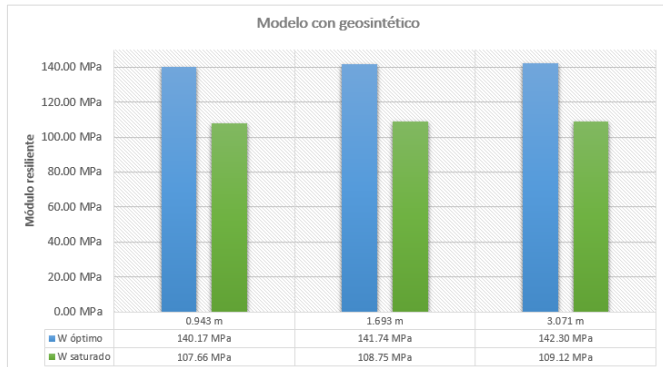


Figura 100. Gráfico de módulos resiliente, variando el contenido de agua a distintas profundidades

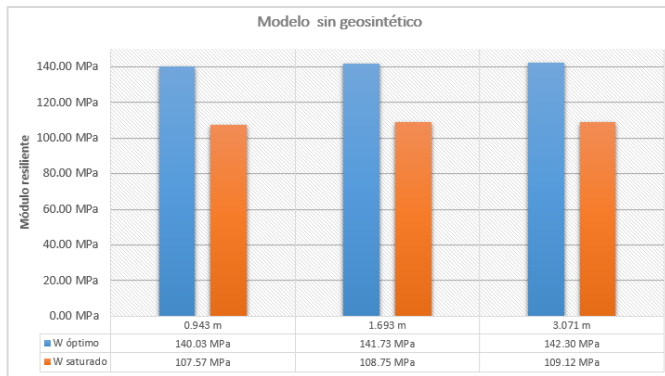


Figura 101. Gráfico de módulos resiliente, variando el contenido de agua a distintas profundidades

Evaluando los datos mostrados en las Figuras 100 y 101, se determina que la reducción en el valor de los módulos resilientes tiene un valor sostenido del 23% para ambos modelos, con y sin geosintético. Esto quiere decir que la determinación del módulo resiliente no se ve realmente afectada por la adición de geosintético; pues, este aminora los esfuerzos en las capas más superficiales, pero los esfuerzos experimentados por la subrasante son básicamente los mismos.

Los valores de los módulos se determinaron tanto en modelos con geosintético, como en modelos que no lo tienen. La adición de este material presenta tan solo un 0.0342% de diferencia en los valores de módulo resiliente para

el contenido óptimo de agua y un 0.0298% para los módulos resilientes determinados con el contenido saturado de agua.

Con la finalidad de considerar el comportamiento de no linealidad en los modelos, se subdividió la capa de subrasante en tres distintas capas y se determinó el módulo resiliente en el centro de cada una. De acuerdo con los resultados especificados en los Cuadros 7, 8, 9 y 10, la subrasante exhibe un comportamiento esperado, ya que presenta el efecto de “softening” o ablandamiento por deformación; es decir, entre mayor es el estado de esfuerzos menor es el módulo resiliente. De la misma forma, se puede observar en las Figuras 100 y 101 que conforme aumenta la profundidad, mayor es el valor del módulo resiliente con una diferencia de 1,0 MPa entre las profundidades analizadas.

Desempeño del geosintético sobre la deformación unitaria vertical del pavimento

La deformación unitaria vertical es una de las respuestas más importantes por evaluar en el desempeño de un pavimento; pues, está directamente relacionada con uno de los tipos de deterioro más comunes en los pavimentos flexibles: el ahuellamiento. Por ello, se considera indispensable evaluar el desempeño del geosintético en esta respuesta, ante las distintas variables establecidas como la carga, la presión de inflado, el contenido de agua y la presencia de geosintético. En las Figuras 40, 41, 50, 51, 60 y 61, se grafica el comportamiento de esta respuesta para los modelos con 42,5kN de carga aplicada. Además, en las Figuras 70, 71, 80, 81, 90 y 91, se representa este comportamiento para los modelos que tienen aplicado 61,7 kN de carga.

Evaluando los datos, se observa que las mayores deformaciones verticales se dan en la capa de la base para todos los casos, lo cual quiere decir que el material presenta mayor aporte al ahuellamiento de la estructura de pavimento. En el Cuadro 13, se especifican los valores de la deformación unitaria máxima en cada uno de los modelos.

CUADRO 13. DEFORMACIONES UNITARIAS VERTICALES MÁXIMAS			
Modelo	Presión (psi)	Con geosintético	Sin geosintético
		ϵ_c max	ϵ_c max
42,5kN - Contenido óptimo de agua	80	-8.79E-05	-1.63E-04
	100	-9.59E-05	-1.13E-04
	115	-9.52E-05	-1.12E-04
42,5kN - Contenido saturado de agua	80	-8.72E-05	-1.61E-04
	100	-9.52E-05	-1.12E-04
	115	-9.46E-05	-1.11E-04
61,7kN - Contenido óptimo de agua	80	-1.12E-04	-1.33E-04
	100	-1.20E-04	-1.42E-04
	115	-1.24E-04	-1.46E-04
61,7kN - Contenido saturado de agua	80	-1.11E-04	-1.41E-04
	100	-1.19E-04	-1.41E-04
	115	-1.23E-04	-1.45E-04

(Nota: Todos presentan el valor máximo a la mitad de la capa de la base).

Según lo establecido en el Cuadro 13, se observa que las disminuciones en la deformación son de hasta un orden magnitud para los modelos con 42,5kN de carga aplicada. Para los modelos con 61,7kN de carga aplicada, la disminución no alcanza un orden de magnitud; no obstante, es considerable la reducción.

En cuanto a las presiones de inflado, cuanto mayor sea la presión en el neumático mayor es la magnitud de la deformación. Esto se debe a que entre mayor es la presión, por la deformación de la llanta, mayor es la concentración de esfuerzos el cual se encuentra directamente debajo de punto de aplicación de carga, esto se presenta para el caso de los modelos con geosintético. Con respecto a los modelos sin geosintético, el comportamiento es distinto ya que no se encuentra el material de refuerzo. Las deformaciones mayores se presentan cuando la presión es menor; pues, la carga está aplicada en una mayor área, debido a la deformabilidad del neumático, lo cual ocasiona que el material más competente (capa asfáltica) absorba los efectos de la carga aplicada.

Si bien el contenido de agua en el material de subrasante no tiene mayor impacto en las deformaciones máximas, en los gráficos de profundidad versus deformación unitaria vertical, se observa que cuando este parámetro se vuelve

importante es justamente en la superficie de la subrasante, puesto que la diferencia en los valores obtenidos para la deformación se hace notable en ese punto cuando se pasa del modelo con el contenido óptimo de agua al modelo con el contenido saturado de agua.

Desempeño del geosintético sobre la deformación unitaria radial del pavimento

Cuando una estructura de pavimento se ve sometida a una carga específica, esta genera un estado de tensiones y deformaciones, tanto horizontal como verticalmente. A las deformaciones unitarias horizontales se les denomina radiales. Según diversos autores, los puntos críticos para medir esta respuesta son la superficie de la carpeta asfáltica y la fibra inferior de esta; pues, el comportamiento esperado en esos dos puntos es que arriba se encuentre compresión y abajo en tensión porque de lo contrario, la estructura se vuelve más propensa a la generación grietas y eso trae como consecuencia un deterioro acelerado de la estructura, pues, ocurren fenómenos como el bombeo de finos a la superficie, lo cual genera cavidades debajo de la capa asfáltica que a su vez reducen la capacidad estructural del pavimento. Muchas veces esta respuesta se puede asociar con la fatiga a tensión de las capas asfálticas.

De acuerdo con los datos obtenidos, se observa en las Figuras 42, 43, 52, 53, 62, 63, 72, 73, 82, 83, 92 y 93 que para todos los casos la respuesta en la superficie es la esperada, puesto que los valores dan negativos y esto quiere decir que se encuentra a compresión. De la misma forma, para la fibra interior, en todos los casos se encuentra a tensión debido a que los resultados son positivos.

Analizando los valores obtenidos, se determina que el punto en el cual el geosintético tiene un efecto mayor en la respuesta es en la fibra inferior de la capa asfáltica. En el Cuadro 14, se muestran los resultados obtenidos en los distintos modelos.

CUADRO 14. VALORES DE MAYOR DISMINUCIÓN EN LA DEFORMACIÓN UNITARIA RADIAL			
Modelo	Presión (psi)	Con geosintético	Sin geosintético
		ϵ_t	ϵ_t
42,5kN- Contenido óptimo de agua	80	2.63E-05	9.38E-05
	100	2.95E-05	7.92E-05
	115	2.99E-05	8.10E-05
42,5kN- Contenido saturado de agua	80	2.64E-05	9.42E-05
	100	2.96E-05	7.93E-05
	115	2.99E-05	8.11E-05
61,7kN- Contenido óptimo de agua	80	3.09E-05	7.87E-05
	100	3.40E-05	8.76E-05
	115	3.58E-05	9.32E-05
61,7kN- Contenido saturado de agua	80	3.10E-05	8.77E-05
	100	3.41E-05	8.77E-05
	115	3.60E-05	9.34E-05

En el Cuadro 14, se observa que la disminución es muy significativa en este punto de control. Esto se debe a que geosintético utilizado tiene un Módulo de Young como el de la geomalla de fibra de vidrio, el cual tiene como principal objetivo actuar como material de refuerzo al restringir el movimiento lateral del material y por ende las deformaciones radiales a la carga.

Para los modelos con 42,5kN de carga, que la disminución en la respuesta debido a la adición de geosintético varía entre 63,1– 71,9% para el contenido óptimo de agua y entre 63,1-72% para el contenido saturado de agua. En el caso de los modelos con una carga de 61,7kN, la disminución varía entre 60,7-61,6% para el contenido óptimo de agua y para el contenido saturado de agua disminución va desde el 61,5 - 64,6%. De acuerdo con estos porcentajes, se deduce que el contenido de agua en esta respuesta no presenta mayores variaciones en las magnitudes de las deformaciones, pues, los porcentajes de reducción son similares entre un contenido óptimo de agua y uno saturado.

La presión de inflado sí es un factor determinante, ya que para las dos distintas cargas consideradas el mayor porcentaje de disminución en la deformación se da cuando la presión es de 80 psi (552kPa).

Desempeño del geosintético sobre los esfuerzos verticales del pavimento

En los gráficos de profundidad vs esfuerzo vertical, se observa que la diferencia entre los modelos que tienen o no adición de geosintético es muy pequeña en los puntos de control. Esto se debe a que este material está colocado como refuerzo del plano horizontal y no vertical, por ende, los esfuerzos experimentados son muy similares.

Basándose en los gráficos de profundidad versus esfuerzo vertical, se observa que conforme aumenta la presión se incrementa la magnitud de los esfuerzos experimentados por la estructura; pues, la presión en los neumáticos modifica el estado de las paredes de la llanta. Cuando esta es alta, las paredes se encuentran a tensión y tienden a disminuir el área en la cual se distribuye la carga; por tanto, a mayor presión, mayor concentración de esfuerzos.

Es importante destacar que el contenido de agua en la subrasante no modifica en gran medida los esfuerzos experimentados en las capas superiores de la estructura, ya que son valores muy cercanos al variar el contenido de agua, del óptimo al saturado. No obstante, sí afecta la magnitud de los esfuerzos verticales en la subrasante. Debido a la variación en los datos de los esfuerzos, la escala de los gráficos de profundidad versus esfuerzo vertical dificulta realizar dicha observación. Por este motivo, en el Cuadro 15, se muestran los valores obtenidos de los esfuerzos experimentados en la subrasante.

CUADRO 15. VALORES DE ESFUERZOS VERTICALES EN LA SUBRASANTE			
Modelo	Presión (psi)	Contenido óptimo de agua	Contenido saturado de agua
		σ_{33} (Pa)	σ_{33} (Pa)
42,5kN- Con geosintético	80	-7.47E+03	-6.66E+03
	100	-8.00E+03	-7.13E+03
	115	-7.89E+03	-7.03E+03
42,5kN- Sin geosintético	80	-9.06E+03	-8.22E+03
	100	-8.22E+03	-7.32E+03
	115	-8.10E+03	-7.22E+03
61,7kN- Con geosintético	80	-9.95E+03	-8.88E+03
	100	-1.05E+04	-9.36E+03
	115	-1.07E+04	-9.57E+03
61,7kN- Sin geosintético	80	-1.02E+04	-9.60E+03
	100	-1.08E+04	-9.60E+03
	115	-1.10E+04	-9.82E+03

En el Cuadro 15, se observa cómo varían los esfuerzos en la subrasante cuando se encuentra con el contenido óptimo de agua y el contenido saturado de agua. Se observa que son más bajos los esfuerzos experimentados en la subrasante cuando esta tiene un contenido saturado de agua. Esto se puede explicar por medio de los esfuerzos efectivos, ya que el suelo al estar en estado saturado aumenta la presión de poro y se disminuyen los esfuerzos efectivos experimentados por el suelo.

Aunque el plano de acción del geosintético no sea el vertical, sí ejerce una reducción en los esfuerzos experimentados en la parte inferior de la capa asfáltica. En este punto, es donde la estructura presenta mayor diferencia en los esfuerzos debido a la adición de geosintético. En el Cuadro 16, se muestran los valores de los esfuerzos verticales en ese punto.

CUADRO 16. VALORES DE ESFUERZOS VERTICALES EN LA PARTE INFERIOR DE LA CAPA ASFÁLTICA			
Modelo	Presión (psi)	Con geosintético	Sin geosintético
		σ_{33} (Pa)	σ_{33} (Pa)
42,5kN- Contenido óptimo de agua	80	-5.37E+04	-6.21E+04
	100	-7.03E+04	-8.64E+04
	115	-7.04E+04	-8.65E+04
42,5kN- Contenido saturado de agua	80	-5.34E+04	-6.18E+04
	100	-7.00E+04	-8.61E+04
	115	-7.02E+04	-8.63E+04
61,7kN- Contenido óptimo de agua	80	-7.58E+04	-9.35E+04
	100	-8.34E+04	-1.03E+05
	115	-8.62E+04	-1.06E+05
61,7kN- Contenido saturado de agua	80	-7.55E+04	-1.02E+05
	100	-8.30E+04	-1.02E+05
	115	-8.58E+04	-1.06E+05

Se observa que para los modelos con 42,5kN de carga, la disminución en la respuesta debido a la adición de geosintético varía entre 13,5 – 18,6% para el contenido óptimo de agua y entre 13,6 – 18,7% para el contenido saturado de agua.

En el caso de los modelos con una carga de 61,7kN, la disminución varía entre 18,8 – 19,0 % para el contenido óptimo de agua y para el contenido saturado de agua, la disminución va entre el 18,9 – 26,2%.

Analizando los porcentajes de reducción, se observa que, para los que tienen 42,5kN de carga aplicada, la diferencia en la reducción al pasar de un contenido óptimo de agua a saturado es de 0,1% en el rango. No obstante, para los modelos con 61,7kN, se vuelve más significativo; pues, la reducción varía hasta en 7,3% en el rango superior, al modificar contenido de agua.

Un detalle importante por destacar es que la reducción en las magnitudes de los esfuerzos experimentados es ligeramente mayor cuando los modelos poseen un contenido saturado de agua en la subrasante.

Desempeño del geosintético sobre los esfuerzos radiales del pavimento

De acuerdo con la cuantificación en la variación de los esfuerzos radiales en presencia del geosintético, se observa que el comportamiento de la estructura muestra una mayor diferencia en la disminución de los esfuerzos en la interfaz entre la carpeta asfáltica y la base. Esto se debe a que en ese punto se encuentra colocado el material geosintético. Justamente este tipo de material está diseñado para disminuir los esfuerzos en el plano horizontal.

Con el fin de mostrar el comportamiento de los modelos de manera más sencilla, en el Cuadro 16 se especifican los valores de los esfuerzos obtenidos en el punto donde se muestra una mayor disminución de los esfuerzos debido al geosintético.

Según los datos observados para los modelos con geosintético, los esfuerzos radiales tienden a aumentar conforme aumenta la presión. Sin embargo, el comportamiento para los modelos que no tienen geosintético es inverso; pues, entre mayor es la presión, menor es la magnitud de los esfuerzos experimentados en este punto. Esto se debe a que, a mayor presión, mayor concentración de esfuerzos debajo del centro de carga. Esa concentración de esfuerzos es absorbida por la superficie de la capa asfáltica y no por el material geosintético.

CUADRO 17. VALORES DE ESFUERZOS RADIALES EN LA FIBRA INFERIOR DE LA CAPA ASFÁLTICA			
Modelo	Presión (psi)	Con geosintético	Sin geosintético
		σ_{11} (Pa)	σ_{11} (Pa)
42,5kN- Contenido óptimo de agua	80	1.19E+05	5.11E+05
	100	1.33E+05	4.13E+05
	115	1.34E+05	4.20E+05
42,5kN- Contenido saturado de agua	80	1.19E+05	5.14E+05
	100	1.34E+05	4.14E+05
	115	1.35E+05	4.21E+05
61,7kN- Contenido óptimo de agua	80	1.40E+05	4.10E+05
	100	1.54E+05	4.59E+05
	115	1.62E+05	4.84E+05
61,7kN- Contenido saturado de agua	80	1.41E+05	4.61E+05
	100	1.55E+05	4.61E+05
	115	1.63E+05	4.85E+05

Correspondiente a los datos del Cuadro 17, los modelos con 42,5kN de carga presentan una disminución en la respuesta debido a la adición de geosintético que varía entre 67,7–76,8% para el contenido óptimo de agua y el contenido saturado de agua. En el caso de los modelos con una carga de 61,7kN, la disminución varía entre 65,7-66,4% para el contenido óptimo de agua y para el contenido saturado de agua, la disminución se encuentra entre el 66,3 -69,4%.

En cuanto a la presión de inflado, se establece que no es la variable más determinante; pues, la reducción de los esfuerzos mantiene un comportamiento similar en las tres presiones analizadas. No obstante, es importante destacar que la mayor reducción en las magnitudes de los esfuerzos se da cuando la subrasante se encuentra en estado saturado para las 6 configuraciones de carga analizadas.

Desempeño del geosintético sobre la deflexión en el pavimento del pavimento

La deflexión de un pavimento se define como el valor que representa la respuesta estructural ante la aplicación de una carga externa ortogonal a la

superficie de ruedo (Higuera, 2007). La deflexión es considerada como un criterio de diseño, ya que puede ser correlacionada con la capacidad estructural de un pavimento flexible. Existen diversas ecuaciones que determinan la deflexión admisible acorde al número de ejes equivalentes acumulados en un periodo de diseño. Por esta razón, determinar el efecto que tiene la adición de geosintético en la respuesta de la deflexión es de importancia para este estudio.

La deflexión en los pavimentos es un cambio en la longitud y se refleja en la superficie de la carpeta asfáltica, puesto que ahí es donde se suman las deflexiones de todas las capas anteriores. En el Cuadro 18, se especifican los resultados de las deflexiones en la superficie de la capa asfáltica.

CUADRO 18. VALORES DE DEFLEXIÓN EN LA SUPERFICIE DE LA CAPA ASFÁLTICA			
Modelo	Presión (psi)	Con geosintético	Sin geosintético
		δ (mm)	δ (mm)
42,5kN- Contenido óptimo de agua	80	-8.07E-02	-1.24E-01
	100	-8.84E-02	-1.00E-01
	115	-8.79E-02	-9.94E-02
42,5kN- Contenido saturado de agua	80	-8.61E-02	-1.31E-01
	100	-9.42E-02	-1.06E-01
	115	-9.35E-02	-1.05E-01
61,7kN- Contenido óptimo de agua	80	-1.04E-01	-1.18E-01
	100	-1.12E-01	-1.26E-01
	115	-1.15E-01	-1.30E-01
61,7kN- Contenido saturado de agua	80	-1.12E-01	-1.34E-01
	100	-1.19E-01	-1.34E-01
	115	-1.23E-01	-1.38E-01

Analizando los datos obtenidos, el porcentaje de reducción de la deflexión en la superficie de la capa asfáltica, debido a la adición de geosintético para los modelos con carga de 42,5kN, va desde 11,6-34,9% para el contenido óptimo de agua en la subrasante. Para esta misma carga, pero con un contenido saturado de agua, la

disminución de la deflexión varía entre 11,1-34,1%.

En el caso de los modelos con 61,7kN, la disminución de la deflexión en la superficie es de 11,5% para el contenido óptimo de agua en la subrasante y para el contenido saturado de agua varía entre 10,9 - 16,6%.

Con respecto a la presión para las dos cargas consideradas, se presenta una mayor disminución en la deflexión cuando los neumáticos se encuentran a una menor presión, o igual a 80psi (552 kPa).

Modelos de respuesta

En el Cuadro 12, se observan los modelos de respuesta generados para el presente estudio, los cuales se generaron por medio de una regresión lineal múltiple. Dichas regresiones consisten en una versión extendida del modelo convencional de regresión lineal simple; pues, se considera más de una variable explicativa, lo cual permite incluir más información dentro del modelo y por ende hacerlo más preciso. Este tipo de modelos se utiliza como una herramienta para predecir una respuesta específica ante una cantidad n de variables.

Los modelos fueron generados a través del análisis de datos que brinda el MS Excel, el cual permite obtener todos los parámetros estadísticos necesarios para construir un modelo de análisis de regresión múltiple. Los modelos predicen las respuestas de deflexión, deformación unitaria vertical y deformación unitaria radial, con las variables independientes de la presión en los neumáticos, profundidad, carga aplicada, contenido de agua y adición o no de geosintético. Cabe destacar que las últimas dos variables son binarias para el contenido de agua; por tanto, $x_4=0$ cuando el contenido de agua es óptimo y $x_4=1$ cuando se encuentra en estado saturado. Para el geosintético, $x_5=1$ cuando se tiene geosintético y $x_5=0$ cuando no tiene geosintético.

Con el propósito de optimizar los modelos y encontrar el r^2 ajustado más alto posible para cada caso, se agregaron variables explicativas que consisten en la multiplicación de 2 de las 5 variables explicativas planteadas al principio o en su defecto el cuadrado de estas. Seguidamente, se procedió a evaluar los valores de probabilidad que presentan cada una con respecto a la variable de salida; además, aquellas con un valor mayor a 0,5 fueron eliminadas.

Para los modelos de regresión lineal múltiple, se utiliza el r^2 ajustado como parámetro de relación entre las variables; pues, el coeficiente de determinación r^2 tiende a incrementarse conforme aumentan las variables y esto implica que no es totalmente representativo para el modelo. En cambio, el r^2 ajustado sí considera la cantidad de variables explicativas que se consideraron dentro del modelo. Entre mayor sea el r^2 ajustado, mayor será la relación que tienen las variables explicativas con respecto a la respuesta; es decir, para el modelo de la deflexión, el 93,12% de la variación en la deflexión es afectada por las variables comprendidas. Para el modelo de la deformación unitaria vertical, un 74,75% en la variación de esta se explica a causa de las variables. Por último, para el modelo de la deformación unitaria radial, solo el 60,37% de las variaciones están relacionadas con las variables consideradas.

El análisis de los coeficientes que acompañan a cada una de las variables en las ecuaciones es un factor importante; pues, cada uno de ellos representa en qué forma afecta a cada una de las respuestas. En el caso de la ecuación de la deflexión, todos los coeficientes son negativos, excluyendo el que acompaña a la variable de geosintético x_5 . Todos son negativos porque incrementan la deflexión; pues, es un cambio en la longitud de dicho punto y como este es ocasionado por la aplicación de cargas externas verticales, se genera un desplazamiento bajo el punto de aplicación de carga.

El coeficiente positivo es el del geosintético; es decir, disminuye en $1,14 \times 10^{-5}$ la magnitud de la deflexión cuando se adiciona geosintético. Los demás coeficientes son negativos y afectan en mayor o menor medida. Analizando el coeficiente que acompaña al contenido de humedad, se deduce que las deflexiones incrementan a una razón del $7,45 \times 10^{-6}$ al pasar de un contenido óptimo de agua a uno saturado.

Para el caso de las deformaciones unitarias verticales, los coeficientes positivos son los que acompañan a las variables que más influyen en la disminución de estas; pues, las deformaciones verticales bajo el centro de carga se encuentran en compresión; he ahí el motivo por el cual son negativas. Por lo tanto, los coeficientes positivos disminuyen su magnitud. El factor externo que más contribuye a las deformaciones es el de la carga, pues, por cada 1kN de carga que se aumente la deformación aumenta en $-5,93 \times 10^{-6}$. Asimismo, es importante analizar los coeficientes que acompañan

a las variables del contenido de agua ya que, aunque contribuye a aumentar las deformaciones debido a que el coeficiente es negativo, es muy poca la contribución. Esto quiere decir que las deformaciones aumentan un $-1,50 \times 10^{-6}$ al pasar de un contenido óptimo de agua a un contenido saturado de agua.

Para el modelo de las respuestas de deformación unitaria radial, es necesario entender que hay deformaciones en tensión y en compresión. Por esto, los coeficientes negativos son los que más contribuyen a las deformaciones en compresión y los coeficientes positivos, a las deformaciones en tensión.

Según el modelo de respuesta obtenido para la deformación radial, las variables consideradas tienen solo el 60,37% de relación con la variabilidad de esta respuesta. En los gráficos de deformación radial unitaria es posible observar el comportamiento de esta respuesta, se percibe que en la superficie de la capa asfáltica es donde se presentan las deformaciones en compresión y luego pasan por el eje neutro o por el cero y se convierten a deformaciones en tensión. Debido a este comportamiento, la interpretación de los coeficientes no es directa y no se puede afirmar con certeza que los coeficientes contribuyen a aumentar o disminuir la respuesta de la deformación; pues, el signo de estos afecta de manera inversa a la respuesta si está en tensión o en compresión. Por otra parte, se verifica que las respuestas del modelo siguen un comportamiento similar al obtenido en los resultados del modelo de elementos finitos; sin embargo, la variabilidad de las respuestas es alta.

Conclusiones

Mediante el análisis de sensibilidad malla y la validación del modelo con el *software* de multicapa elástica PITRAPave, desarrollado por LanammeUCR, se determinó que el modelo con resultados satisfactorios tiene dimensiones de largo= 3m, ancho= 3m y alto= 4m. Con respecto al mallado del modelo, se estableció que el incrementar la cantidad de elementos en el plano vertical tiene mayor impacto en la disminución del error que cuando se aumenta la cantidad de elementos en el plano horizontal. Sin embargo, lo que generó el cambio más significativo fue pasar de elementos lineales a elementos cuadráticos, por lo cual, el modelo final cuenta 108416 elementos cuadráticos hexaédricos del tipo C3D20R y con 2464 elementos cuadriláteros cuadráticos de tipo M3D8R para el geosintético.

Utilizando la ecuación 7 para determinar el módulo resiliente de la subrasante ante dos distintos escenarios, se determinó que para el estado de esfuerzos que genera la carga más crítica del presente estudio (61,7 kN - 793 kPa de presión), el módulo resiliente, cuando el contenido de agua es óptimo, tiene un valor de 140169,25 kPa en la parte superior y cuando se encuentra en estado saturado es igual a 107658,28 kPa para el modelo con geosintético.

Empleando la ecuación 7 para el modelo sin geosintético se obtiene un módulo resiliente de 140032,82kPa en condiciones de humedad óptimas y de 107556,91 kPa en estado saturado. Comparando los resultados de módulo resiliente obtenidos con los rangos de valores establecidos por la Guía de Diseño Mecanicista – Empírica (MEPDG por sus siglas en inglés) y por la Administración Federal de Aviación, se determina que se encuentran dentro de estos rangos que van desde 20-170 MPa y de 48-140MPa, respectivamente.

Por medio del análisis de las respuestas críticas del pavimento, se determina que la adición de geosintético genera reducciones considerables en la deflexión, los esfuerzos radiales y las deformaciones unitarias tanto verticales como radiales. La respuesta que no genera mayores cambios ante el refuerzo es en los esfuerzos verticales.

La variación en el contenido de agua de los modelos tiene una mayor afectación en la respuesta de las deflexiones y las deformaciones unitarias verticales.

Se concluye que a medida que la presión aumenta, la disminución en los valores de las respuestas debido al geosintético es menor.

Para los modelos generados de respuesta, se obtuvo un coeficiente de determinación (r^2) de 0,9312 para el modelo de la deflexión, de 0,7475 para el modelo de respuesta en la deformación unitaria vertical y de un 0,6037 para el de la deformación unitaria radial. Es decir, la variación de estas respuestas tiene una relación del 93,12%, 74,75% y 60,37%, respectivamente, con las variables planteadas.

Recomendaciones

Con el propósito de emplear los resultados obtenidos, se recomienda redireccionar el enfoque del presente estudio al desarrollo de modelos de desempeño, que determinen el aporte de un geosintético a una estructura de pavimento en cantidad de ejes equivalentes.

Además, se sugiere realizar una validación del modelo generado mediante la comparación de los resultados obtenidos, con datos experimentales generados en ensayos a escala real.

La metodología de elementos finitos ha demostrado ser muy eficaz en la determinación de las respuestas críticas en una estructura de pavimento. Para conseguir modelar una estructura de manera eficiente, se requiere una alta capacidad de procesamiento computacional y tiempo. Se recomienda estudiar la sensibilidad de diversos factores y cómo pueden afectar estos las respuestas del pavimento, así como implementar ecuaciones calibradas para determinar el módulo resiliente de los materiales granulares y la viscoelasticidad de la capa asfáltica.

También, se recomienda caracterizar de manera más detallada el material geosintético, tomando en consideración factores como el coeficiente de fricción con el material granular, el tamaño de la abertura en caso de geomalla. Esto con el fin de modelar una estructura más cercana al comportamiento real.

En futuras investigaciones, sería preciso considerar el aporte del geosintético dentro de un rango más amplio de cargas y presiones. Asimismo, emplear distintos métodos para la elaboración de los modelos predictivos, con el objetivo de alcanzar una mayor precisión en las respuestas de estos; por ejemplo, una red neural.

Por otra parte, se sugiere ampliar el estudio paramétrico realizado, con el propósito de generar una base de datos que sirva para la elaboración de un modelo predictivo que considere variables importantes dentro de las respuestas críticas del pavimento, como la variación de módulos resilientes, espesores de capa, contenido de agua en los materiales, entre otros. Con esto, se podría alcanzar un coeficiente de determinación lo más cercano a 1.

Aunado a esto, se recomienda generar una base de datos que incluya una amplia gama de respuestas. Se puede contribuir con el desarrollo de un estudio similar al realizado por Ricardo Quirós Orozco en su tesis de licenciatura (2015), para una estructura de pavimento flexible que considere los efectos de la adición un geosintético como refuerzo.

Apéndices

A continuación, se presenta la lista de apéndices necesarios para el desarrollo del presente proyecto:

Apéndice A: Tablas de coordenadas y valores de presión para configuración de carga 42,5 kN con 80psi de presión en los neumáticos.

Apéndice B: Tablas de coordenadas y valores de presión para configuración de carga 42,5 kN con 100psi de presión en los neumáticos.

Apéndice C: Tablas de coordenadas y valores de presión para configuración de carga 42,5 kN con 115psi de presión en los neumáticos.

Apéndice D: Tablas de coordenadas y valores de presión para configuración de carga 62,5 kN con 80psi de presión en los neumáticos.

Apéndice E: Tablas de coordenadas y valores de presión para configuración de carga 61,7 kN con 100psi de presión en los neumáticos.

Apéndice F: Tablas de coordenadas y valores de presión para configuración de carga 61,7 kN con 115psi de presión en los neumáticos.

Apéndice G: Tabla de salida de análisis estadístico del modelo predictivo de la deflexión.

Apéndice H: Tabla de salida de análisis estadístico del modelo predictivo de la deformación unitaria vertical.

Apéndice I: Tabla de salida de análisis estadístico del modelo predictivo de la deformación unitaria radial.

Apéndice A: Tablas de coordenadas y valores de presión para configuración de carga 42,5 kN con 80psi de presión en los neumáticos.

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (EXTREMO 1)											
X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)
1.375	1.645	4.0	0.00	1.375	1.625	4.0	0.00	1.375	1.615	4.0	0.00
1.385	1.645	4.0	137895.20	1.385	1.625	4.0	96526.64	1.385	1.615	4.0	62052.84
1.395	1.645	4.0	199948.04	1.395	1.625	4.0	165474.24	1.395	1.615	4.0	117210.92
1.405	1.645	4.0	248211.36	1.405	1.625	4.0	255106.12	1.405	1.615	4.0	193053.28
1.415	1.645	4.0	268895.64	1.415	1.625	4.0	296474.68	1.415	1.615	4.0	241316.60
1.425	1.645	4.0	330948.48	1.425	1.625	4.0	303369.44	1.425	1.615	4.0	227527.08
1.435	1.645	4.0	393001.32	1.435	1.625	4.0	324053.72	1.435	1.615	4.0	248211.36
1.445	1.645	4.0	406790.84	1.445	1.625	4.0	365422.28	1.445	1.615	4.0	303369.44
1.455	1.645	4.0	413685.60	1.455	1.625	4.0	365422.28	1.455	1.615	4.0	303369.44
1.465	1.645	4.0	434369.88	1.465	1.625	4.0	365422.28	1.465	1.615	4.0	324053.72
1.475	1.645	4.0	455054.16	1.475	1.625	4.0	399896.08	1.475	1.615	4.0	393001.32
1.485	1.645	4.0	441264.64	1.485	1.625	4.0	406790.84	1.485	1.615	4.0	399896.08
1.495	1.645	4.0	441264.64	1.495	1.625	4.0	406790.84	1.495	1.615	4.0	386106.56
1.505	1.645	4.0	468843.68	1.505	1.625	4.0	427475.12	1.505	1.615	4.0	393001.32
1.515	1.645	4.0	496422.72	1.515	1.625	4.0	413685.60	1.515	1.615	4.0	365422.28
1.525	1.645	4.0	503317.48	1.525	1.625	4.0	372317.04	1.525	1.615	4.0	324053.72
1.535	1.645	4.0	461948.92	1.535	1.625	4.0	365422.28	1.535	1.615	4.0	344738.00
1.545	1.645	4.0	399896.08	1.545	1.625	4.0	365422.28	1.545	1.615	4.0	358527.52
1.555	1.645	4.0	317158.96	1.555	1.625	4.0	351632.76	1.555	1.615	4.0	317158.96
1.565	1.645	4.0	268895.64	1.565	1.625	4.0	351632.76	1.565	1.615	4.0	282685.16
1.575	1.645	4.0	268895.64	1.575	1.625	4.0	351632.76	1.575	1.615	4.0	275790.40
1.585	1.645	4.0	262000.88	1.585	1.625	4.0	337843.24	1.585	1.615	4.0	268895.64
1.595	1.645	4.0	220632.32	1.595	1.625	4.0	317158.96	1.595	1.615	4.0	248211.36
1.605	1.645	4.0	186158.52	1.605	1.625	4.0	303369.44	1.605	1.615	4.0	248211.36
1.615	1.645	4.0	117210.92	1.615	1.625	4.0	275790.40	1.615	1.615	4.0	220632.32
1.625	1.645	4.0	48263.32	1.625	1.625	4.0	241316.60	1.625	1.615	4.0	193053.28
1.635	1.645	4.0	0.00	1.635	1.625	4.0	193053.28	1.635	1.615	4.0	172369.00
				1.645	1.625	4.0	151684.72	1.645	1.615	4.0	151684.72
				1.655	1.625	4.0	0.00	1.655	1.615	4.0	0.00

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (INTERMEDIO1)											
X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)
1.365	1.595	4.0	0.00	1.365	1.585	4.0	0.00	1.365	1.575	4.0	0.00
1.375	1.595	4.0	110316.16	1.375	1.585	4.0	124105.68	1.375	1.575	4.0	110316.16
1.385	1.595	4.0	158579.48	1.385	1.585	4.0	186158.52	1.385	1.575	4.0	165474.24
1.395	1.595	4.0	241316.60	1.395	1.585	4.0	303369.44	1.395	1.575	4.0	296474.68
1.405	1.595	4.0	310264.20	1.405	1.585	4.0	386106.56	1.405	1.575	4.0	386106.56
1.415	1.595	4.0	337843.24	1.415	1.585	4.0	386106.56	1.415	1.575	4.0	393001.32
1.425	1.595	4.0	310264.20	1.425	1.585	4.0	365422.28	1.425	1.575	4.0	393001.32
1.435	1.595	4.0	330948.48	1.435	1.585	4.0	427475.12	1.435	1.575	4.0	468843.68
1.445	1.595	4.0	372317.04	1.445	1.585	4.0	482633.20	1.445	1.575	4.0	517107.00
1.455	1.595	4.0	372317.04	1.455	1.585	4.0	461948.92	1.455	1.575	4.0	489527.96
1.465	1.595	4.0	372317.04	1.465	1.585	4.0	441264.64	1.465	1.575	4.0	482633.20
1.475	1.595	4.0	386106.56	1.475	1.585	4.0	441264.64	1.475	1.575	4.0	489527.96
1.485	1.595	4.0	406790.84	1.485	1.585	4.0	448159.40	1.485	1.575	4.0	482633.20
1.495	1.595	4.0	420580.36	1.495	1.585	4.0	461948.92	1.495	1.575	4.0	489527.96
1.505	1.595	4.0	386106.56	1.505	1.585	4.0	420580.36	1.505	1.575	4.0	441264.64
1.515	1.595	4.0	358527.52	1.515	1.585	4.0	386106.56	1.515	1.575	4.0	372317.04
1.525	1.595	4.0	379211.80	1.525	1.585	4.0	420580.36	1.525	1.575	4.0	365422.28
1.535	1.595	4.0	365422.28	1.535	1.585	4.0	420580.36	1.535	1.575	4.0	372317.04
1.545	1.595	4.0	310264.20	1.545	1.585	4.0	372317.04	1.545	1.575	4.0	344738.00
1.555	1.595	4.0	268895.64	1.555	1.585	4.0	351632.76	1.555	1.575	4.0	337843.24
1.565	1.595	4.0	255106.12	1.565	1.585	4.0	372317.04	1.565	1.575	4.0	358527.52
1.575	1.595	4.0	241316.60	1.575	1.585	4.0	379211.80	1.575	1.575	4.0	379211.80
1.585	1.595	4.0	220632.32	1.585	1.585	4.0	358527.52	1.585	1.575	4.0	372317.04
1.595	1.595	4.0	206842.80	1.595	1.585	4.0	344738.00	1.595	1.575	4.0	358527.52
1.605	1.595	4.0	186158.52	1.605	1.585	4.0	358527.52	1.605	1.575	4.0	358527.52
1.615	1.595	4.0	165474.24	1.615	1.585	4.0	310264.20	1.615	1.575	4.0	337843.24
1.625	1.595	4.0	137895.20	1.625	1.585	4.0	262000.88	1.625	1.575	4.0	310264.20
1.635	1.595	4.0	124105.68	1.635	1.585	4.0	213737.56	1.635	1.575	4.0	268895.64
1.645	1.595	4.0	0.00	1.645	1.585	4.0	151684.72	1.645	1.575	4.0	193053.28
				1.655	1.585	4.0	0.00	1.655	1.575	4.0	117210.92
								1.665	1.575	4.0	0.00

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (CENTRO)											
X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)
1.355	1.555	4.0	0.00	1.355	1.545	4.0	0.00	1.365	1.535	4.0	0.00
1.365	1.555	4.0	82737.12	1.365	1.545	4.0	96526.64	1.375	1.535	4.0	199948.04
1.375	1.555	4.0	193053.28	1.375	1.545	4.0	199948.04	1.385	1.535	4.0	296474.68
1.385	1.555	4.0	317158.96	1.385	1.545	4.0	310264.20	1.395	1.535	4.0	372317.04
1.395	1.555	4.0	406790.84	1.395	1.545	4.0	393001.32	1.405	1.535	4.0	427475.12
1.405	1.555	4.0	461948.92	1.405	1.545	4.0	455054.16	1.415	1.535	4.0	461948.92
1.415	1.555	4.0	489527.96	1.415	1.545	4.0	482633.20	1.425	1.535	4.0	489527.96
1.425	1.555	4.0	510212.24	1.425	1.545	4.0	510212.24	1.435	1.535	4.0	461948.92
1.435	1.555	4.0	517107.00	1.435	1.545	4.0	524001.76	1.445	1.535	4.0	413685.60
1.445	1.555	4.0	503317.48	1.445	1.545	4.0	517107.00	1.455	1.535	4.0	399896.08
1.455	1.555	4.0	482633.20	1.455	1.545	4.0	510212.24	1.465	1.535	4.0	420580.36
1.465	1.555	4.0	468843.68	1.465	1.545	4.0	510212.24	1.475	1.535	4.0	441264.64
1.475	1.555	4.0	455054.16	1.475	1.545	4.0	510212.24	1.485	1.535	4.0	441264.64
1.485	1.555	4.0	489527.96	1.485	1.545	4.0	517107.00	1.495	1.535	4.0	455054.16
1.495	1.555	4.0	517107.00	1.495	1.545	4.0	537791.28	1.505	1.535	4.0	475738.44
1.505	1.555	4.0	510212.24	1.505	1.545	4.0	544686.04	1.515	1.535	4.0	496422.72
1.515	1.555	4.0	468843.68	1.515	1.545	4.0	544686.04	1.525	1.535	4.0	503317.48
1.525	1.555	4.0	386106.56	1.525	1.545	4.0	517107.00	1.535	1.535	4.0	468843.68
1.535	1.555	4.0	324053.72	1.535	1.545	4.0	475738.44	1.545	1.535	4.0	441264.64
1.545	1.555	4.0	296474.68	1.545	1.545	4.0	455054.16	1.555	1.535	4.0	441264.64
1.555	1.555	4.0	303369.44	1.555	1.545	4.0	448159.40	1.565	1.535	4.0	441264.64
1.565	1.555	4.0	303369.44	1.565	1.545	4.0	448159.40	1.575	1.535	4.0	448159.40
1.575	1.555	4.0	296474.68	1.575	1.545	4.0	434369.88	1.585	1.535	4.0	461948.92
1.585	1.555	4.0	275790.40	1.585	1.545	4.0	413685.60	1.595	1.535	4.0	455054.16
1.595	1.555	4.0	262000.88	1.595	1.545	4.0	399896.08	1.605	1.535	4.0	441264.64
1.605	1.555	4.0	241316.60	1.605	1.545	4.0	379211.80	1.615	1.535	4.0	420580.36
1.615	1.555	4.0	227527.08	1.615	1.545	4.0	358527.52	1.625	1.535	4.0	393001.32
1.625	1.555	4.0	213737.56	1.625	1.545	4.0	337843.24	1.635	1.535	4.0	330948.48
1.635	1.555	4.0	0.00	1.635	1.545	4.0	317158.96	1.645	1.535	4.0	262000.88
				1.645	1.545	4.0	262000.88	1.655	1.535	4.0	234421.84
				1.655	1.545	4	227527.08	1.665	1.535	4.0	0.00

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (INTERMEDIO 2)											
X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)
1.365	1.505	4.0	0.00	1.365	1.495	4.0	0.00	1.395	1.485	4.0	0.00
1.375	1.505	4.0	179263.76	1.375	1.495	4.0	144789.96	1.405	1.485	4.0	179263.76
1.385	1.505	4.0	248211.36	1.385	1.495	4.0	213737.56	1.415	1.485	4.0	193053.28
1.395	1.505	4.0	330948.48	1.395	1.495	4.0	262000.88	1.425	1.485	4.0	199948.04
1.405	1.505	4.0	379211.80	1.405	1.495	4.0	275790.40	1.435	1.485	4.0	199948.04
1.415	1.505	4.0	420580.36	1.415	1.495	4.0	310264.20	1.445	1.485	4.0	213737.56
1.425	1.505	4.0	441264.64	1.425	1.495	4.0	337843.24	1.455	1.485	4.0	234421.84
1.435	1.505	4.0	399896.08	1.435	1.495	4.0	324053.72	1.465	1.485	4.0	248211.36
1.445	1.505	4.0	351632.76	1.445	1.495	4.0	303369.44	1.475	1.485	4.0	234421.84
1.455	1.505	4.0	386106.56	1.455	1.495	4.0	330948.48	1.485	1.485	4.0	213737.56
1.465	1.505	4.0	427475.12	1.465	1.495	4.0	372317.04	1.495	1.485	4.0	234421.84
1.475	1.505	4.0	420580.36	1.475	1.495	4.0	358527.52	1.505	1.485	4.0	275790.40
1.485	1.505	4.0	399896.08	1.485	1.495	4.0	330948.48	1.515	1.485	4.0	275790.40
1.495	1.505	4.0	393001.32	1.495	1.495	4.0	358527.52	1.525	1.485	4.0	268895.64
1.505	1.505	4.0	406790.84	1.505	1.495	4.0	406790.84	1.535	1.485	4.0	262000.88
1.515	1.505	4.0	406790.84	1.515	1.495	4.0	413685.60	1.545	1.485	4.0	262000.88
1.525	1.505	4.0	399896.08	1.525	1.495	4.0	406790.84	1.555	1.485	4.0	289579.92
1.535	1.505	4.0	372317.04	1.535	1.495	4.0	399896.08	1.565	1.485	4.0	324053.72
1.545	1.505	4.0	351632.76	1.545	1.495	4.0	386106.56	1.575	1.485	4.0	324053.72
1.555	1.505	4.0	330948.48	1.555	1.495	4.0	372317.04	1.585	1.485	4.0	344738.00
1.565	1.505	4.0	296474.68	1.565	1.495	4.0	337843.24	1.595	1.485	4.0	344738.00
1.575	1.505	4.0	268895.64	1.575	1.495	4.0	317158.96	1.605	1.485	4.0	317158.96
1.585	1.505	4.0	324053.72	1.585	1.495	4.0	365422.28	1.615	1.485	4.0	358527.52
1.595	1.505	4.0	379211.80	1.595	1.495	4.0	379211.80	1.625	1.485	4.0	255106.12
1.605	1.505	4.0	393001.32	1.605	1.495	4.0	358527.52	1.635	1.485	4.0	193053.28
1.615	1.505	4.0	289579.92	1.615	1.495	4.0	324053.72	1.645	1.485	4.0	124105.68
1.625	1.505	4.0	324053.72	1.625	1.495	4.0	282685.16	1.655	1.485	4.0	0.00
1.635	1.505	4.0	255106.12	1.635	1.495	4.0	227527.08				
1.645	1.505	4.0	186158.52	1.645	1.495	4.0	158579.48				
1.655	1.505	4.0	0.00	1.655	1.495	4.0	0.00				

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (EXTREMO 2)															
X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)
1.375	1.455	4.0	0.00	1.375	1.445	4.0	0.00	1.375	1.435	4.0	0.00	1.415	1.425	4.0	0.00
1.385	1.455	4.0	199948.04	1.385	1.445	4.0	227527.08	1.385	1.435	4.0	248211.36	1.425	1.425	4.0	206842.80
1.395	1.455	4.0	241316.60	1.395	1.445	4.0	282685.16	1.395	1.435	4.0	310264.20	1.435	1.425	4.0	213737.56
1.405	1.455	4.0	296474.68	1.405	1.445	4.0	337843.24	1.405	1.435	4.0	358527.52	1.445	1.425	4.0	248211.36
1.415	1.455	4.0	330948.48	1.415	1.445	4.0	365422.28	1.415	1.435	4.0	358527.52	1.455	1.425	4.0	282685.16
1.425	1.455	4.0	344738.00	1.425	1.445	4.0	393001.32	1.425	1.435	4.0	344738.00	1.465	1.425	4.0	337843.24
1.435	1.455	4.0	344738.00	1.435	1.445	4.0	427475.12	1.435	1.435	4.0	358527.52	1.475	1.425	4.0	393001.32
1.445	1.455	4.0	365422.28	1.445	1.445	4.0	441264.64	1.445	1.435	4.0	379211.80	1.485	1.425	4.0	413685.60
1.455	1.455	4.0	365422.28	1.455	1.445	4.0	441264.64	1.455	1.435	4.0	393001.32	1.495	1.425	4.0	434369.88
1.465	1.455	4.0	358527.52	1.465	1.445	4.0	448159.40	1.465	1.435	4.0	427475.12	1.505	1.425	4.0	461948.92
1.475	1.455	4.0	358527.52	1.475	1.445	4.0	461948.92	1.475	1.435	4.0	455054.16	1.515	1.425	4.0	482633.20
1.485	1.455	4.0	358527.52	1.485	1.445	4.0	461948.92	1.485	1.435	4.0	461948.92	1.525	1.425	4.0	496422.72
1.495	1.455	4.0	358527.52	1.495	1.445	4.0	468843.68	1.495	1.435	4.0	475738.44	1.535	1.425	4.0	510212.24
1.505	1.455	4.0	372317.04	1.505	1.445	4.0	496422.72	1.505	1.435	4.0	503317.48	1.545	1.425	4.0	503317.48
1.515	1.455	4.0	386106.56	1.515	1.445	4.0	503317.48	1.515	1.435	4.0	517107.00	1.555	1.425	4.0	468843.68
1.525	1.455	4.0	358527.52	1.525	1.445	4.0	468843.68	1.525	1.435	4.0	496422.72	1.565	1.425	4.0	441264.64
1.535	1.455	4.0	324053.72	1.535	1.445	4.0	441264.64	1.535	1.435	4.0	482633.20	1.575	1.425	4.0	441264.64
1.545	1.455	4.0	317158.96	1.545	1.445	4.0	420580.36	1.545	1.435	4.0	468843.68	1.585	1.425	4.0	441264.64
1.555	1.455	4.0	317158.96	1.555	1.445	4.0	386106.56	1.555	1.435	4.0	441264.64	1.595	1.425	4.0	420580.36
1.565	1.455	4.0	303369.44	1.565	1.445	4.0	372317.04	1.565	1.435	4.0	420580.36	1.605	1.425	4.0	399896.08
1.575	1.455	4.0	330948.48	1.575	1.445	4.0	379211.80	1.575	1.435	4.0	420580.36	1.615	1.425	4.0	275790.40
1.585	1.455	4.0	344738.00	1.585	1.445	4.0	379211.80	1.585	1.435	4.0	413685.60	1.625	1.425	4.0	262000.88
1.595	1.455	4.0	324053.72	1.595	1.445	4.0	351632.76	1.595	1.435	4.0	393001.32	1.635	1.425	4.0	213737.56
1.605	1.455	4.0	289579.92	1.605	1.445	4.0	324053.72	1.605	1.435	4.0	365422.28	1.645	1.425	4.0	0.00
1.615	1.455	4.0	330948.48	1.615	1.445	4.0	303369.44	1.615	1.435	4.0	241316.60				
1.625	1.455	4.0	193053.28	1.625	1.445	4.0	220632.32	1.625	1.435	4.0	241316.60				
1.635	1.455	4.0	151684.72	1.635	1.445	4.0	179263.76	1.635	1.435	4.0	199948.04				
1.645	1.455	4.0	0.00	1.645	1.445	4.0	0.00	1.645	1.435	4.0	0.00				

Apéndice B: Tablas de coordenadas y valores de presión para configuración de carga 42,5 kN con 100psi de presión en los neumáticos.

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (EXTREMO 1)															
X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)
1.375	1.645	4.00	0.00	1.365	1.635	4.00	0.00	1.365	1.625	4.00	0.00	1.365	1.615	4.00	0.00
1.385	1.645	4.00	213737.56	1.375	1.635	4.00	110316.16	1.375	1.625	4.00	110316.16	1.375	1.615	4.00	110316.16
1.395	1.645	4.00	282685.16	1.385	1.635	4.00	206842.8	1.385	1.625	4.00	213737.56	1.385	1.615	4.00	220632.32
1.405	1.645	4.00	337843.24	1.395	1.635	4.00	296474.68	1.395	1.625	4.00	310264.2	1.395	1.615	4.00	317158.96
1.415	1.645	4.00	365422.28	1.405	1.635	4.00	351632.76	1.405	1.625	4.00	358527.52	1.405	1.615	4.00	351632.76
1.425	1.645	4.00	393001.32	1.415	1.635	4.00	386106.56	1.415	1.625	4.00	393001.32	1.415	1.615	4.00	379211.8
1.435	1.645	4.00	427475.12	1.425	1.635	4.00	406790.84	1.425	1.625	4.00	413685.6	1.425	1.615	4.00	399896.08
1.445	1.645	4.00	468843.68	1.435	1.635	4.00	427475.12	1.435	1.625	4.00	413685.6	1.435	1.615	4.00	379211.8
1.455	1.645	4.00	461948.92	1.445	1.635	4.00	448159.4	1.445	1.625	4.00	413685.6	1.445	1.615	4.00	365422.28
1.465	1.645	4.00	434369.88	1.455	1.635	4.00	441264.64	1.455	1.625	4.00	420580.36	1.455	1.615	4.00	406790.84
1.475	1.645	4.00	420580.36	1.465	1.635	4.00	427475.12	1.465	1.625	4.00	427475.12	1.465	1.615	4.00	434369.88
1.485	1.645	4.00	434369.88	1.475	1.635	4.00	434369.88	1.475	1.625	4.00	455054.16	1.475	1.615	4.00	420580.36
1.495	1.645	4.00	441264.64	1.485	1.635	4.00	455054.16	1.485	1.625	4.00	475738.44	1.485	1.615	4.00	399896.08
1.505	1.645	4.00	420580.36	1.495	1.635	4.00	455054.16	1.495	1.625	4.00	475738.44	1.495	1.615	4.00	372317.04
1.515	1.645	4.00	399896.08	1.505	1.635	4.00	420580.36	1.505	1.625	4.00	441264.64	1.505	1.615	4.00	365422.28
1.525	1.645	4.00	393001.32	1.515	1.635	4.00	406790.84	1.515	1.625	4.00	413685.6	1.515	1.615	4.00	365422.28
1.535	1.645	4.00	358527.52	1.525	1.635	4.00	399896.08	1.525	1.625	4.00	406790.84	1.525	1.615	4.00	344738
1.545	1.645	4.00	337843.24	1.535	1.635	4.00	393001.32	1.535	1.625	4.00	413685.6	1.535	1.615	4.00	324053.72
1.555	1.645	4.00	324053.72	1.545	1.635	4.00	379211.8	1.545	1.625	4.00	406790.84	1.545	1.615	4.00	324053.72
1.565	1.645	4.00	303369.44	1.555	1.635	4.00	372317.04	1.555	1.625	4.00	399896.08	1.555	1.615	4.00	330948.48
1.575	1.645	4.00	268895.64	1.565	1.635	4.00	344738	1.565	1.625	4.00	372317.04	1.565	1.615	4.00	317158.96
1.585	1.645	4.00	234421.84	1.575	1.635	4.00	310264.2	1.575	1.625	4.00	324053.72	1.575	1.615	4.00	282685.16
1.595	1.645	4.00	186158.52	1.585	1.635	4.00	282685.16	1.585	1.625	4.00	310264.2	1.585	1.615	4.00	268895.64
1.605	1.645	4.00	151684.72	1.595	1.635	4.00	241316.6	1.595	1.625	4.00	282685.16	1.595	1.615	4.00	248211.36
1.615	1.645	4.00	0.00	1.605	1.635	4.00	199948.04	1.605	1.625	4.00	241316.6	1.605	1.615	4.00	213737.56
				1.615	1.635	4.00	179263.76	1.615	1.625	4.00	186158.52	1.615	1.615	4.00	172369
				1.625	1.635	4.00	0.00	1.625	1.625	4.00	0.00	1.625	1.615	4.00	96526.64
												1.635	1.615	4.00	0

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (INTERMEDIO 1)											
X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)
1.365	1.595	4.00	0.00	1.355	1.585	4.0	0.00	1.355	1.575	4.0	0.00
1.375	1.595	4.00	193053.28	1.365	1.585	4.0	144789.96	1.365	1.575	4.0	158579.48
1.385	1.595	4.00	241316.60	1.375	1.585	4.0	227527.08	1.375	1.575	4.0	234421.84
1.395	1.595	4.00	282685.16	1.385	1.585	4.0	303369.44	1.385	1.575	4.0	296474.68
1.405	1.595	4.00	379211.80	1.395	1.585	4.0	365422.28	1.395	1.575	4.0	337843.24
1.415	1.595	4.00	420580.36	1.405	1.585	4.0	427475.12	1.405	1.575	4.0	372317.04
1.425	1.595	4.00	393001.32	1.415	1.585	4.0	455054.16	1.415	1.575	4.0	379211.80
1.435	1.595	4.00	386106.56	1.425	1.585	4.0	406790.84	1.425	1.575	4.0	351632.76
1.445	1.595	4.00	420580.36	1.435	1.585	4.0	372317.04	1.435	1.575	4.0	330948.48
1.455	1.595	4.00	427475.12	1.445	1.585	4.0	441264.64	1.445	1.575	4.0	406790.84
1.465	1.595	4.00	427475.12	1.455	1.585	4.0	489527.96	1.455	1.575	4.0	455054.16
1.475	1.595	4.00	420580.36	1.465	1.585	4.0	496422.72	1.465	1.575	4.0	461948.92
1.485	1.595	4.00	372317.04	1.475	1.585	4.0	517107.00	1.475	1.575	4.0	482633.20
1.495	1.595	4.00	344738.00	1.485	1.585	4.0	537791.28	1.485	1.575	4.0	496422.72
1.505	1.595	4.00	351632.76	1.495	1.585	4.0	524001.76	1.495	1.575	4.0	482633.20
1.515	1.595	4.00	317158.96	1.505	1.585	4.0	489527.96	1.505	1.575	4.0	461948.92
1.525	1.595	4.00	248211.36	1.515	1.585	4.0	448159.40	1.515	1.575	4.0	434369.88
1.535	1.595	4.00	255106.12	1.525	1.585	4.0	406790.84	1.525	1.575	4.0	413685.60
1.545	1.595	4.00	282685.16	1.535	1.585	4.0	413685.60	1.535	1.575	4.0	413685.60
1.555	1.595	4.00	275790.40	1.545	1.585	4.0	427475.12	1.545	1.575	4.0	413685.60
1.565	1.595	4.00	268895.64	1.555	1.585	4.0	386106.56	1.555	1.575	4.0	379211.80
1.575	1.595	4.00	268895.64	1.565	1.585	4.0	344738.00	1.565	1.575	4.0	337843.24
1.585	1.595	4.00	227527.08	1.575	1.585	4.0	351632.76	1.575	1.575	4.0	372317.04
1.595	1.595	4.00	193053.28	1.585	1.585	4.0	344738.00	1.585	1.575	4.0	386106.56
1.605	1.595	4.00	186158.52	1.595	1.585	4.0	303369.44	1.595	1.575	4.0	344738.00
1.615	1.595	4.00	0.00	1.605	1.585	4.0	296474.68	1.605	1.575	4.0	317158.96
				1.615	1.585	4.0	275790.40	1.615	1.575	4.0	268895.64
				1.625	1.585	4.0	234421.84	1.625	1.575	4.0	220632.32
				1.635	1.585	4.0	0.00	1.635	1.575	4.0	0.00

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (CENTRO)															
X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)
1.355	1.555	4.00	0.00	1.355	1.545	4.00	0.00	1.355	1.535	4.00	0.00	1.365	1.525	4.00	0.00
1.365	1.555	4.00	165474.24	1.365	1.545	4.00	213737.56	1.365	1.535	4.00	220632.32	1.375	1.525	4.00	172369
1.375	1.555	4.00	227527.08	1.375	1.545	4.00	296474.68	1.375	1.535	4.00	289579.92	1.385	1.525	4.00	227527.08
1.385	1.555	4.00	282685.16	1.385	1.545	4.00	399896.08	1.385	1.535	4.00	365422.28	1.395	1.525	4.00	289579.92
1.395	1.555	4.00	324053.72	1.395	1.545	4.00	475738.44	1.395	1.535	4.00	434369.88	1.405	1.525	4.00	324053.72
1.405	1.555	4.00	372317.04	1.405	1.545	4.00	524001.76	1.405	1.535	4.00	482633.2	1.415	1.525	4.00	344738
1.415	1.555	4.00	386106.56	1.415	1.545	4.00	544686.04	1.415	1.535	4.00	510212.24	1.425	1.525	4.00	337843.24
1.425	1.555	4.00	393001.32	1.425	1.545	4.00	551580.80	1.425	1.535	4.00	517107	1.435	1.525	4.00	324053.72
1.435	1.555	4.00	420580.36	1.435	1.545	4.00	551580.80	1.435	1.535	4.00	510212.24	1.445	1.525	4.00	317158.96
1.445	1.555	4.00	420580.36	1.445	1.545	4.00	558475.56	1.445	1.535	4.00	517107	1.455	1.525	4.00	358527.52
1.455	1.555	4.00	379211.8	1.455	1.545	4.00	558475.56	1.455	1.535	4.00	551580.8	1.465	1.525	4.00	386106.56
1.465	1.555	4.00	358527.52	1.465	1.545	4.00	544686.04	1.465	1.535	4.00	572265.08	1.475	1.525	4.00	399896.08
1.475	1.555	4.00	351632.76	1.475	1.545	4.00	537791.28	1.475	1.535	4.00	586054.6	1.485	1.525	4.00	455054.16
1.485	1.555	4.00	344738	1.485	1.545	4.00	558475.56	1.485	1.535	4.00	620528.4	1.495	1.525	4.00	489527.96
1.495	1.555	4.00	379211.8	1.495	1.545	4.00	586054.60	1.495	1.535	4.00	634317.92	1.505	1.525	4.00	468843.68
1.505	1.555	4.00	406790.84	1.505	1.545	4.00	586054.60	1.505	1.535	4.00	613633.64	1.515	1.525	4.00	496422.72
1.515	1.555	4.00	386106.56	1.515	1.545	4.00	558475.56	1.515	1.535	4.00	592949.36	1.525	1.525	4.00	441264.64
1.525	1.555	4.00	351632.76	1.525	1.545	4.00	510212.24	1.525	1.535	4.00	544686.04	1.535	1.525	4.00	358527.52
1.535	1.555	4.00	330948.48	1.535	1.545	4.00	468843.68	1.535	1.535	4.00	496422.72	1.545	1.525	4.00	372317.04
1.545	1.555	4.00	330948.48	1.545	1.545	4.00	482633.20	1.545	1.535	4.00	517107	1.555	1.525	4.00	379211.8
1.555	1.555	4.00	337843.24	1.555	1.545	4.00	517107.00	1.555	1.535	4.00	551580.8	1.565	1.525	4.00	379211.8
1.565	1.555	4.00	324053.72	1.565	1.545	4.00	496422.72	1.565	1.535	4.00	558475.56	1.575	1.525	4.00	399896.08
1.575	1.555	4.00	289579.92	1.575	1.545	4.00	455054.16	1.575	1.535	4.00	530896.52	1.585	1.525	4.00	413685.6
1.585	1.555	4.00	296474.68	1.585	1.545	4.00	434369.88	1.585	1.535	4.00	482633.2	1.595	1.525	4.00	406790.84
1.595	1.555	4.00	282685.16	1.595	1.545	4.00	420580.36	1.595	1.535	4.00	441264.64	1.605	1.525	4.00	372317.04
1.605	1.555	4.00	275790.4	1.605	1.545	4.00	372317.04	1.605	1.535	4.00	399896.08	1.615	1.525	4.00	296474.68
1.615	1.555	4.00	206842.8	1.615	1.545	4.00	303369.44	1.615	1.535	4.00	324053.72	1.625	1.525	4.00	227527.08
1.625	1.555	4.00	144789.96	1.625	1.545	4.00	213737.56	1.625	1.535	4.00	241316.6	1.635	1.525	4.00	0.00
1.635	1.555	4.00	0.00	1.635	1.545	4.00	165474.24	1.635	1.535	4.00	186158.52				
				1.645	1.545	4.00	0.00	1.645	1.535	4.00	0.00				

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (INTERMEDIO 2)											
X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)
1.365	1.505	4	0.00	1.365	1.495	4	0.00	1.365	1.485	4	0.00
1.375	1.505	4	234421.84	1.375	1.495	4	234421.84	1.375	1.485	4	151684.72
1.385	1.505	4	310264.20	1.385	1.495	4	296474.68	1.385	1.485	4	186158.52
1.395	1.505	4	386106.56	1.395	1.495	4	365422.28	1.395	1.485	4	220632.32
1.405	1.505	4	420580.36	1.405	1.495	4	399896.08	1.405	1.485	4	248211.36
1.415	1.505	4	420580.36	1.415	1.495	4	406790.84	1.415	1.485	4	268895.64
1.425	1.505	4	413685.60	1.425	1.495	4	413685.60	1.425	1.485	4	282685.16
1.435	1.505	4	413685.60	1.435	1.495	4	434369.88	1.435	1.485	4	324053.72
1.445	1.505	4	379211.80	1.445	1.495	4	413685.60	1.445	1.485	4	344738.00
1.455	1.505	4	344738.00	1.455	1.495	4	386106.56	1.455	1.485	4	330948.48
1.465	1.505	4	393001.32	1.465	1.495	4	448159.40	1.465	1.485	4	379211.80
1.475	1.505	4	434369.88	1.475	1.495	4	496422.72	1.475	1.485	4	441264.64
1.485	1.505	4	441264.64	1.485	1.495	4	475738.44	1.485	1.485	4	399896.08
1.495	1.505	4	427475.12	1.495	1.495	4	434369.88	1.495	1.485	4	351632.76
1.505	1.505	4	441264.64	1.505	1.495	4	448159.40	1.505	1.485	4	379211.80
1.515	1.505	4	489527.96	1.515	1.495	4	468843.68	1.515	1.485	4	406790.84
1.525	1.505	4	468843.68	1.525	1.495	4	455054.16	1.525	1.485	4	393001.32
1.535	1.505	4	427475.12	1.535	1.495	4	441264.64	1.535	1.485	4	386106.56
1.545	1.505	4	413685.60	1.545	1.495	4	427475.12	1.545	1.485	4	379211.80
1.555	1.505	4	386106.56	1.555	1.495	4	434369.88	1.555	1.485	4	386106.56
1.565	1.505	4	372317.04	1.565	1.495	4	441264.64	1.565	1.485	4	393001.32
1.575	1.505	4	337843.24	1.575	1.495	4	386106.56	1.575	1.485	4	358527.52
1.585	1.505	4	303369.44	1.585	1.495	4	317158.96	1.585	1.485	4	310264.20
1.595	1.505	4	358527.52	1.595	1.495	4	330948.48	1.595	1.485	4	296474.68
1.605	1.505	4	365422.28	1.605	1.495	4	324053.72	1.605	1.485	4	282685.16
1.615	1.505	4	275790.40	1.615	1.495	4	255106.12	1.615	1.485	4	234421.84
1.625	1.505	4	193053.28	1.625	1.495	4	179263.76	1.625	1.485	4	0.00
1.635	1.505	4	0.00	1.635	1.495	4	0.00				

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (EXTREMO 2)															
X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Presión de contacto (Pa)
1.365	1.465	4.00	0.00	1.365	1.455	4.00	0.00	1.365	1.445	4.00	0.00	1.375	1.435	4.00	0.00
1.375	1.465	4.00	103421.40	1.375	1.455	4.00	103421.40	1.375	1.445	4.00	89631.88	1.385	1.435	4.00	124105.68
1.385	1.465	4.00	179263.76	1.385	1.455	4.00	199948.04	1.385	1.445	4.00	165474.24	1.395	1.435	4.00	172369.00
1.395	1.465	4.00	241316.60	1.395	1.455	4.00	282685.16	1.395	1.445	4.00	241316.60	1.405	1.435	4.00	234421.84
1.405	1.465	4.00	275790.40	1.405	1.455	4.00	330948.48	1.405	1.445	4.00	289579.92	1.415	1.435	4.00	296474.68
1.415	1.465	4.00	296474.68	1.415	1.455	4.00	365422.28	1.415	1.445	4.00	337843.24	1.425	1.435	4.00	344738.00
1.425	1.465	4.00	317158.96	1.425	1.455	4.00	379211.80	1.425	1.445	4.00	365422.28	1.435	1.435	4.00	379211.80
1.435	1.465	4.00	310264.20	1.435	1.455	4.00	386106.56	1.435	1.445	4.00	393001.32	1.445	1.435	4.00	420580.36
1.445	1.465	4.00	310264.20	1.445	1.455	4.00	393001.32	1.445	1.445	4.00	420580.36	1.455	1.435	4.00	434369.88
1.455	1.465	4.00	337843.24	1.455	1.455	4.00	413685.60	1.455	1.445	4.00	427475.12	1.465	1.435	4.00	427475.12
1.465	1.465	4.00	393001.32	1.465	1.455	4.00	420580.36	1.465	1.445	4.00	420580.36	1.475	1.435	4.00	441264.64
1.475	1.465	4.00	448159.40	1.475	1.455	4.00	434369.88	1.475	1.445	4.00	427475.12	1.485	1.435	4.00	496422.72
1.485	1.465	4.00	475738.44	1.485	1.455	4.00	455054.16	1.485	1.445	4.00	461948.92	1.495	1.435	4.00	524001.76
1.495	1.465	4.00	468843.68	1.495	1.455	4.00	448159.40	1.495	1.445	4.00	475738.44	1.505	1.435	4.00	503317.48
1.505	1.465	4.00	448159.40	1.505	1.455	4.00	434369.88	1.505	1.445	4.00	455054.16	1.515	1.435	4.00	455054.16
1.515	1.465	4.00	434369.88	1.515	1.455	4.00	420580.36	1.515	1.445	4.00	427475.12	1.525	1.435	4.00	413685.60
1.525	1.465	4.00	420580.36	1.525	1.455	4.00	406790.84	1.525	1.445	4.00	399896.08	1.535	1.435	4.00	379211.80
1.535	1.465	4.00	406790.84	1.535	1.455	4.00	386106.56	1.535	1.445	4.00	372317.04	1.545	1.435	4.00	386106.56
1.545	1.465	4.00	379211.80	1.545	1.455	4.00	372317.04	1.545	1.445	4.00	372317.04	1.555	1.435	4.00	393001.32
1.555	1.465	4.00	365422.28	1.555	1.455	4.00	365422.28	1.555	1.445	4.00	379211.80	1.565	1.435	4.00	386106.56
1.565	1.465	4.00	330948.48	1.565	1.455	4.00	344738.00	1.565	1.445	4.00	365422.28	1.575	1.435	4.00	344738.00
1.575	1.465	4.00	268895.64	1.575	1.455	4.00	310264.20	1.575	1.445	4.00	330948.48	1.585	1.435	4.00	275790.40
1.585	1.465	4.00	268895.64	1.585	1.455	4.00	282685.16	1.585	1.445	4.00	282685.16	1.595	1.435	4.00	213737.56
1.595	1.465	4.00	255106.12	1.595	1.455	4.00	248211.36	1.595	1.445	4.00	227527.08	1.605	1.435	4.00	165474.24
1.605	1.465	4.00	186158.52	1.605	1.455	4.00	186158.52	1.605	1.445	4.00	172369.00	1.615	1.435	4.00	0.00
1.615	1.465	4.00	137895.20	1.615	1.455	4.00	137895.20	1.615	1.445	4.00	124105.68				
1.625	1.465	4.00	0.00	1.625	1.455	4.00	0.00	1.625	1.445	4.00	0.00				

Apéndice C: Tablas de coordenadas y valores de presión para configuración de carga 42,5 kN con 115psi de presión en los neumáticos.

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (EXTREMO 1)															
X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)
1.375	1.645	4.00	0.00	1.375	1.635	4.00	0.00	1.365	1.625	4.00	0.00	1.365	1.615	4.00	0.00
1.385	1.645	4.00	179263.76	1.385	1.635	4.00	206842.80	1.375	1.625	4.00	103421.40	1.375	1.615	4.00	82737.12
1.395	1.645	4.00	248211.36	1.395	1.635	4.00	275790.40	1.385	1.625	4.00	199948.04	1.385	1.615	4.00	179263.76
1.405	1.645	4.00	303369.44	1.405	1.635	4.00	330948.48	1.395	1.625	4.00	303369.44	1.395	1.615	4.00	303369.44
1.415	1.645	4.00	337843.24	1.415	1.635	4.00	365422.28	1.405	1.625	4.00	358527.52	1.405	1.615	4.00	365422.28
1.425	1.645	4.00	386106.56	1.425	1.635	4.00	399896.08	1.415	1.625	4.00	386106.56	1.415	1.615	4.00	386106.56
1.435	1.645	4.00	427475.12	1.435	1.635	4.00	434369.88	1.425	1.625	4.00	420580.36	1.425	1.615	4.00	420580.36
1.445	1.645	4.00	448159.40	1.445	1.635	4.00	441264.64	1.435	1.625	4.00	455054.16	1.435	1.615	4.00	468843.68
1.455	1.645	4.00	448159.40	1.455	1.635	4.00	441264.64	1.445	1.625	4.00	461948.92	1.445	1.615	4.00	475738.44
1.465	1.645	4.00	448159.40	1.465	1.635	4.00	448159.40	1.455	1.625	4.00	461948.92	1.455	1.615	4.00	468843.68
1.475	1.645	4.00	427475.12	1.475	1.635	4.00	448159.40	1.465	1.625	4.00	475738.44	1.465	1.615	4.00	496422.72
1.485	1.645	4.00	413685.60	1.485	1.635	4.00	434369.88	1.475	1.625	4.00	482633.20	1.475	1.615	4.00	503317.48
1.495	1.645	4.00	399896.08	1.495	1.635	4.00	413685.60	1.485	1.625	4.00	468843.68	1.485	1.615	4.00	489527.96
1.505	1.645	4.00	399896.08	1.505	1.635	4.00	406790.84	1.495	1.625	4.00	448159.40	1.495	1.615	4.00	475738.44
1.515	1.645	4.00	399896.08	1.515	1.635	4.00	406790.84	1.505	1.625	4.00	420580.36	1.505	1.615	4.00	420580.36
1.525	1.645	4.00	386106.56	1.525	1.635	4.00	399896.08	1.515	1.625	4.00	406790.84	1.515	1.615	4.00	372317.04
1.535	1.645	4.00	351632.76	1.535	1.635	4.00	386106.56	1.525	1.625	4.00	413685.60	1.525	1.615	4.00	399896.08
1.545	1.645	4.00	317158.96	1.545	1.635	4.00	358527.52	1.535	1.625	4.00	420580.36	1.535	1.615	4.00	399896.08
1.555	1.645	4.00	275790.40	1.555	1.635	4.00	324053.72	1.545	1.625	4.00	406790.84	1.545	1.615	4.00	351632.76
1.565	1.645	4.00	234421.84	1.565	1.635	4.00	289579.92	1.555	1.625	4.00	386106.56	1.555	1.615	4.00	324053.72
1.575	1.645	4.00	199948.04	1.575	1.635	4.00	255106.12	1.565	1.625	4.00	344738.00	1.565	1.615	4.00	296474.68
1.585	1.645	4.00	165474.24	1.585	1.635	4.00	220632.32	1.575	1.625	4.00	303369.44	1.575	1.615	4.00	255106.12
1.595	1.645	4.00	137895.20	1.595	1.635	4.00	179263.76	1.585	1.625	4.00	262000.88	1.585	1.615	4.00	220632.32
1.605	1.645	4.00	0.00	1.605	1.635	4.00	0.00	1.595	1.625	4.00	206842.80	1.595	1.615	4.00	186158.52
								1.605	1.625	4.00	137895.20	1.605	1.615	4.00	137895.20
								1.615	1.625	4.00	0.00	1.615	1.615	4.00	0.00

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (INTERMEDIO 1)											
X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)
1.355	1.595	4	0.00	1.355	1.585	4	0.00	1.355	1.575	4	0.00
1.365	1.595	4	62052.84	1.365	1.585	4	96526.64	1.365	1.575	4	117210.92
1.375	1.595	4	144789.96	1.375	1.585	4	172369.00	1.375	1.575	4	193053.28
1.385	1.595	4	282685.16	1.385	1.585	4	324053.72	1.385	1.575	4	337843.24
1.395	1.595	4	372317.04	1.395	1.585	4	427475.12	1.395	1.575	4	379211.80
1.405	1.595	4	399896.08	1.405	1.585	4	441264.64	1.405	1.575	4	365422.28
1.415	1.595	4	427475.12	1.415	1.585	4	448159.40	1.415	1.575	4	372317.04
1.425	1.595	4	455054.16	1.425	1.585	4	489527.96	1.425	1.575	4	413685.60
1.435	1.595	4	475738.44	1.435	1.585	4	530896.52	1.435	1.575	4	448159.40
1.445	1.595	4	503317.48	1.445	1.585	4	537791.28	1.445	1.575	4	461948.92
1.455	1.595	4	468843.68	1.455	1.585	4	530896.52	1.455	1.575	4	475738.44
1.465	1.595	4	448159.40	1.465	1.585	4	551580.80	1.465	1.575	4	510212.24
1.475	1.595	4	537791.28	1.475	1.585	4	606738.88	1.475	1.575	4	537791.28
1.485	1.595	4	579159.84	1.485	1.585	4	613633.64	1.485	1.575	4	524001.76
1.495	1.595	4	503317.48	1.495	1.585	4	510212.24	1.495	1.575	4	441264.64
1.505	1.595	4	448159.40	1.505	1.585	4	434369.88	1.505	1.575	4	372317.04
1.515	1.595	4	448159.40	1.515	1.585	4	475738.44	1.515	1.575	4	427475.12
1.525	1.595	4	427475.12	1.525	1.585	4	503317.48	1.525	1.575	4	468843.68
1.535	1.595	4	379211.80	1.535	1.585	4	475738.44	1.535	1.575	4	455054.16
1.545	1.595	4	337843.24	1.545	1.585	4	482633.20	1.545	1.575	4	461948.92
1.555	1.595	4	310264.20	1.555	1.585	4	475738.44	1.555	1.575	4	461948.92
1.565	1.595	4	275790.40	1.565	1.585	4	420580.36	1.565	1.575	4	427475.12
1.575	1.595	4	241316.60	1.575	1.585	4	372317.04	1.575	1.575	4	379211.80
1.585	1.595	4	213737.56	1.585	1.585	4	330948.48	1.585	1.575	4	344738.00
1.595	1.595	4	186158.52	1.595	1.585	4	282685.16	1.595	1.575	4	310264.20
1.605	1.595	4	165474.24	1.605	1.585	4	234421.84	1.605	1.575	4	262000.88
1.615	1.595	4	0.00	1.615	1.585	4	193053.28	1.615	1.575	4	206842.80
				1.625	1.585	4	0.00	1.625	1.575	4	0.00

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (CENTRO)															
X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)
1.355	1.555	4.00	0.00	1.355	1.545	4.00	0.00	1.355	1.535	4.00	0.00	1.365	1.525	4.00	0.00
1.365	1.555	4.00	172369.00	1.365	1.545	4.00	248211.36	1.365	1.535	4.00	255106.12	1.375	1.525	4.00	206842.80
1.375	1.555	4.00	289579.92	1.375	1.545	4.00	351632.76	1.375	1.535	4.00	330948.48	1.385	1.525	4.00	268895.64
1.385	1.555	4.00	393001.32	1.385	1.545	4.00	461948.92	1.385	1.535	4.00	441264.64	1.395	1.525	4.00	330948.48
1.395	1.555	4.00	386106.56	1.395	1.545	4.00	530896.52	1.395	1.535	4.00	489527.96	1.405	1.525	4.00	330948.48
1.405	1.555	4.00	379211.80	1.405	1.545	4.00	565370.32	1.405	1.535	4.00	510212.24	1.415	1.525	4.00	365422.28
1.415	1.555	4.00	372317.04	1.415	1.545	4.00	579159.84	1.415	1.535	4.00	551580.80	1.425	1.525	4.00	406790.84
1.425	1.555	4.00	372317.04	1.425	1.545	4.00	586054.60	1.425	1.535	4.00	572265.08	1.435	1.525	4.00	441264.64
1.435	1.555	4.00	413685.60	1.435	1.545	4.00	606738.88	1.435	1.535	4.00	586054.60	1.445	1.525	4.00	448159.40
1.445	1.555	4.00	434369.88	1.445	1.545	4.00	620528.40	1.445	1.535	4.00	599844.12	1.455	1.525	4.00	434369.88
1.455	1.555	4.00	448159.40	1.455	1.545	4.00	620528.40	1.455	1.535	4.00	599844.12	1.465	1.525	4.00	434369.88
1.465	1.555	4.00	475738.44	1.465	1.545	4.00	648107.44	1.465	1.535	4.00	620528.40	1.475	1.525	4.00	441264.64
1.475	1.555	4.00	482633.20	1.475	1.545	4.00	675686.48	1.475	1.535	4.00	655002.20	1.485	1.525	4.00	434369.88
1.485	1.555	4.00	475738.44	1.485	1.545	4.00	689476.00	1.485	1.535	4.00	668791.72	1.495	1.525	4.00	406790.84
1.495	1.555	4.00	468843.68	1.495	1.545	4.00	668791.72	1.495	1.535	4.00	641212.68	1.505	1.525	4.00	406790.84
1.505	1.555	4.00	434369.88	1.505	1.545	4.00	620528.40	1.505	1.535	4.00	613633.64	1.515	1.525	4.00	399896.08
1.515	1.555	4.00	399896.08	1.515	1.545	4.00	572265.08	1.515	1.535	4.00	592949.36	1.525	1.525	4.00	393001.32
1.525	1.555	4.00	372317.04	1.525	1.545	4.00	551580.80	1.525	1.535	4.00	579159.84	1.535	1.525	4.00	413685.60
1.535	1.555	4.00	358527.52	1.535	1.545	4.00	544686.04	1.535	1.535	4.00	586054.60	1.545	1.525	4.00	434369.88
1.545	1.555	4.00	365422.28	1.545	1.545	4.00	558475.56	1.545	1.535	4.00	606738.88	1.555	1.525	4.00	434369.88
1.555	1.555	4.00	365422.28	1.555	1.545	4.00	544686.04	1.555	1.535	4.00	599844.12	1.565	1.525	4.00	399896.08
1.565	1.555	4.00	344738.00	1.565	1.545	4.00	503317.48	1.565	1.535	4.00	558475.56	1.575	1.525	4.00	351632.76
1.575	1.555	4.00	317158.96	1.575	1.545	4.00	455054.16	1.575	1.535	4.00	503317.48	1.585	1.525	4.00	310264.20
1.585	1.555	4.00	289579.92	1.585	1.545	4.00	406790.84	1.585	1.535	4.00	448159.40	1.595	1.525	4.00	296474.68
1.595	1.555	4.00	255106.12	1.595	1.545	4.00	365422.28	1.595	1.535	4.00	406790.84	1.605	1.525	4.00	227527.08
1.605	1.555	4.00	227527.08	1.605	1.545	4.00	303369.44	1.605	1.535	4.00	324053.72	1.615	1.525	4.00	158579.48
1.615	1.555	4.00	0.00	1.615	1.545	4.00	234421.84	1.615	1.535	4.00	213737.56	1.625	1.525	4.00	0.00
				1.625	1.545	4.00	0.00	1.625	1.535	4.00	0.00				

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (INTERMEDIO 2)											
X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)
1.355	1.505	4.00	0.00	1.355	1.495	4.00	0.00	1.365	1.485	4.00	0.00
1.365	1.505	4.00	137895.20	1.365	1.495	4.00	124105.68	1.375	1.485	4.00	124105.68
1.375	1.505	4.00	241316.60	1.375	1.495	4.00	220632.32	1.385	1.485	4.00	179263.76
1.385	1.505	4.00	337843.24	1.385	1.495	4.00	310264.20	1.395	1.485	4.00	234421.84
1.395	1.505	4.00	365422.28	1.395	1.495	4.00	351632.76	1.405	1.485	4.00	268895.64
1.405	1.505	4.00	420580.36	1.405	1.495	4.00	406790.84	1.415	1.485	4.00	303369.44
1.415	1.505	4.00	455054.16	1.415	1.495	4.00	448159.40	1.425	1.485	4.00	289579.92
1.425	1.505	4.00	434369.88	1.425	1.495	4.00	413685.60	1.435	1.485	4.00	275790.40
1.435	1.505	4.00	427475.12	1.435	1.495	4.00	393001.32	1.445	1.485	4.00	324053.72
1.445	1.505	4.00	482633.20	1.445	1.495	4.00	475738.44	1.455	1.485	4.00	365422.28
1.455	1.505	4.00	510212.24	1.455	1.495	4.00	537791.28	1.465	1.485	4.00	358527.52
1.465	1.505	4.00	517107.00	1.465	1.495	4.00	544686.04	1.475	1.485	4.00	351632.76
1.475	1.505	4.00	530896.52	1.475	1.495	4.00	558475.56	1.485	1.485	4.00	358527.52
1.485	1.505	4.00	517107.00	1.485	1.495	4.00	551580.80	1.495	1.485	4.00	351632.76
1.495	1.505	4.00	489527.96	1.495	1.495	4.00	530896.52	1.505	1.485	4.00	358527.52
1.505	1.505	4.00	468843.68	1.505	1.495	4.00	517107.00	1.515	1.485	4.00	399896.08
1.515	1.505	4.00	406790.84	1.515	1.495	4.00	461948.92	1.525	1.485	4.00	406790.84
1.525	1.505	4.00	351632.76	1.525	1.495	4.00	413685.60	1.535	1.485	4.00	420580.36
1.535	1.505	4.00	399896.08	1.535	1.495	4.00	455054.16	1.545	1.485	4.00	448159.40
1.545	1.505	4.00	448159.40	1.545	1.495	4.00	510212.24	1.555	1.485	4.00	406790.84
1.555	1.505	4.00	434369.88	1.555	1.495	4.00	475738.44	1.565	1.485	4.00	330948.48
1.565	1.505	4.00	386106.56	1.565	1.495	4.00	420580.36	1.575	1.485	4.00	337843.24
1.575	1.505	4.00	344738.00	1.575	1.495	4.00	393001.32	1.585	1.485	4.00	330948.48
1.585	1.505	4.00	317158.96	1.585	1.495	4.00	365422.28	1.595	1.485	4.00	241316.60
1.595	1.505	4.00	282685.16	1.595	1.495	4.00	296474.68	1.605	1.485	4.00	151684.72
1.605	1.505	4.00	241316.60	1.605	1.495	4.00	220632.32	1.615	1.485	4.00	0.00
1.615	1.505	4.00	193053.28	1.615	1.495	4.00	0.00			4.00	
1.625	1.505	4.00	0.00								

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (EXTREMO 2)															
X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)
1.365	1.465	4.00	0.00	1.375	1.455	4.00	0.00	1.375	1.445	4.00	0.00	1.375	1.435	4.00	0.00
1.375	1.465	4.00	75842.36	1.385	1.455	4.00	206842.80	1.385	1.445	4.00	172369.00	1.385	1.435	4.00	96526.64
1.385	1.465	4.00	151684.72	1.395	1.455	4.00	262000.88	1.395	1.445	4.00	206842.80	1.395	1.435	4.00	131000.44
1.395	1.465	4.00	234421.84	1.405	1.455	4.00	317158.96	1.405	1.445	4.00	255106.12	1.405	1.435	4.00	179263.76
1.405	1.465	4.00	282685.16	1.415	1.455	4.00	344738.00	1.415	1.445	4.00	296474.68	1.415	1.435	4.00	234421.84
1.415	1.465	4.00	289579.92	1.425	1.455	4.00	372317.04	1.425	1.445	4.00	337843.24	1.425	1.435	4.00	296474.68
1.425	1.465	4.00	310264.20	1.435	1.455	4.00	406790.84	1.435	1.445	4.00	372317.04	1.435	1.435	4.00	344738.00
1.435	1.465	4.00	344738.00	1.445	1.455	4.00	427475.12	1.445	1.445	4.00	386106.56	1.445	1.435	4.00	358527.52
1.445	1.465	4.00	358527.52	1.455	1.455	4.00	434369.88	1.455	1.445	4.00	386106.56	1.455	1.435	4.00	358527.52
1.455	1.465	4.00	358527.52	1.465	1.455	4.00	455054.16	1.465	1.445	4.00	406790.84	1.465	1.435	4.00	379211.80
1.465	1.465	4.00	372317.04	1.475	1.455	4.00	475738.44	1.475	1.445	4.00	441264.64	1.475	1.435	4.00	427475.12
1.475	1.465	4.00	393001.32	1.485	1.455	4.00	468843.68	1.485	1.445	4.00	441264.64	1.485	1.435	4.00	441264.64
1.485	1.465	4.00	386106.56	1.495	1.455	4.00	448159.40	1.495	1.445	4.00	427475.12	1.495	1.435	4.00	427475.12
1.495	1.465	4.00	365422.28	1.505	1.455	4.00	420580.36	1.505	1.445	4.00	406790.84	1.505	1.435	4.00	406790.84
1.505	1.465	4.00	351632.76	1.515	1.455	4.00	386106.56	1.515	1.445	4.00	379211.80	1.515	1.435	4.00	365422.28
1.515	1.465	4.00	344738.00	1.525	1.455	4.00	379211.80	1.525	1.445	4.00	351632.76	1.525	1.435	4.00	324053.72
1.525	1.465	4.00	386106.56	1.535	1.455	4.00	379211.80	1.535	1.445	4.00	337843.24	1.535	1.435	4.00	303369.44
1.535	1.465	4.00	399896.08	1.545	1.455	4.00	372317.04	1.545	1.445	4.00	337843.24	1.545	1.435	4.00	310264.20
1.545	1.465	4.00	386106.56	1.555	1.455	4.00	351632.76	1.555	1.445	4.00	330948.48	1.555	1.435	4.00	317158.96
1.555	1.465	4.00	372317.04	1.565	1.455	4.00	317158.96	1.565	1.445	4.00	289579.92	1.565	1.435	4.00	275790.40
1.565	1.465	4.00	344738.00	1.575	1.455	4.00	268895.64	1.575	1.445	4.00	227527.08	1.575	1.435	4.00	199948.04
1.575	1.465	4.00	289579.92	1.585	1.455	4.00	220632.32	1.585	1.445	4.00	186158.52	1.585	1.435	4.00	151684.72
1.585	1.465	4.00	234421.84	1.595	1.455	4.00	186158.52	1.595	1.445	4.00	158579.48	1.595	1.435	4.00	0.00
1.595	1.465	4.00	206842.80	1.605	1.455	4.00	0.00	1.605	1.445	4.00	0.00			4.00	
1.605	1.465	4.00	0.00												

Apéndice D: Tablas de coordenadas y valores de presión para configuración de carga 62,5 kN con 80 psi de presión en los neumáticos.

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (EXTREMO 1)											
X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)
1.365	1.645	4.00	0.00	1.355	1.625	4.00	0.00	1.355	1.615	4.00	0.00
1.375	1.645	4.00	193053.28	1.365	1.625	4.00	55158.08	1.365	1.615	4.00	41368.56
1.385	1.645	4.00	234421.84	1.375	1.625	4.00	124105.68	1.375	1.615	4.00	82737.12
1.395	1.645	4.00	289579.92	1.385	1.625	4.00	213737.56	1.385	1.615	4.00	137895.20
1.405	1.645	4.00	330948.48	1.395	1.625	4.00	262000.88	1.395	1.615	4.00	172369.00
1.415	1.645	4.00	358527.52	1.405	1.625	4.00	303369.44	1.405	1.615	4.00	213737.56
1.425	1.645	4.00	379211.80	1.415	1.625	4.00	365422.28	1.415	1.615	4.00	289579.92
1.435	1.645	4.00	399896.08	1.425	1.625	4.00	399896.08	1.425	1.615	4.00	296474.68
1.445	1.645	4.00	455054.16	1.435	1.625	4.00	406790.84	1.435	1.615	4.00	296474.68
1.455	1.645	4.00	537791.28	1.445	1.625	4.00	434369.88	1.445	1.615	4.00	351632.76
1.465	1.645	4.00	606738.88	1.455	1.625	4.00	434369.88	1.455	1.615	4.00	337843.24
1.475	1.645	4.00	606738.88	1.465	1.625	4.00	420580.36	1.465	1.615	4.00	310264.20
1.485	1.645	4.00	620528.40	1.475	1.625	4.00	434369.88	1.475	1.615	4.00	372317.04
1.495	1.645	4.00	627423.16	1.485	1.625	4.00	448159.40	1.485	1.615	4.00	413685.60
1.505	1.645	4.00	627423.16	1.495	1.625	4.00	441264.64	1.495	1.615	4.00	393001.32
1.515	1.645	4.00	648107.44	1.505	1.625	4.00	455054.16	1.505	1.615	4.00	427475.12
1.525	1.645	4.00	682581.24	1.515	1.625	4.00	489527.96	1.515	1.615	4.00	461948.92
1.535	1.645	4.00	710160.28	1.525	1.625	4.00	503317.48	1.525	1.615	4.00	448159.40
1.545	1.645	4.00	717055.04	1.535	1.625	4.00	503317.48	1.535	1.615	4.00	441264.64
1.555	1.645	4.00	710160.28	1.545	1.625	4.00	496422.72	1.545	1.615	4.00	461948.92
1.565	1.645	4.00	661896.96	1.555	1.625	4.00	489527.96	1.555	1.615	4.00	461948.92
1.575	1.645	4.00	592949.36	1.565	1.625	4.00	468843.68	1.565	1.615	4.00	413685.60
1.585	1.645	4.00	537791.28	1.575	1.625	4.00	455054.16	1.575	1.615	4.00	358527.52
1.595	1.645	4.00	503317.48	1.585	1.625	4.00	441264.64	1.585	1.615	4.00	330948.48
1.605	1.645	4.00	461948.92	1.595	1.625	4.00	441264.64	1.595	1.615	4.00	330948.48
1.615	1.645	4.00	420580.36	1.605	1.625	4.00	434369.88	1.605	1.615	4.00	337843.24
1.625	1.645	4.00	406790.84	1.615	1.625	4.00	406790.84	1.615	1.615	4.00	310264.20
1.635	1.645	4.00	317158.96	1.625	1.625	4.00	372317.04	1.625	1.615	4.00	268895.64
1.645	1.645	4.00	234421.84	1.635	1.625	4.00	399896.08	1.635	1.615	4.00	324053.72
1.655	1.645	4.00	186158.52	1.645	1.625	4.00	420580.36	1.645	1.615	4.00	358527.52
1.665	1.645	4.00	117210.92	1.655	1.625	4.00	386106.56	1.655	1.615	4.00	324053.72
1.675	1.645	4.00	82737.12	1.665	1.625	4.00	344738.00	1.665	1.615	4.00	289579.92
1.685	1.645	4.00	0.00	1.675	1.625	4.00	289579.92	1.675	1.615	4.00	248211.36
				1.685	1.625	4.00	213737.56	1.685	1.615	4.00	193053.28
				1.695	1.625	4.00	158579.48	1.695	1.615	4.00	0.00
				1.705	1.625	4.00	0.00				

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (INTERMEDIO 1)											
X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)
1.355	1.595	4.00	0.00	1.355	1.585	4.00	0.00	1.355	1.575	4.00	0.00
1.365	1.595	4.00	96526.64	1.365	1.585	4.00	103421.40	1.365	1.575	4.00	89631.88
1.375	1.595	4.00	158579.48	1.375	1.585	4.00	165474.24	1.375	1.575	4.00	124105.68
1.385	1.595	4.00	213737.56	1.385	1.585	4.00	248211.36	1.385	1.575	4.00	165474.24
1.395	1.595	4.00	255106.12	1.395	1.585	4.00	317158.96	1.395	1.575	4.00	220632.32
1.405	1.595	4.00	317158.96	1.405	1.585	4.00	386106.56	1.405	1.575	4.00	344738.00
1.415	1.595	4.00	365422.28	1.415	1.585	4.00	434369.88	1.415	1.575	4.00	441264.64
1.425	1.595	4.00	358527.52	1.425	1.585	4.00	455054.16	1.425	1.575	4.00	475738.44
1.435	1.595	4.00	358527.52	1.435	1.585	4.00	461948.92	1.435	1.575	4.00	496422.72
1.445	1.595	4.00	372317.04	1.445	1.585	4.00	468843.68	1.445	1.575	4.00	510212.24
1.455	1.595	4.00	351632.76	1.455	1.585	4.00	475738.44	1.455	1.575	4.00	510212.24
1.465	1.595	4.00	330948.48	1.465	1.585	4.00	448159.40	1.465	1.575	4.00	482633.20
1.475	1.595	4.00	324053.72	1.475	1.585	4.00	386106.56	1.475	1.575	4.00	413685.60
1.485	1.595	4.00	324053.72	1.485	1.585	4.00	365422.28	1.485	1.575	4.00	386106.56
1.495	1.595	4.00	365422.28	1.495	1.585	4.00	406790.84	1.495	1.575	4.00	427475.12
1.505	1.595	4.00	393001.32	1.505	1.585	4.00	427475.12	1.505	1.575	4.00	455054.16
1.515	1.595	4.00	379211.80	1.515	1.585	4.00	399896.08	1.515	1.575	4.00	434369.88
1.525	1.595	4.00	393001.32	1.525	1.585	4.00	399896.08	1.525	1.575	4.00	427475.12
1.535	1.595	4.00	420580.36	1.535	1.585	4.00	448159.40	1.535	1.575	4.00	441264.64
1.545	1.595	4.00	406790.84	1.545	1.585	4.00	455054.16	1.545	1.575	4.00	406790.84
1.555	1.595	4.00	365422.28	1.555	1.585	4.00	413685.60	1.555	1.575	4.00	358527.52
1.565	1.595	4.00	324053.72	1.565	1.585	4.00	406790.84	1.565	1.575	4.00	358527.52
1.575	1.595	4.00	289579.92	1.575	1.585	4.00	413685.60	1.575	1.575	4.00	365422.28
1.585	1.595	4.00	255106.12	1.585	1.585	4.00	399896.08	1.585	1.575	4.00	358527.52
1.595	1.595	4.00	262000.88	1.595	1.585	4.00	386106.56	1.595	1.575	4.00	358527.52
1.605	1.595	4.00	241316.60	1.605	1.585	4.00	330948.48	1.605	1.575	4.00	317158.96
1.615	1.595	4.00	193053.28	1.615	1.585	4.00	262000.88	1.615	1.575	4.00	262000.88
1.625	1.595	4.00	193053.28	1.625	1.585	4.00	289579.92	1.625	1.575	4.00	303369.44
1.635	1.595	4.00	199948.04	1.635	1.585	4.00	303369.44	1.635	1.575	4.00	330948.48
1.645	1.595	4.00	206842.80	1.645	1.585	4.00	317158.96	1.645	1.575	4.00	358527.52
1.655	1.595	4.00	193053.28	1.655	1.585	4.00	282685.16	1.655	1.575	4.00	317158.96
1.665	1.595	4.00	179263.76	1.665	1.585	4.00	268895.64	1.665	1.575	4.00	303369.44
1.675	1.595	4.00	0.00	1.675	1.585	4.00	248211.36	1.675	1.575	4.00	262000.88
				1.685	1.585	4.00	213737.56	1.685	1.575	4.00	213737.56
				1.695	1.585	4.00	0.00	1.695	1.575	4.00	0.00

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (CENTRO)											
X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)
1.355	1.555	4.00	0.00	1.355	1.545	4.00	0.00	1.355	1.535	4.00	0.00
1.365	1.555	4.00	186158.52	1.365	1.545	4.00	193053.28	1.365	1.535	4.00	151684.72
1.375	1.555	4.00	227527.08	1.375	1.545	4.00	268895.64	1.375	1.535	4.00	234421.84
1.385	1.555	4.00	275790.40	1.385	1.545	4.00	351632.76	1.385	1.535	4.00	317158.96
1.395	1.555	4.00	330948.48	1.395	1.545	4.00	406790.84	1.395	1.535	4.00	372317.04
1.405	1.555	4.00	420580.36	1.405	1.545	4.00	441264.64	1.405	1.535	4.00	406790.84
1.415	1.555	4.00	503317.48	1.415	1.545	4.00	496422.72	1.415	1.535	4.00	475738.44
1.425	1.555	4.00	530896.52	1.425	1.545	4.00	537791.28	1.425	1.535	4.00	524001.76
1.435	1.555	4.00	510212.24	1.435	1.545	4.00	524001.76	1.435	1.535	4.00	530896.52
1.445	1.555	4.00	489527.96	1.445	1.545	4.00	517107.00	1.445	1.535	4.00	530896.52
1.455	1.555	4.00	524001.76	1.455	1.545	4.00	530896.52	1.455	1.535	4.00	524001.76
1.465	1.555	4.00	537791.28	1.465	1.545	4.00	530896.52	1.465	1.535	4.00	475738.44
1.475	1.555	4.00	517107.00	1.475	1.545	4.00	517107.00	1.475	1.535	4.00	413685.60
1.485	1.555	4.00	530896.52	1.485	1.545	4.00	524001.76	1.485	1.535	4.00	399896.08
1.495	1.555	4.00	524001.76	1.495	1.545	4.00	524001.76	1.495	1.535	4.00	406790.84
1.505	1.555	4.00	489527.96	1.505	1.545	4.00	503317.48	1.505	1.535	4.00	427475.12
1.515	1.555	4.00	461948.92	1.515	1.545	4.00	503317.48	1.515	1.535	4.00	475738.44
1.525	1.555	4.00	427475.12	1.525	1.545	4.00	503317.48	1.525	1.535	4.00	482633.20
1.535	1.555	4.00	365422.28	1.535	1.545	4.00	496422.72	1.535	1.535	4.00	475738.44
1.545	1.555	4.00	337843.24	1.545	1.545	4.00	496422.72	1.545	1.535	4.00	468843.68
1.555	1.555	4.00	324053.72	1.555	1.545	4.00	475738.44	1.555	1.535	4.00	461948.92
1.565	1.555	4.00	303369.44	1.565	1.545	4.00	448159.40	1.565	1.535	4.00	448159.40
1.575	1.555	4.00	296474.68	1.575	1.545	4.00	434369.88	1.575	1.535	4.00	434369.88
1.585	1.555	4.00	289579.92	1.585	1.545	4.00	427475.12	1.585	1.535	4.00	434369.88
1.595	1.555	4.00	296474.68	1.595	1.545	4.00	434369.88	1.595	1.535	4.00	448159.40
1.605	1.555	4.00	289579.92	1.605	1.545	4.00	434369.88	1.605	1.535	4.00	461948.92
1.615	1.555	4.00	268895.64	1.615	1.545	4.00	420580.36	1.615	1.535	4.00	468843.68
1.625	1.555	4.00	268895.64	1.625	1.545	4.00	413685.60	1.625	1.535	4.00	482633.20
1.635	1.555	4.00	248211.36	1.635	1.545	4.00	393001.32	1.635	1.535	4.00	468843.68
1.645	1.555	4.00	220632.32	1.645	1.545	4.00	372317.04	1.645	1.535	4.00	448159.40
1.655	1.555	4.00	241316.60	1.655	1.545	4.00	358527.52	1.655	1.535	4.00	420580.36
1.665	1.555	4.00	220632.32	1.665	1.545	4.00	330948.48	1.665	1.535	4.00	379211.80
1.675	1.555	4.00	193053.28	1.675	1.545	4.00	275790.40	1.675	1.535	4.00	324053.72
1.685	1.555	4.00	0.00	1.685	1.545	4.00	220632.32	1.685	1.535	4.00	248211.36
				1.695	1.545	4.00	186158.52	1.695	1.535	4.00	193053.28
				1.705	1.545	4.00	0.00	1.705	1.535	4.00	0.00

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (INTERMEDIO 2)											
X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)
1.355	1.505	4.00	0.00	1.365	1.495	4.00	0.00	1.415	1.485	4.00	0.00
1.365	1.505	4.00	137895.20	1.375	1.495	4.00	165474.24	1.425	1.485	4.00	234421.84
1.375	1.505	4.00	186158.52	1.385	1.495	4.00	241316.60	1.435	1.485	4.00	220632.32
1.385	1.505	4.00	275790.40	1.395	1.495	4.00	303369.44	1.445	1.485	4.00	213737.56
1.395	1.505	4.00	344738.00	1.405	1.495	4.00	317158.96	1.455	1.485	4.00	193053.28
1.405	1.505	4.00	344738.00	1.415	1.495	4.00	303369.44	1.465	1.485	4.00	199948.04
1.415	1.505	4.00	337843.24	1.425	1.495	4.00	317158.96	1.475	1.485	4.00	227527.08
1.425	1.505	4.00	406790.84	1.435	1.495	4.00	330948.48	1.485	1.485	4.00	248211.36
1.435	1.505	4.00	448159.40	1.445	1.495	4.00	303369.44	1.495	1.485	4.00	255106.12
1.445	1.505	4.00	427475.12	1.455	1.495	4.00	268895.64	1.505	1.485	4.00	248211.36
1.455	1.505	4.00	393001.32	1.465	1.495	4.00	296474.68	1.515	1.485	4.00	255106.12
1.465	1.505	4.00	399896.08	1.475	1.495	4.00	337843.24	1.525	1.485	4.00	282685.16
1.475	1.505	4.00	420580.36	1.485	1.495	4.00	365422.28	1.535	1.485	4.00	289579.92
1.485	1.505	4.00	441264.64	1.495	1.495	4.00	365422.28	1.545	1.485	4.00	268895.64
1.495	1.505	4.00	434369.88	1.505	1.495	4.00	358527.52	1.555	1.485	4.00	262000.88
1.505	1.505	4.00	399896.08	1.515	1.495	4.00	365422.28	1.565	1.485	4.00	262000.88
1.515	1.505	4.00	406790.84	1.525	1.495	4.00	399896.08	1.575	1.485	4.00	262000.88
1.525	1.505	4.00	427475.12	1.535	1.495	4.00	365422.28	1.585	1.485	4.00	289579.92
1.535	1.505	4.00	365422.28	1.545	1.495	4.00	310264.20	1.595	1.485	4.00	317158.96
1.545	1.505	4.00	289579.92	1.555	1.495	4.00	344738.00	1.605	1.485	4.00	324053.72
1.555	1.505	4.00	324053.72	1.565	1.495	4.00	379211.80	1.615	1.485	4.00	324053.72
1.565	1.505	4.00	358527.52	1.575	1.495	4.00	379211.80	1.625	1.485	4.00	317158.96
1.575	1.505	4.00	337843.24	1.585	1.495	4.00	386106.56	1.635	1.485	4.00	337843.24
1.585	1.505	4.00	330948.48	1.595	1.495	4.00	399896.08	1.645	1.485	4.00	358527.52
1.595	1.505	4.00	337843.24	1.605	1.495	4.00	399896.08	1.655	1.485	4.00	310264.20
1.605	1.505	4.00	337843.24	1.615	1.495	4.00	386106.56	1.665	1.485	4.00	234421.84
1.615	1.505	4.00	324053.72	1.625	1.495	4.00	365422.28	1.675	1.485	4.00	172369.00
1.625	1.505	4.00	317158.96	1.635	1.495	4.00	386106.56	1.685	1.485	4.00	144789.96
1.635	1.505	4.00	379211.80	1.645	1.495	4.00	406790.84	1.695	1.485	4.00	0.00
1.645	1.505	4.00	434369.88	1.655	1.495	4.00	351632.76				
1.655	1.505	4.00	386106.56	1.665	1.495	4.00	255106.12				
1.665	1.505	4.00	262000.88	1.675	1.495	4.00	186158.52				
1.675	1.505	4.00	179263.76	1.685	1.495	4.00	158579.48				
1.685	1.505	4.00	165474.24	1.695	1.495	4.00	137895.20				
1.695	1.505	4.00	137895.20	1.705	1.495	4.00	0.00				
1.705	1.505	4.00	0								

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (EXTREMO 2)															
X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)
1.355	1.455	4.00	0.00	1.355	1.445	4.00	0.00	1.355	1.435	4.00	0.00	1.405	1.425	4.00	0.00
1.365	1.455	4.00	144789.96	1.365	1.445	4.00	199948.04	1.365	1.435	4.00	234421.84	1.415	1.425	4.00	248211.36
1.375	1.455	4.00	206842.80	1.375	1.445	4.00	262000.88	1.375	1.435	4.00	303369.44	1.425	1.425	4.00	227527.08
1.385	1.455	4.00	289579.92	1.385	1.445	4.00	351632.76	1.385	1.435	4.00	406790.84	1.435	1.425	4.00	262000.88
1.395	1.455	4.00	344738.00	1.395	1.445	4.00	420580.36	1.395	1.435	4.00	475738.44	1.445	1.425	4.00	310264.20
1.405	1.455	4.00	386106.56	1.405	1.445	4.00	468843.68	1.405	1.435	4.00	475738.44	1.455	1.425	4.00	358527.52
1.415	1.455	4.00	434369.88	1.415	1.445	4.00	510212.24	1.415	1.435	4.00	448159.40	1.465	1.425	4.00	386106.56
1.425	1.455	4.00	461948.92	1.425	1.445	4.00	544686.04	1.425	1.435	4.00	455054.16	1.475	1.425	4.00	406790.84
1.435	1.455	4.00	461948.92	1.435	1.445	4.00	551580.80	1.435	1.435	4.00	468843.68	1.485	1.425	4.00	448159.40
1.445	1.455	4.00	468843.68	1.445	1.445	4.00	558475.56	1.445	1.435	4.00	496422.72	1.495	1.425	4.00	510212.24
1.455	1.455	4.00	468843.68	1.455	1.445	4.00	565370.32	1.455	1.435	4.00	517107.00	1.505	1.425	4.00	558475.56
1.465	1.455	4.00	448159.40	1.465	1.445	4.00	558475.56	1.465	1.435	4.00	524001.76	1.515	1.425	4.00	599844.12
1.475	1.455	4.00	441264.64	1.475	1.445	4.00	558475.56	1.475	1.435	4.00	524001.76	1.525	1.425	4.00	648107.44
1.485	1.455	4.00	468843.68	1.485	1.445	4.00	579159.84	1.485	1.435	4.00	558475.56	1.535	1.425	4.00	661896.96
1.495	1.455	4.00	475738.44	1.495	1.445	4.00	592949.36	1.495	1.435	4.00	592949.36	1.545	1.425	4.00	655002.20
1.505	1.455	4.00	455054.16	1.505	1.445	4.00	579159.84	1.505	1.435	4.00	599844.12	1.555	1.425	4.00	655002.20
1.515	1.455	4.00	455054.16	1.515	1.445	4.00	579159.84	1.515	1.435	4.00	620528.40	1.565	1.425	4.00	648107.44
1.525	1.455	4.00	461948.92	1.525	1.445	4.00	599844.12	1.525	1.435	4.00	655002.20	1.575	1.425	4.00	634317.92
1.535	1.455	4.00	455054.16	1.535	1.445	4.00	592949.36	1.535	1.435	4.00	668791.72	1.585	1.425	4.00	627423.16
1.545	1.455	4.00	434369.88	1.545	1.445	4.00	572265.08	1.545	1.435	4.00	641212.68	1.595	1.425	4.00	620528.40
1.555	1.455	4.00	399896.08	1.555	1.445	4.00	544686.04	1.555	1.435	4.00	620528.40	1.605	1.425	4.00	592949.36
1.565	1.455	4.00	365422.28	1.565	1.445	4.00	517107.00	1.565	1.435	4.00	599844.12	1.615	1.425	4.00	565370.32
1.575	1.455	4.00	351632.76	1.575	1.445	4.00	496422.72	1.575	1.435	4.00	579159.84	1.625	1.425	4.00	544686.04
1.585	1.455	4.00	365422.28	1.585	1.445	4.00	482633.20	1.585	1.435	4.00	558475.56	1.635	1.425	4.00	544686.04
1.595	1.455	4.00	372317.04	1.595	1.445	4.00	475738.44	1.595	1.435	4.00	558475.56	1.645	1.425	4.00	544686.04
1.605	1.455	4.00	365422.28	1.605	1.445	4.00	475738.44	1.605	1.435	4.00	544686.04	1.655	1.425	4.00	489527.96
1.615	1.455	4.00	386106.56	1.615	1.445	4.00	455054.16	1.615	1.435	4.00	517107.00	1.665	1.425	4.00	393001.32
1.625	1.455	4.00	399896.08	1.625	1.445	4.00	434369.88	1.625	1.435	4.00	489527.96	1.675	1.425	4.00	289579.92
1.635	1.455	4.00	386106.56	1.635	1.445	4.00	420580.36	1.635	1.435	4.00	482633.20	1.685	1.425	4.00	213737.56
1.645	1.455	4.00	372317.04	1.645	1.445	4.00	406790.84	1.645	1.435	4.00	468843.68	1.695	1.425	4.00	0.00
1.655	1.455	4.00	344738.00	1.655	1.445	4.00	365422.28	1.655	1.435	4.00	420580.36				
1.665	1.455	4.00	262000.88	1.665	1.445	4.00	296474.68	1.665	1.435	4.00	344738.00				
1.675	1.455	4.00	179263.76	1.675	1.445	4.00	220632.32	1.675	1.435	4.00	262000.88				
1.685	1.455	4.00	144789.96	1.685	1.445	4.00	172369.00	1.685	1.435	4.00	199948.04				
1.695	1.455	4.00	0.00	1.695	1.445	4.00	0.00	1.695	1.435	4.00	0.00				

EVALUACIÓN DEL APORTE MECÁNICO DE UN GEOSINTÉTICO COMO MATERIAL DE REFUERZO EN LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES, ANTE DISTINTAS CONFIGURACIONES DE CARGAS REALES

Apéndice E: Tablas de coordenadas y valores de presión para configuración de carga 61,7 kN con 100 psi de presión en los neumáticos.

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (EXTREMO 1)															
X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)
1.365	1.645	4.00	0.00	1.365	1.635	4.00	0.00	1.365	1.625	4.00	0.00	1.365	1.615	4.00	0.00
1.375	1.645	4.00	199948.04	1.375	1.635	4.00	193053.28	1.375	1.625	4.00	158579.48	1.375	1.615	4.00	110316.16
1.385	1.645	4.00	303369.44	1.385	1.635	4.00	282685.16	1.385	1.625	4.00	241316.60	1.385	1.615	4.00	193053.28
1.395	1.645	4.00	441264.64	1.395	1.635	4.00	393001.32	1.395	1.625	4.00	337843.24	1.395	1.615	4.00	303369.44
1.405	1.645	4.00	558475.56	1.405	1.635	4.00	482633.20	1.405	1.625	4.00	406790.84	1.405	1.615	4.00	372317.04
1.415	1.645	4.00	627423.16	1.415	1.635	4.00	544686.04	1.415	1.625	4.00	461948.92	1.415	1.615	4.00	413685.60
1.425	1.645	4.00	648107.44	1.425	1.635	4.00	579159.84	1.425	1.625	4.00	510212.24	1.425	1.615	4.00	475738.44
1.435	1.645	4.00	661896.96	1.435	1.635	4.00	599844.12	1.435	1.625	4.00	530896.52	1.435	1.615	4.00	489527.96
1.445	1.645	4.00	675686.48	1.445	1.635	4.00	606738.88	1.445	1.625	4.00	530896.52	1.445	1.615	4.00	475738.44
1.455	1.645	4.00	689476.00	1.455	1.635	4.00	606738.88	1.455	1.625	4.00	530896.52	1.455	1.615	4.00	496422.72
1.465	1.645	4.00	710160.28	1.465	1.635	4.00	620528.40	1.465	1.625	4.00	524001.76	1.465	1.615	4.00	475738.44
1.475	1.645	4.00	730844.56	1.475	1.635	4.00	634317.92	1.475	1.625	4.00	524001.76	1.475	1.615	4.00	448159.40
1.485	1.645	4.00	717055.04	1.485	1.635	4.00	627423.16	1.485	1.625	4.00	537791.28	1.485	1.615	4.00	482633.20
1.495	1.645	4.00	675686.48	1.495	1.635	4.00	613633.64	1.495	1.625	4.00	544686.04	1.495	1.615	4.00	510212.24
1.505	1.645	4.00	668791.72	1.505	1.635	4.00	613633.64	1.505	1.625	4.00	551580.80	1.505	1.615	4.00	517107.00
1.515	1.645	4.00	675686.48	1.515	1.635	4.00	620528.40	1.515	1.625	4.00	565370.32	1.515	1.615	4.00	537791.28
1.525	1.645	4.00	682581.24	1.525	1.635	4.00	613633.64	1.525	1.625	4.00	558475.56	1.525	1.615	4.00	537791.28
1.535	1.645	4.00	655002.20	1.535	1.635	4.00	586054.60	1.535	1.625	4.00	530896.52	1.535	1.615	4.00	517107.00
1.545	1.645	4.00	634317.92	1.545	1.635	4.00	565370.32	1.545	1.625	4.00	510212.24	1.545	1.615	4.00	489527.96
1.555	1.645	4.00	613633.64	1.555	1.635	4.00	558475.56	1.555	1.625	4.00	510212.24	1.555	1.615	4.00	448159.40
1.565	1.645	4.00	572265.08	1.565	1.635	4.00	544686.04	1.565	1.625	4.00	510212.24	1.565	1.615	4.00	420580.36
1.575	1.645	4.00	558475.56	1.575	1.635	4.00	537791.28	1.575	1.625	4.00	503317.48	1.575	1.615	4.00	420580.36
1.585	1.645	4.00	565370.32	1.585	1.635	4.00	537791.28	1.585	1.625	4.00	510212.24	1.585	1.615	4.00	406790.84
1.595	1.645	4.00	544686.04	1.595	1.635	4.00	517107.00	1.595	1.625	4.00	482633.20	1.595	1.615	4.00	365422.28
1.605	1.645	4.00	489527.96	1.605	1.635	4.00	475738.44	1.605	1.625	4.00	441264.64	1.605	1.615	4.00	317158.96
1.615	1.645	4.00	434369.88	1.615	1.635	4.00	441264.64	1.615	1.625	4.00	427475.12	1.615	1.615	4.00	330948.48
1.625	1.645	4.00	386106.56	1.625	1.635	4.00	420580.36	1.625	1.625	4.00	420580.36	1.625	1.615	4.00	344738.00
1.635	1.645	4.00	337843.24	1.635	1.635	4.00	386106.56	1.635	1.625	4.00	399896.08	1.635	1.615	4.00	330948.48
1.645	1.645	4.00	282685.16	1.645	1.635	4.00	344738.00	1.645	1.625	4.00	372317.04	1.645	1.615	4.00	296474.68
1.655	1.645	4.00	241316.60	1.655	1.635	4.00	303369.44	1.655	1.625	4.00	317158.96	1.655	1.615	4.00	248211.36
1.665	1.645	4.00	186158.52	1.665	1.635	4.00	241316.60	1.665	1.625	4.00	241316.60	1.665	1.615	4.00	186158.52
1.675	1.645	4.00	144789.96	1.675	1.635	4.00	186158.52	1.675	1.625	4.00	186158.52	1.675	1.615	4.00	151684.72
1.685	1.645	4.00	0.00	1.685	1.635	4.00	0.00	1.685	1.625	4.00	0.00	1.685	1.615	4.00	0.00

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (INTERMEDIO 1)											
X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)
1.365	1.595	4.00	0.00	1.365	1.585	4.00	0.00	1.355	1.575	4.00	0.00
1.375	1.595	4.00	158579.48	1.375	1.585	4.00	165474.24	1.365	1.575	4.00	75842.36
1.385	1.595	4.00	220632.32	1.385	1.585	4.00	255106.12	1.375	1.575	4.00	172369.00
1.395	1.595	4.00	296474.68	1.395	1.585	4.00	344738.00	1.385	1.575	4.00	289579.92
1.405	1.595	4.00	351632.76	1.405	1.585	4.00	393001.32	1.395	1.575	4.00	351632.76
1.415	1.595	4.00	351632.76	1.415	1.585	4.00	406790.84	1.405	1.575	4.00	372317.04
1.425	1.595	4.00	365422.28	1.425	1.585	4.00	441264.64	1.415	1.575	4.00	406790.84
1.435	1.595	4.00	413685.60	1.435	1.585	4.00	461948.92	1.425	1.575	4.00	413685.60
1.445	1.595	4.00	413685.60	1.445	1.585	4.00	448159.40	1.435	1.575	4.00	393001.32
1.455	1.595	4.00	365422.28	1.455	1.585	4.00	386106.56	1.445	1.575	4.00	372317.04
1.465	1.595	4.00	351632.76	1.465	1.585	4.00	365422.28	1.455	1.575	4.00	337843.24
1.475	1.595	4.00	399896.08	1.475	1.585	4.00	434369.88	1.465	1.575	4.00	330948.48
1.485	1.595	4.00	413685.60	1.485	1.585	4.00	461948.92	1.475	1.575	4.00	386106.56
1.495	1.595	4.00	386106.56	1.495	1.585	4.00	434369.88	1.485	1.575	4.00	406790.84
1.505	1.595	4.00	406790.84	1.505	1.585	4.00	455054.16	1.495	1.575	4.00	399896.08
1.515	1.595	4.00	434369.88	1.515	1.585	4.00	503317.48	1.505	1.575	4.00	413685.60
1.525	1.595	4.00	427475.12	1.525	1.585	4.00	496422.72	1.515	1.575	4.00	455054.16
1.535	1.595	4.00	406790.84	1.535	1.585	4.00	461948.92	1.525	1.575	4.00	455054.16
1.545	1.595	4.00	351632.76	1.545	1.585	4.00	427475.12	1.535	1.575	4.00	427475.12
1.555	1.595	4.00	275790.40	1.555	1.585	4.00	413685.60	1.545	1.575	4.00	413685.60
1.565	1.595	4.00	282685.16	1.565	1.585	4.00	413685.60	1.555	1.575	4.00	406790.84
1.575	1.595	4.00	317158.96	1.575	1.585	4.00	427475.12	1.565	1.575	4.00	393001.32
1.585	1.595	4.00	289579.92	1.585	1.585	4.00	379211.80	1.575	1.575	4.00	399896.08
1.595	1.595	4.00	255106.12	1.595	1.585	4.00	330948.48	1.585	1.575	4.00	358527.52
1.605	1.595	4.00	255106.12	1.605	1.585	4.00	365422.28	1.595	1.575	4.00	317158.96
1.615	1.595	4.00	248211.36	1.615	1.585	4.00	379211.80	1.605	1.575	4.00	372317.04
1.625	1.595	4.00	241316.60	1.625	1.585	4.00	344738.00	1.615	1.575	4.00	399896.08
1.635	1.595	4.00	234421.84	1.635	1.585	4.00	351632.76	1.625	1.575	4.00	379211.80
1.645	1.595	4.00	213737.56	1.645	1.585	4.00	337843.24	1.635	1.575	4.00	379211.80
1.655	1.595	4.00	172369.00	1.655	1.585	4.00	282685.16	1.645	1.575	4.00	372317.04
1.665	1.595	4.00	144789.96	1.665	1.585	4.00	227527.08	1.655	1.575	4.00	324053.72
1.675	1.595	4.00	0.00	1.675	1.585	4.00	186158.52	1.665	1.575	4.00	248211.36
				1.685	1.585	4.00	0.00	1.675	1.575	4.00	193053.28
								1.685	1.575	4.00	0.00

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (CENTRO)															
X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)
1.365	1.555	4.00	0.00	1.355	1.545	4.00	0.00	1.355	1.535	4.00	0.00	1.365	1.525	4.00	0.00
1.375	1.555	4.00	206842.80	1.365	1.545	4.00	165474.24	1.365	1.535	4.00	137895.20	1.375	1.525	4.00	124105.68
1.385	1.555	4.00	268895.64	1.375	1.545	4.00	241316.60	1.375	1.535	4.00	213737.56	1.385	1.525	4.00	165474.24
1.395	1.555	4.00	330948.48	1.385	1.545	4.00	337843.24	1.385	1.535	4.00	289579.92	1.395	1.525	4.00	241316.60
1.405	1.555	4.00	358527.52	1.395	1.545	4.00	420580.36	1.395	1.535	4.00	365422.28	1.405	1.525	4.00	296474.68
1.415	1.555	4.00	386106.56	1.405	1.545	4.00	489527.96	1.405	1.535	4.00	434369.88	1.415	1.525	4.00	317158.96
1.425	1.555	4.00	393001.32	1.415	1.545	4.00	524001.76	1.415	1.535	4.00	475738.44	1.425	1.525	4.00	344738.00
1.435	1.555	4.00	406790.84	1.425	1.545	4.00	551580.80	1.425	1.535	4.00	510212.24	1.435	1.525	4.00	358527.52
1.445	1.555	4.00	413685.60	1.435	1.545	4.00	579159.84	1.435	1.535	4.00	524001.76	1.445	1.525	4.00	344738.00
1.455	1.555	4.00	413685.60	1.445	1.545	4.00	586054.60	1.445	1.535	4.00	517107.00	1.455	1.525	4.00	317158.96
1.465	1.555	4.00	434369.88	1.455	1.545	4.00	558475.56	1.455	1.535	4.00	496422.72	1.465	1.525	4.00	344738.00
1.475	1.555	4.00	420580.36	1.465	1.545	4.00	551580.80	1.465	1.535	4.00	517107.00	1.475	1.525	4.00	358527.52
1.485	1.555	4.00	379211.80	1.475	1.545	4.00	551580.80	1.475	1.535	4.00	551580.80	1.485	1.525	4.00	365422.28
1.495	1.555	4.00	358527.52	1.485	1.545	4.00	544686.04	1.485	1.535	4.00	530896.52	1.495	1.525	4.00	330948.48
1.505	1.555	4.00	379211.80	1.495	1.545	4.00	530896.52	1.495	1.535	4.00	510212.24	1.505	1.525	4.00	365422.28
1.515	1.555	4.00	386106.56	1.505	1.545	4.00	565370.32	1.505	1.535	4.00	544686.04	1.515	1.525	4.00	441264.64
1.525	1.555	4.00	393001.32	1.515	1.545	4.00	606738.88	1.515	1.535	4.00	592949.36	1.525	1.525	4.00	461948.92
1.535	1.555	4.00	386106.56	1.525	1.545	4.00	599844.12	1.525	1.535	4.00	599844.12	1.535	1.525	4.00	406790.84
1.545	1.555	4.00	372317.04	1.535	1.545	4.00	572265.08	1.535	1.535	4.00	579159.84	1.545	1.525	4.00	379211.80
1.555	1.555	4.00	358527.52	1.545	1.545	4.00	544686.04	1.545	1.535	4.00	551580.80	1.555	1.525	4.00	344738.00
1.565	1.555	4.00	337843.24	1.555	1.545	4.00	510212.24	1.555	1.535	4.00	517107.00	1.565	1.525	4.00	310264.20
1.575	1.555	4.00	337843.24	1.565	1.545	4.00	489527.96	1.565	1.535	4.00	482633.20	1.575	1.525	4.00	317158.96
1.585	1.555	4.00	358527.52	1.575	1.545	4.00	496422.72	1.575	1.535	4.00	489527.96	1.585	1.525	4.00	337843.24
1.595	1.555	4.00	344738.00	1.585	1.545	4.00	524001.76	1.585	1.535	4.00	524001.76	1.595	1.525	4.00	365422.28
1.605	1.555	4.00	324053.72	1.595	1.545	4.00	524001.76	1.595	1.535	4.00	544686.04	1.605	1.525	4.00	351632.76
1.615	1.555	4.00	330948.48	1.605	1.545	4.00	489527.96	1.605	1.535	4.00	524001.76	1.615	1.525	4.00	324053.72
1.625	1.555	4.00	337843.24	1.615	1.545	4.00	475738.44	1.615	1.535	4.00	489527.96	1.625	1.525	4.00	317158.96
1.635	1.555	4.00	344738.00	1.625	1.545	4.00	468843.68	1.625	1.535	4.00	468843.68	1.635	1.525	4.00	317158.96
1.645	1.555	4.00	296474.68	1.635	1.545	4.00	448159.40	1.635	1.535	4.00	455054.16	1.645	1.525	4.00	324053.72
1.655	1.555	4.00	241316.60	1.645	1.545	4.00	413685.60	1.645	1.535	4.00	427475.12	1.655	1.525	4.00	324053.72
1.665	1.555	4.00	172369.00	1.655	1.545	4.00	351632.76	1.655	1.535	4.00	386106.56	1.665	1.525	4.00	275790.40
1.675	1.555	4.00	131000.44	1.665	1.545	4.00	282685.16	1.665	1.535	4.00	317158.96	1.675	1.525	4.00	206842.80
1.685	1.555	4.00	0.00	1.675	1.545	4.00	206842.80	1.675	1.535	4.00	234421.84	1.685	1.525	4.00	0.00
				1.685	1.545	4.00	151684.72	1.685	1.535	4.00	172369.00				
				1.695	1.545	4.00	0.00	1.695	1.535	4.00	0.00				

EVALUACIÓN DEL APORTE MECÁNICO DE UN GEOSINTÉTICO COMO MATERIAL DE REFUERZO EN LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES, ANTE DISTINTAS CONFIGURACIONES DE CARGAS REALES

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (INTERMEDIO 2)											
X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)
1.355	1.505	4.00	0.00	1.365	1.495	4.00	0.00	1.365	1.485	4.00	0.00
1.365	1.505	4.00	82737.12	1.375	1.495	4.00	158579.48	1.375	1.485	4.00	96526.64
1.375	1.505	4.00	179263.76	1.385	1.495	4.00	186158.52	1.385	1.485	4.00	117210.92
1.385	1.505	4.00	227527.08	1.395	1.495	4.00	227527.08	1.395	1.485	4.00	151684.72
1.395	1.505	4.00	289579.92	1.405	1.495	4.00	324053.72	1.405	1.485	4.00	213737.56
1.405	1.505	4.00	379211.80	1.415	1.495	4.00	399896.08	1.415	1.485	4.00	262000.88
1.415	1.505	4.00	434369.88	1.425	1.495	4.00	434369.88	1.425	1.485	4.00	282685.16
1.425	1.505	4.00	468843.68	1.435	1.495	4.00	441264.64	1.435	1.485	4.00	275790.40
1.435	1.505	4.00	482633.20	1.445	1.495	4.00	420580.36	1.445	1.485	4.00	282685.16
1.445	1.505	4.00	455054.16	1.455	1.495	4.00	413685.60	1.455	1.485	4.00	289579.92
1.455	1.505	4.00	434369.88	1.465	1.495	4.00	427475.12	1.465	1.485	4.00	296474.68
1.465	1.505	4.00	434369.88	1.475	1.495	4.00	434369.88	1.475	1.485	4.00	310264.20
1.475	1.505	4.00	420580.36	1.485	1.495	4.00	420580.36	1.485	1.485	4.00	310264.20
1.485	1.505	4.00	406790.84	1.495	1.495	4.00	434369.88	1.495	1.485	4.00	310264.20
1.495	1.505	4.00	413685.60	1.505	1.495	4.00	461948.92	1.505	1.485	4.00	324053.72
1.505	1.505	4.00	434369.88	1.515	1.495	4.00	441264.64	1.515	1.485	4.00	296474.68
1.515	1.505	4.00	434369.88	1.525	1.495	4.00	399896.08	1.525	1.485	4.00	262000.88
1.525	1.505	4.00	406790.84	1.535	1.495	4.00	413685.60	1.535	1.485	4.00	296474.68
1.535	1.505	4.00	393001.32	1.545	1.495	4.00	448159.40	1.545	1.485	4.00	344738.00
1.545	1.505	4.00	399896.08	1.555	1.495	4.00	434369.88	1.555	1.485	4.00	303369.44
1.555	1.505	4.00	386106.56	1.565	1.495	4.00	420580.36	1.565	1.485	4.00	289579.92
1.565	1.505	4.00	379211.80	1.575	1.495	4.00	427475.12	1.575	1.485	4.00	344738.00
1.575	1.505	4.00	379211.80	1.585	1.495	4.00	441264.64	1.585	1.485	4.00	351632.76
1.585	1.505	4.00	386106.56	1.595	1.495	4.00	441264.64	1.595	1.485	4.00	324053.72
1.595	1.505	4.00	393001.32	1.605	1.495	4.00	393001.32	1.605	1.485	4.00	324053.72
1.605	1.505	4.00	337843.24	1.615	1.495	4.00	337843.24	1.615	1.485	4.00	282685.16
1.615	1.505	4.00	268895.64	1.625	1.495	4.00	365422.28	1.625	1.485	4.00	275790.40
1.625	1.505	4.00	303369.44	1.635	1.495	4.00	393001.32	1.635	1.485	4.00	324053.72
1.635	1.505	4.00	330948.48	1.645	1.495	4.00	351632.76	1.645	1.485	4.00	330948.48
1.645	1.505	4.00	310264.20	1.655	1.495	4.00	275790.40	1.655	1.485	4.00	241316.60
1.655	1.505	4.00	275790.40	1.665	1.495	4.00	193053.28	1.665	1.485	4.00	151684.72
1.665	1.505	4.00	227527.08	1.675	1.495	4.00	151684.72	1.675	1.485	4.00	110316.16
1.675	1.505	4.00	186158.52	1.685	1.495	4.00	0.00	1.685	1.485	4.00	0.00
1.685	1.505	4.00	0.00								

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (EXTREMO 2)															
X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)
1.365	1.465	4.00	0.00	1.365	1.455	4.00	0.00	1.365	1.445	4.00	0.00	1.365	1.435	4.00	0.00
1.375	1.465	4.00	131000.44	1.375	1.455	4.00	165474.24	1.375	1.445	4.00	158579.48	1.375	1.435	4.00	131000.44
1.385	1.465	4.00	193053.28	1.385	1.455	4.00	234421.84	1.385	1.445	4.00	213737.56	1.385	1.435	4.00	193053.28
1.395	1.465	4.00	275790.40	1.395	1.455	4.00	330948.48	1.395	1.445	4.00	303369.44	1.395	1.435	4.00	275790.40
1.405	1.465	4.00	337843.24	1.405	1.455	4.00	406790.84	1.405	1.445	4.00	365422.28	1.405	1.435	4.00	337843.24
1.415	1.465	4.00	372317.04	1.415	1.455	4.00	455054.16	1.415	1.445	4.00	413685.60	1.415	1.435	4.00	372317.04
1.425	1.465	4.00	399896.08	1.425	1.455	4.00	475738.44	1.425	1.445	4.00	448159.40	1.425	1.435	4.00	399896.08
1.435	1.465	4.00	406790.84	1.435	1.455	4.00	496422.72	1.435	1.445	4.00	489527.96	1.435	1.435	4.00	406790.84
1.445	1.465	4.00	413685.60	1.445	1.455	4.00	517107.00	1.445	1.445	4.00	524001.76	1.445	1.435	4.00	413685.60
1.455	1.465	4.00	420580.36	1.455	1.455	4.00	517107.00	1.455	1.445	4.00	530896.52	1.455	1.435	4.00	420580.36
1.465	1.465	4.00	406790.84	1.465	1.455	4.00	517107.00	1.465	1.445	4.00	537791.28	1.465	1.435	4.00	406790.84
1.475	1.465	4.00	393001.32	1.475	1.455	4.00	530896.52	1.475	1.445	4.00	558475.56	1.475	1.435	4.00	393001.32
1.485	1.465	4.00	420580.36	1.485	1.455	4.00	544686.04	1.485	1.445	4.00	572265.08	1.485	1.435	4.00	420580.36
1.495	1.465	4.00	434369.88	1.495	1.455	4.00	551580.80	1.495	1.445	4.00	579159.84	1.495	1.435	4.00	434369.88
1.505	1.465	4.00	420580.36	1.505	1.455	4.00	558475.56	1.505	1.445	4.00	599844.12	1.505	1.435	4.00	420580.36
1.515	1.465	4.00	420580.36	1.515	1.455	4.00	572265.08	1.515	1.445	4.00	641212.68	1.515	1.435	4.00	420580.36
1.525	1.465	4.00	427475.12	1.525	1.455	4.00	579159.84	1.525	1.445	4.00	648107.44	1.525	1.435	4.00	427475.12
1.535	1.465	4.00	448159.40	1.535	1.455	4.00	558475.56	1.535	1.445	4.00	627423.16	1.535	1.435	4.00	448159.40
1.545	1.465	4.00	441264.64	1.545	1.455	4.00	530896.52	1.545	1.445	4.00	586054.60	1.545	1.435	4.00	441264.64
1.555	1.465	4.00	393001.32	1.555	1.455	4.00	503317.48	1.555	1.445	4.00	551580.80	1.555	1.435	4.00	393001.32
1.565	1.465	4.00	379211.80	1.565	1.455	4.00	482633.20	1.565	1.445	4.00	530896.52	1.565	1.435	4.00	379211.80
1.575	1.465	4.00	427475.12	1.575	1.455	4.00	475738.44	1.575	1.445	4.00	530896.52	1.575	1.435	4.00	427475.12
1.585	1.465	4.00	420580.36	1.585	1.455	4.00	482633.20	1.585	1.445	4.00	544686.04	1.585	1.435	4.00	420580.36
1.595	1.465	4.00	365422.28	1.595	1.455	4.00	468843.68	1.595	1.445	4.00	544686.04	1.595	1.435	4.00	365422.28
1.605	1.465	4.00	317158.96	1.605	1.455	4.00	434369.88	1.605	1.445	4.00	510212.24	1.605	1.435	4.00	317158.96
1.615	1.465	4.00	289579.92	1.615	1.455	4.00	406790.84	1.615	1.445	4.00	461948.92	1.615	1.435	4.00	289579.92
1.625	1.465	4.00	303369.44	1.625	1.455	4.00	399896.08	1.625	1.445	4.00	441264.64	1.625	1.435	4.00	303369.44
1.635	1.465	4.00	330948.48	1.635	1.455	4.00	379211.80	1.635	1.445	4.00	413685.60	1.635	1.435	4.00	330948.48
1.645	1.465	4.00	317158.96	1.645	1.455	4.00	330948.48	1.645	1.445	4.00	365422.28	1.645	1.435	4.00	317158.96
1.655	1.465	4.00	248211.36	1.655	1.455	4.00	262000.88	1.655	1.445	4.00	296474.68	1.655	1.435	4.00	248211.36
1.665	1.465	4.00	193053.28	1.665	1.455	4.00	199948.04	1.665	1.445	4.00	206842.80	1.665	1.435	4.00	193053.28
1.675	1.465	4.00	0.00	1.675	1.455	4.00	0.00	1.675	1.445	4.00	117210.92	1.675	1.435	4.00	0.00
								1.685	1.445	4.00	0.00				

Apéndice F: Tablas de coordenadas y valores de presión para configuración de carga 61,7 kN con 115 psi de presión en los neumáticos

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (EXTREMO 1)															
X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)
1.365	1.645	4.00	0.00	1.365	1.635	4.00	0.00	1.365	1.625	4.00	0.00	1.365	1.615	4.00	0.00
1.375	1.645	4.00	262000.88	1.375	1.635	4.00	248211.36	1.375	1.625	4.00	213737.56	1.375	1.615	4.00	172369.00
1.385	1.645	4.00	358527.52	1.385	1.635	4.00	330948.48	1.385	1.625	4.00	296474.68	1.385	1.615	4.00	275790.40
1.395	1.645	4.00	475738.44	1.395	1.635	4.00	427475.12	1.395	1.625	4.00	379211.80	1.395	1.615	4.00	351632.76
1.405	1.645	4.00	544686.04	1.405	1.635	4.00	496422.72	1.405	1.625	4.00	448159.40	1.405	1.615	4.00	420580.36
1.415	1.645	4.00	592949.36	1.415	1.635	4.00	551580.80	1.415	1.625	4.00	517107.00	1.415	1.615	4.00	496422.72
1.425	1.645	4.00	627423.16	1.425	1.635	4.00	586054.60	1.425	1.625	4.00	551580.80	1.425	1.615	4.00	524001.76
1.435	1.645	4.00	641212.68	1.435	1.635	4.00	599844.12	1.435	1.625	4.00	551580.80	1.435	1.615	4.00	517107.00
1.445	1.645	4.00	655002.20	1.445	1.635	4.00	606738.88	1.445	1.625	4.00	558475.56	1.445	1.615	4.00	537791.28
1.455	1.645	4.00	682581.24	1.455	1.635	4.00	613633.64	1.455	1.625	4.00	551580.80	1.455	1.615	4.00	510212.24
1.465	1.645	4.00	703265.52	1.465	1.635	4.00	634317.92	1.465	1.625	4.00	551580.80	1.465	1.615	4.00	489527.96
1.475	1.645	4.00	689476.00	1.475	1.635	4.00	634317.92	1.475	1.625	4.00	572265.08	1.475	1.615	4.00	537791.28
1.485	1.645	4.00	661896.96	1.485	1.635	4.00	620528.40	1.485	1.625	4.00	579159.84	1.485	1.615	4.00	565370.32
1.495	1.645	4.00	655002.20	1.495	1.635	4.00	627423.16	1.495	1.625	4.00	592949.36	1.495	1.615	4.00	572265.08
1.505	1.645	4.00	668791.72	1.505	1.635	4.00	634317.92	1.505	1.625	4.00	606738.88	1.505	1.615	4.00	592949.36
1.515	1.645	4.00	668791.72	1.515	1.635	4.00	620528.40	1.515	1.625	4.00	592949.36	1.515	1.615	4.00	592949.36
1.525	1.645	4.00	634317.92	1.525	1.635	4.00	592949.36	1.525	1.625	4.00	565370.32	1.525	1.615	4.00	565370.32
1.535	1.645	4.00	627423.16	1.535	1.635	4.00	579159.84	1.535	1.625	4.00	544686.04	1.535	1.615	4.00	537791.28
1.545	1.645	4.00	627423.16	1.545	1.635	4.00	586054.60	1.545	1.625	4.00	551580.80	1.545	1.615	4.00	544686.04
1.555	1.645	4.00	599844.12	1.555	1.635	4.00	565370.32	1.555	1.625	4.00	537791.28	1.555	1.615	4.00	530896.52
1.565	1.645	4.00	599844.12	1.565	1.635	4.00	558475.56	1.565	1.625	4.00	524001.76	1.565	1.615	4.00	510212.24
1.575	1.645	4.00	613633.64	1.575	1.635	4.00	565370.32	1.575	1.625	4.00	530896.52	1.575	1.615	4.00	517107.00
1.585	1.645	4.00	606738.88	1.585	1.635	4.00	551580.80	1.585	1.625	4.00	510212.24	1.585	1.615	4.00	489527.96
1.595	1.645	4.00	565370.32	1.595	1.635	4.00	510212.24	1.595	1.625	4.00	461948.92	1.595	1.615	4.00	427475.12
1.605	1.645	4.00	517107.00	1.605	1.635	4.00	482633.20	1.605	1.625	4.00	455054.16	1.605	1.615	4.00	399896.08
1.615	1.645	4.00	461948.92	1.615	1.635	4.00	448159.40	1.615	1.625	4.00	434369.88	1.615	1.615	4.00	344738.00
1.625	1.645	4.00	399896.08	1.625	1.635	4.00	406790.84	1.625	1.625	4.00	399896.08	1.625	1.615	4.00	303369.44
1.635	1.645	4.00	337843.24	1.635	1.635	4.00	358527.52	1.635	1.625	4.00	358527.52	1.635	1.615	4.00	282685.16
1.645	1.645	4.00	275790.40	1.645	1.635	4.00	303369.44	1.645	1.625	4.00	310264.20	1.645	1.615	4.00	234421.84
1.655	1.645	4.00	199948.04	1.655	1.635	4.00	227527.08	1.655	1.625	4.00	234421.84	1.655	1.615	4.00	172369.00
1.665	1.645	4.00	144789.96	1.665	1.635	4.00	172369.00	1.665	1.625	4.00	172369.00	1.665	1.615	4.00	137895.20
1.675	1.645	4.00	0.00	1.675	1.635	4.00	0.00	1.675	1.625	4.00	0.00	1.675	1.615	4.00	0.00

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (INTERMEDIO 1)											
X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)
1.355	1.595	4.00	0.00	1.355	1.585	4.00	0.00	1.355	1.575	4.00	0.00
1.365	1.595	4.00	89631.88	1.365	1.585	4.00	110316.16	1.365	1.575	4.00	117210.92
1.375	1.595	4.00	179263.76	1.375	1.585	4.00	213737.56	1.375	1.575	4.00	241316.60
1.385	1.595	4.00	282685.16	1.385	1.585	4.00	324053.72	1.385	1.575	4.00	351632.76
1.395	1.595	4.00	365422.28	1.395	1.585	4.00	399896.08	1.395	1.575	4.00	441264.64
1.405	1.595	4.00	399896.08	1.405	1.585	4.00	455054.16	1.405	1.575	4.00	517107.00
1.415	1.595	4.00	427475.12	1.415	1.585	4.00	496422.72	1.415	1.575	4.00	558475.56
1.425	1.595	4.00	475738.44	1.425	1.585	4.00	524001.76	1.425	1.575	4.00	565370.32
1.435	1.595	4.00	468843.68	1.435	1.585	4.00	510212.24	1.435	1.575	4.00	537791.28
1.445	1.595	4.00	427475.12	1.445	1.585	4.00	455054.16	1.445	1.575	4.00	468843.68
1.455	1.595	4.00	406790.84	1.455	1.585	4.00	427475.12	1.455	1.575	4.00	434369.88
1.465	1.595	4.00	448159.40	1.465	1.585	4.00	489527.96	1.465	1.575	4.00	517107.00
1.475	1.595	4.00	468843.68	1.475	1.585	4.00	530896.52	1.475	1.575	4.00	579159.84
1.485	1.595	4.00	461948.92	1.485	1.585	4.00	510212.24	1.485	1.575	4.00	530896.52
1.495	1.595	4.00	482633.20	1.495	1.585	4.00	530896.52	1.495	1.575	4.00	489527.96
1.505	1.595	4.00	524001.76	1.505	1.585	4.00	586054.60	1.505	1.575	4.00	496422.72
1.515	1.595	4.00	524001.76	1.515	1.585	4.00	592949.36	1.515	1.575	4.00	489527.96
1.525	1.595	4.00	503317.48	1.525	1.585	4.00	551580.80	1.525	1.575	4.00	461948.92
1.535	1.595	4.00	434369.88	1.535	1.585	4.00	496422.72	1.535	1.575	4.00	455054.16
1.545	1.595	4.00	379211.80	1.545	1.585	4.00	468843.68	1.545	1.575	4.00	468843.68
1.555	1.595	4.00	413685.60	1.555	1.585	4.00	489527.96	1.555	1.575	4.00	448159.40
1.565	1.595	4.00	455054.16	1.565	1.585	4.00	510212.24	1.565	1.575	4.00	434369.88
1.575	1.595	4.00	434369.88	1.575	1.585	4.00	455054.16	1.575	1.575	4.00	393001.32
1.585	1.595	4.00	413685.60	1.585	1.585	4.00	413685.60	1.585	1.575	4.00	358527.52
1.595	1.595	4.00	420580.36	1.595	1.585	4.00	448159.40	1.595	1.575	4.00	393001.32
1.605	1.595	4.00	365422.28	1.605	1.585	4.00	448159.40	1.605	1.575	4.00	413685.60
1.615	1.595	4.00	296474.68	1.615	1.585	4.00	420580.36	1.615	1.575	4.00	399896.08
1.625	1.595	4.00	262000.88	1.625	1.585	4.00	406790.84	1.625	1.575	4.00	393001.32
1.635	1.595	4.00	234421.84	1.635	1.585	4.00	379211.80	1.635	1.575	4.00	379211.80
1.645	1.595	4.00	206842.80	1.645	1.585	4.00	330948.48	1.645	1.575	4.00	324053.72
1.655	1.595	4.00	179263.76	1.655	1.585	4.00	262000.88	1.655	1.575	4.00	248211.36
1.665	1.595	4.00	0.00	1.665	1.585	4.00	213737.56	1.665	1.575	4.00	193053.28
				1.675	1.585	4.00	0.00	1.675	1.575	4.00	0.00

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (CENTRO)

X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)
1.355	1.555	4.00	0.00	1.355	1.545	4.00	0.00	1.355	1.535	4.00	0.00	1.365	1.535	4.00	0.00
1.365	1.555	4.00	144789.96	1.365	1.545	4.00	199948.04	1.365	1.535	4.00	199948.04	1.375	1.535	4.00	131000.44
1.375	1.555	4.00	241316.60	1.375	1.545	4.00	289579.92	1.375	1.535	4.00	248211.36	1.385	1.535	4.00	172369.00
1.385	1.555	4.00	372317.04	1.385	1.545	4.00	406790.84	1.385	1.535	4.00	317158.96	1.395	1.535	4.00	248211.36
1.395	1.555	4.00	461948.92	1.395	1.545	4.00	496422.72	1.395	1.535	4.00	406790.84	1.405	1.535	4.00	317158.96
1.405	1.555	4.00	524001.76	1.405	1.545	4.00	565370.32	1.405	1.535	4.00	468843.68	1.415	1.535	4.00	351632.76
1.415	1.555	4.00	579159.84	1.415	1.545	4.00	613633.64	1.415	1.535	4.00	517107.00	1.425	1.535	4.00	372317.04
1.425	1.555	4.00	648107.44	1.425	1.545	4.00	655002.20	1.425	1.535	4.00	544686.04	1.435	1.535	4.00	372317.04
1.435	1.555	4.00	661896.96	1.435	1.545	4.00	668791.72	1.435	1.535	4.00	551580.80	1.445	1.535	4.00	365422.28
1.445	1.555	4.00	641212.68	1.445	1.545	4.00	661896.96	1.445	1.535	4.00	544686.04	1.455	1.535	4.00	399896.08
1.455	1.555	4.00	641212.68	1.455	1.545	4.00	655002.20	1.455	1.535	4.00	572265.08	1.465	1.535	4.00	406790.84
1.465	1.555	4.00	641212.68	1.465	1.545	4.00	655002.20	1.465	1.535	4.00	606738.88	1.475	1.535	4.00	406790.84
1.475	1.555	4.00	599844.12	1.475	1.545	4.00	641212.68	1.475	1.535	4.00	579159.84	1.485	1.535	4.00	372317.04
1.485	1.555	4.00	530896.52	1.485	1.545	4.00	634317.92	1.485	1.535	4.00	558475.56	1.495	1.535	4.00	406790.84
1.495	1.555	4.00	434369.88	1.495	1.545	4.00	627423.16	1.495	1.535	4.00	586054.60	1.505	1.535	4.00	468843.68
1.505	1.555	4.00	379211.80	1.505	1.545	4.00	634317.92	1.505	1.535	4.00	641212.68	1.515	1.535	4.00	489527.96
1.515	1.555	4.00	434369.88	1.515	1.545	4.00	675686.48	1.515	1.535	4.00	655002.20	1.525	1.535	4.00	448159.40
1.525	1.555	4.00	482633.20	1.525	1.545	4.00	682581.24	1.525	1.535	4.00	627423.16	1.535	1.535	4.00	420580.36
1.535	1.555	4.00	489527.96	1.535	1.545	4.00	641212.68	1.535	1.535	4.00	592949.36	1.545	1.535	4.00	372317.04
1.545	1.555	4.00	496422.72	1.545	1.545	4.00	606738.88	1.545	1.535	4.00	551580.80	1.555	1.535	4.00	344738.00
1.555	1.555	4.00	441264.64	1.555	1.545	4.00	579159.84	1.555	1.535	4.00	524001.76	1.565	1.535	4.00	351632.76
1.565	1.555	4.00	413685.60	1.565	1.545	4.00	592949.36	1.565	1.535	4.00	537791.28	1.575	1.535	4.00	372317.04
1.575	1.555	4.00	434369.88	1.575	1.545	4.00	620528.40	1.575	1.535	4.00	572265.08	1.585	1.535	4.00	406790.84
1.585	1.555	4.00	406790.84	1.585	1.545	4.00	613633.64	1.585	1.535	4.00	592949.36	1.595	1.535	4.00	406790.84
1.595	1.555	4.00	365422.28	1.595	1.545	4.00	565370.32	1.595	1.535	4.00	579159.84	1.605	1.535	4.00	365422.28
1.605	1.555	4.00	351632.76	1.605	1.545	4.00	524001.76	1.605	1.535	4.00	530896.52	1.615	1.535	4.00	344738.00
1.615	1.555	4.00	337843.24	1.615	1.545	4.00	489527.96	1.615	1.535	4.00	496422.72	1.625	1.535	4.00	330948.48
1.625	1.555	4.00	324053.72	1.625	1.545	4.00	468843.68	1.625	1.535	4.00	475738.44	1.635	1.535	4.00	303369.44
1.635	1.555	4.00	296474.68	1.635	1.545	4.00	434369.88	1.635	1.535	4.00	441264.64	1.645	1.535	4.00	262000.88
1.645	1.555	4.00	255106.12	1.645	1.545	4.00	379211.80	1.645	1.535	4.00	386106.56	1.655	1.535	4.00	206842.80
1.655	1.555	4.00	199948.04	1.655	1.545	4.00	303369.44	1.655	1.535	4.00	303369.44	1.665	1.535	4.00	165474.24
1.665	1.555	4.00	144789.96	1.665	1.545	4.00	220632.32	1.665	1.535	4.00	227527.08	1.675	1.535	4.00	0.00
1.675	1.555	4.00	0.00	1.675	1.545	4.00	151684.72	1.675	1.535	4.00	0.00				
				1.685	1.545	4.00	0.00								

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (INTERMEDIO 2)											
X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)
1.355	1.505	4.00	0.00	1.355	1.495	4.00	0.00	1.365	1.485	4.00	0.00
1.365	1.505	4.00	124105.68	1.365	1.495	4.00	103421.40	1.375	1.485	4.00	82737.12
1.375	1.505	4.00	179263.76	1.375	1.495	4.00	144789.96	1.385	1.485	4.00	131000.44
1.385	1.505	4.00	248211.36	1.385	1.495	4.00	199948.04	1.395	1.485	4.00	199948.04
1.395	1.505	4.00	379211.80	1.395	1.495	4.00	310264.20	1.405	1.485	4.00	262000.88
1.405	1.505	4.00	482633.20	1.405	1.495	4.00	406790.84	1.415	1.485	4.00	296474.68
1.415	1.505	4.00	530896.52	1.415	1.495	4.00	455054.16	1.425	1.485	4.00	303369.44
1.425	1.505	4.00	551580.80	1.425	1.495	4.00	468843.68	1.435	1.485	4.00	310264.20
1.435	1.505	4.00	524001.76	1.435	1.495	4.00	455054.16	1.445	1.485	4.00	317158.96
1.445	1.505	4.00	517107.00	1.445	1.495	4.00	448159.40	1.455	1.485	4.00	317158.96
1.455	1.505	4.00	517107.00	1.455	1.495	4.00	461948.92	1.465	1.485	4.00	337843.24
1.465	1.505	4.00	489527.96	1.465	1.495	4.00	461948.92	1.475	1.485	4.00	351632.76
1.475	1.505	4.00	468843.68	1.475	1.495	4.00	455054.16	1.485	1.485	4.00	358527.52
1.485	1.505	4.00	496422.72	1.485	1.495	4.00	482633.20	1.495	1.485	4.00	372317.04
1.495	1.505	4.00	524001.76	1.495	1.495	4.00	517107.00	1.505	1.485	4.00	351632.76
1.505	1.505	4.00	537791.28	1.505	1.495	4.00	496422.72	1.515	1.485	4.00	310264.20
1.515	1.505	4.00	530896.52	1.515	1.495	4.00	461948.92	1.525	1.485	4.00	317158.96
1.525	1.505	4.00	510212.24	1.525	1.495	4.00	475738.44	1.535	1.485	4.00	351632.76
1.535	1.505	4.00	489527.96	1.535	1.495	4.00	489527.96	1.545	1.485	4.00	344738.00
1.545	1.505	4.00	461948.92	1.545	1.495	4.00	475738.44	1.555	1.485	4.00	330948.48
1.555	1.505	4.00	461948.92	1.555	1.495	4.00	461948.92	1.565	1.485	4.00	324053.72
1.565	1.505	4.00	461948.92	1.565	1.495	4.00	468843.68	1.575	1.485	4.00	330948.48
1.575	1.505	4.00	475738.44	1.575	1.495	4.00	475738.44	1.585	1.485	4.00	330948.48
1.585	1.505	4.00	482633.20	1.585	1.495	4.00	489527.96	1.595	1.485	4.00	317158.96
1.595	1.505	4.00	413685.60	1.595	1.495	4.00	434369.88	1.605	1.485	4.00	296474.68
1.605	1.505	4.00	337843.24	1.605	1.495	4.00	372317.04	1.615	1.485	4.00	310264.20
1.615	1.505	4.00	365422.28	1.615	1.495	4.00	399896.08	1.625	1.485	4.00	324053.72
1.625	1.505	4.00	379211.80	1.625	1.495	4.00	413685.60	1.635	1.485	4.00	282685.16
1.635	1.505	4.00	324053.72	1.635	1.495	4.00	365422.28	1.645	1.485	4.00	227527.08
1.645	1.505	4.00	268895.64	1.645	1.495	4.00	303369.44	1.655	1.485	4.00	172369.00
1.655	1.505	4.00	220632.32	1.655	1.495	4.00	227527.08	1.665	1.485	4.00	0.00
1.665	1.505	4.00	186158.52	1.665	1.495	4.00	179263.76				
1.675	1.505	4.00	0.00	1.675	1.495	4.00	0.00				

DATOS DE ENTRADA ABAQUS (EXTREMO 2)															
X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión de contacto (Pa)
1.365	1.465	4.00	0.00	1.365	1.455	4.00	0.00	1.365	1.445	4.00	0.00	1.375	1.435	4.00	0.00
1.375	1.465	4.00	172369.00	1.375	1.455	4.00	206842.80	1.375	1.445	4.00	199948.04	1.385	1.435	4.00	172369.00
1.385	1.465	4.00	248211.36	1.385	1.455	4.00	282685.16	1.385	1.445	4.00	248211.36	1.395	1.435	4.00	199948.04
1.395	1.465	4.00	324053.72	1.395	1.455	4.00	372317.04	1.395	1.445	4.00	310264.20	1.405	1.435	4.00	241316.60
1.405	1.465	4.00	379211.80	1.405	1.455	4.00	434369.88	1.405	1.445	4.00	358527.52	1.415	1.435	4.00	296474.68
1.415	1.465	4.00	434369.88	1.415	1.455	4.00	475738.44	1.415	1.445	4.00	406790.84	1.425	1.435	4.00	358527.52
1.425	1.465	4.00	448159.40	1.425	1.455	4.00	510212.24	1.425	1.445	4.00	455054.16	1.435	1.435	4.00	413685.60
1.435	1.465	4.00	461948.92	1.435	1.455	4.00	530896.52	1.435	1.445	4.00	489527.96	1.445	1.435	4.00	448159.40
1.445	1.465	4.00	468843.68	1.445	1.455	4.00	530896.52	1.445	1.445	4.00	503317.48	1.455	1.435	4.00	475738.44
1.455	1.465	4.00	448159.40	1.455	1.455	4.00	537791.28	1.455	1.445	4.00	524001.76	1.465	1.435	4.00	503317.48
1.465	1.465	4.00	441264.64	1.465	1.455	4.00	558475.56	1.465	1.445	4.00	551580.80	1.475	1.435	4.00	510212.24
1.475	1.465	4.00	475738.44	1.475	1.455	4.00	579159.84	1.475	1.445	4.00	558475.56	1.485	1.435	4.00	524001.76
1.485	1.465	4.00	496422.72	1.485	1.455	4.00	586054.60	1.485	1.445	4.00	558475.56	1.495	1.435	4.00	565370.32
1.495	1.465	4.00	496422.72	1.495	1.455	4.00	592949.36	1.495	1.445	4.00	579159.84	1.505	1.435	4.00	627423.16
1.505	1.465	4.00	524001.76	1.505	1.455	4.00	620528.40	1.505	1.445	4.00	627423.16	1.515	1.435	4.00	655002.20
1.515	1.465	4.00	517107.00	1.515	1.455	4.00	620528.40	1.515	1.445	4.00	641212.68	1.525	1.435	4.00	634317.92
1.525	1.465	4.00	482633.20	1.525	1.455	4.00	592949.36	1.525	1.445	4.00	613633.64	1.535	1.435	4.00	592949.36
1.535	1.465	4.00	455054.16	1.535	1.455	4.00	565370.32	1.535	1.445	4.00	579159.84	1.545	1.435	4.00	551580.80
1.545	1.465	4.00	441264.64	1.545	1.455	4.00	537791.28	1.545	1.445	4.00	551580.80	1.555	1.435	4.00	524001.76
1.555	1.465	4.00	420580.36	1.555	1.455	4.00	517107.00	1.555	1.445	4.00	524001.76	1.565	1.435	4.00	524001.76
1.565	1.465	4.00	399896.08	1.565	1.455	4.00	503317.48	1.565	1.445	4.00	517107.00	1.575	1.435	4.00	544686.04
1.575	1.465	4.00	406790.84	1.575	1.455	4.00	503317.48	1.575	1.445	4.00	530896.52	1.585	1.435	4.00	551580.80
1.585	1.465	4.00	379211.80	1.585	1.455	4.00	496422.72	1.585	1.445	4.00	530896.52	1.595	1.435	4.00	517107.00
1.595	1.465	4.00	330948.48	1.595	1.455	4.00	461948.92	1.595	1.445	4.00	503317.48	1.605	1.435	4.00	448159.40
1.605	1.465	4.00	337843.24	1.605	1.455	4.00	434369.88	1.605	1.445	4.00	448159.40	1.615	1.435	4.00	393001.32
1.615	1.465	4.00	351632.76	1.615	1.455	4.00	413685.60	1.615	1.445	4.00	406790.84	1.625	1.435	4.00	365422.28
1.625	1.465	4.00	344738.00	1.625	1.455	4.00	393001.32	1.625	1.445	4.00	386106.56	1.635	1.435	4.00	330948.48
1.635	1.465	4.00	289579.92	1.635	1.455	4.00	344738.00	1.635	1.445	4.00	344738.00	1.645	1.435	4.00	268895.64
1.645	1.465	4.00	227527.08	1.645	1.455	4.00	268895.64	1.645	1.445	4.00	268895.64	1.655	1.435	4.00	206842.80
1.655	1.465	4.00	199948.04	1.655	1.455	4.00	213737.56	1.655	1.445	4.00	213737.56	1.665	1.435	4.00	0.00
1.665	1.465	4.00	0.00	1.665	1.455	4.00	0.00	1.665	1.445	4.00	0.00			4.00	

Apéndice G: Tabla de salida de análisis estadístico del modelo predictivo de la deflexión.

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.966233017
Coefficiente de determinación R ²	0.933606242
R ² ajustado	0.931200671
Error típico	7.99932E-06
Observaciones	144

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	5	1.24171E-07	2.48343E-08	388.1017303	2.133.E-79
Residuos	138	8.8305E-09	6.39891E-11		
Total	143	1.33002E-07			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	3.27.E-04	1.0751E-05	30.37964979	5.501.E-63	0.000305354	0.00034787	0.000305354	0.00034787
Variable X 1	-5.89.E-09	4.65022E-08	-0.126574875	0.8994611	-9.7835E-08	8.6063E-08	-9.7835E-08	8.6063E-08
Variable X 2	-9.56.E-07	6.84721E-08	-13.95744625	3.676.E-28	-1.09109E-06	-8.20306E-07	-1.09109E-06	-8.20306E-07
Variable X 3	-9.80.E-05	2.41937E-06	-40.51679451	1.689.E-78	-0.000102809	-9.32413E-05	-0.000102809	-9.32413E-05
Variable X 4	-7.45.E-06	1.33322E-06	-5.584391391	1.203.E-07	-1.00814E-05	-4.80904E-06	-1.00814E-05	-4.80904E-06
Variable X 5	1.14.E-05	1.33322E-06	8.537470064	2.230.E-14	8.74614E-06	1.40185E-05	8.74614E-06	1.40185E-05

Apéndice H: Tabla de salida de análisis estadístico del modelo predictivo de la deformación unitaria vertical.

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.872713418
Coefficiente de determinación R ²	0.76162871
R ² ajustado	0.747503004
Error típico	2.09085E-05
Observaciones	144

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	8	1.88569E-07	2.35711E-08	53.9179215	2.30967E-38
Residuos	135	5.90175E-08	4.37167E-10		
Total	143	2.47587E-07			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	8.33.E-03	0.000520217	16.01789727	5.11428E-33	0.007303958	0.009361618	0.007303958	0.009361618
Variable X 1	1.66.E-06	1.63515E-06	1.015036357	0.311904212	-1.57409E-06	4.89357E-06	-1.57409E-06	4.89357E-06
Variable X 2	-5.93.E-06	2.40768E-06	-2.464137591	0.01499115	-1.06945E-05	-1.1712E-06	-1.06945E-05	-1.1712E-06
Variable X 3	-4.67.E-03	0.000270587	-17.25874358	5.74778E-36	-0.005205128	-0.004134853	-0.005205128	-0.004134853
Variable X 4	-1.50.E-06	3.48476E-06	-0.430163972	0.667762267	-8.39079E-06	5.39276E-06	-8.39079E-06	5.39276E-06
Variable X 5	1.70.E-05	3.48476E-06	4.8845972	2.88685E-06	1.01299E-05	2.39134E-05	1.01299E-05	2.39134E-05
Variable X 6 (X3 al 2)	6.47.E-04	3.64977E-05	17.73727563	4.39735E-37	0.000575188	0.000719551	0.000575188	0.000719551
Variable X 7 (x1*x3)	-4.82.E-07	4.41138E-07	-1.093221817	0.27624334	-1.3547E-06	3.90174E-07	-1.3547E-06	3.90174E-07
Variable X 8 (x2*x3)	1.49.E-06	6.49553E-07	2.296409147	0.023192364	2.07024E-07	2.77626E-06	2.07024E-07	2.77626E-06

Apéndice I: Tabla de salida de análisis estadístico del modelo predictivo de la deformación unitaria radial.

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.787643549
Coefficiente de determinación R ²	0.62038236
R ² ajustado	0.60375677
Error típico	2.95361E-05
Observaciones	144

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	cuadrado de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	6	1.9532E-07	3.2553E-08	37.31490781
Residuos	137	1.1952E-07	8.7238E-10	
Total	143	3.1483E-07		

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-8.03.E-03	0.00067524	-11.8896059	7.69923E-23	-0.009363528	-0.006693061	-0.009363528	-0.006693061
Variable X 1	-6.87.E-09	1.717E-07	-0.04000582	0.96814673	-3.46397E-07	3.32658E-07	-3.46397E-07	3.32658E-07
Variable X 2	1.17.E-07	2.5282E-07	0.46147143	0.645192278	-3.83267E-07	6.16606E-07	-3.83267E-07	6.16606E-07
Variable X 3	4.54.E-03	0.0003741	12.1324844	1.84158E-23	0.003799027	0.005278549	0.003799027	0.005278549
Variable X 4	7.55.E-07	4.9227E-06	0.15344268	0.878274972	-8.97891E-06	1.04896E-05	-8.97891E-06	1.04896E-05
Variable X 5	-1.23.E-05	4.9227E-06	-2.50342474	0.013474085	-2.20578E-05	-2.5893E-06	-2.20578E-05	-2.5893E-06
Variable X 6	-6.36.E-04	5.1558E-05	-12.3290747	5.7912E-24	-0.000737612	-0.000533708	-0.000737612	-0.000533708

Referencias

- AASHTO. (2015). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Allen, J., & Sibaja, L. (2014). *Presión de inflado de los neumáticos y la forma en que afecta la estructura del pavimento*. San José: Unidad de Gestión Municipal PITRA-LanammeUCR.
- Ávila, T. (2017). *Efecto del contenido de agua en el Módulo Resiliente de las subrasantes*. San Pedro de Montes de Oca: Universidad de Costa Rica.
- Ballester, F., Castro, D., & Gil, M. (2000). Definición, función y clasificación de los geotextiles. *Arte y Cemento*, 122-130.
- CIC. (2017). *Deterioro en pavimentos flexibles: tipos y causas*. Consultoría e Ingeniería Civil en Centroamérica S.A.
- Clark, D. (2016). *Análisis de la influencia de la presión de inflado sobre las respuestas críticas en el desempeño de los pavimentos flexibles*. San Pedro de Montes de Oca: Universidad de Costa Rica.
- COMSOL. (24 de octubre de 2018). COMSOL. Obtenido de www.comsol.es
- Da Cunha, C. (2005). *Comportamiento crítico e pós de placas dobradas*. Rio de Janeiro: MAXWELL.
- Dassault Systèmes. (27 de octubre de 2018). *Dassault Systèmes*. Obtenido de <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/simulia/productos/abaqus/>
- Durand, R. (9 de septiembre de 2018). *International Geosynthetic Society*. Obtenido de www.geosyntheticssociety.org
- FAA. (2011). *Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements*. Washington, DC: Federal Aviation Administration.
- Fiorini, A. (2007). *Aplicación de geosintéticos en la construcción de carreteras*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Helwany, S., Dyer, J., & Leidy, J. (1998). Finite Element Analyses of Flexible Pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 491-499.
- Hernandez, J., & Al-Qadi, I. (2017). Semicoupled Modeling of Interaction between Deformable Tires and Pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 1-9.
- Higuera, C. H. (2007). Leyes del comportamiento de la deflexión admisible en pavimentos flexibles. *Revista Facultad de Ingeniería, UPTC*, 7-14.
- Holtz, R., Christopher, B., & Berg, R. (1998). *Geosynthetics Design and Construction Guidelines*. Washington, DC: Federal Highway Administration.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. Kentucky: PEARSON Prentice Hall.
- Hugo A, R., & Reyes, F. (2007). Comportamiento resiliente de materiales granulares en pavimentos flexibles: estado del conocimiento. *Revista Ingenierías*, 65-90.
- Loannides, A., & Khazanovich, L. (1998). General Formulation for Multiplayered Pavement Systems. *Journal of Transportation Engineering*, 82-90.
- Leiva, P. (2011). *Cuantificación del efecto de confinamiento de un geosintético en estructuras de pavimento*. San Pedro de Montes de Oca: Universidad de Costa Rica.
- Leiva, P. (2016). *Utilización de geosintéticos en pavimentos como estrategia contra el reflejo de grietas*. San Pedro de Montes de Oca: Universidad de Costa Rica.
- Leiva, P., Loría, G., Aguiar, J. P., & Leiva, F. (2015). *Reflejo de grietas en pavimentos*

- reforzados con geosintéticos. San Pedro de Montes de Oca: LanammeUCR.
- Loría, G., & Aguiar, J. P. (2012). *Proyecto de implementación del PaveLab (HVS Costa Rica) para evaluación de desempeño*. San Pedro de Montes de Oca: LanammeUCR.
- Loría, L. G. (2014). *Caracterización mecánica de materiales granulares para pavimentos*. San Pedro de Montes de Oca: Lanamme UCR.
- Luque, P., Álvarez, D., & Vera, C. (2008). *Ingeniería del automóvil: sistemas y comportamiento dinámico*. Madrid: Paraninfo.
- Mazursky, L. A. (2006). *Three-Dimensional Analysis of Geosynthetic Reinforcement Used in Column-Supported Embankments*. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University .
- Meza, V. E. (2012). Suelos parcialmente saturados. De la investigación a la cátedra universitaria. *Ciencias de la Tierra* , 23-38.
- Minkwan, K. (2007). *Three-dimensional finite element analysis of flexible pavements considering nonlinear pavement foundation behavior*. Illinois: University of Illinois.
- Molina, G., & Rodrigo, M. (2010). *Estadística descriptiva en Psicología*. Valencia: Universidad de Valencia.
- Novales, A. (2010). *Análisis de regresión*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid .
- Pappin, J., Brown, S., & Oreilly, M. (1992). Effective Stress behavior of Saturated and Partially Saturated Granular material Subjected to Repeat Loading. *Geotechnique*, 485-497.
- Park, D.-W., Martin, A. E., & Masad, E. (2005). Effects of Nonuniform Tire Contact Stresses on Pavement Response. *Journal of Transportation Engineering*, 873-879.
- Park, D.-W., Martin, A. E., Jeong, J.-H., & Lee, S.-T. (2008). Effects of Tire Inflation Pressure and Load Predicted Pavement Strains. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* , 181-186.
- PAVCO. (25 de agosto de 2006). *Geosistemas PAVCO S.A.* Obtenido de <http://www.amanco.com.ar/wp-content/uploads/descargas/geosinteticos/amanco-geotextiles-folleto-pavco.pdf?v=7516fd43adaa>
- Program, N. C. (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of a new and rehabilitated pavement structures* . Illinois : University of Illinois Urbana-Champaign.
- Rodríguez, W., & Pallares, M. (2005). Desarrollo de un modelo de elementos finitos para el diseño racional de pavimentos. *Tecnura*, 25-37.
- Rondón, H., & Reyes, F. (2007). Comportamiento resiliente de materiales granulares en pavimentos flexibles, estado del conocimiento. *Revista Ingenierías* , 65-90.
- Rondón, H., Triantafyllidis, T., Wichtmann, T., & Lizcano, A. (2008). Comportamiento de un material granular no tratado en ensayos triaxiales cíclicos con presión de confinamiento variable. *Ingeniare*, 461-472.
- Saad, B., Mitri, H., & Poorooshab, H. (2006). 3D FE Analysis of Flexible Pavement with Geosynthetic Reinforcement. *Journal of Transportation Engineering*, 402-415.
- Taherkhani, H., & Jalali, M. (2018). Viscoelastic Analysis of Geogrid-Reinforced Asphaltic Pavement under Different Tire Configurations. *International Journal of Geomechanics*, 18-25.
- Tex Delta. (20 de septiembre de 2018). *Tex Delta tejidos técnicos*. Obtenido de <https://texdelta.com/cat/mallas-de-refuerzo/>
- Tielking, J. T., & Roberts, F. L. (1987). Tire Contact Pressure and Its Effect on Pavement. *Journal of Transportation Engineering*, 56-71.
- Uzcátegui, M. (29 de octubre de 2018). *ABAQUS programa de elementos finitos*. Obtenido de Centro Nacional de Cálculo Científico Universidad de los Andes : http://www.cecalc.ula.ve/documentacion/tutoriales/abaqus/introduccion_abaqus.pdf
- Wang, H. (2011). *Analysis of Tire-Pavement Interaction and Pavement Responses using Decoupled Modeling Approach*. Urbana, Illinois: University of Illinois.
- Xia, K. (2010). Finite Element Modeling of Dynamic Tire/Pavement Interaction. *Pavements and Materials*, 204-214.
- Zaniewski, J. (1991). *Unified methodology for airport pavement analysis and design*. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration.

Zornberg, J. (2013). Sistemas de pavimentos reforzados con geosintéticos. *Ingeniería Civil*, 5-25.