

Modelos Numéricos Para Evaluar El Comportamiento De Geoceldas En El Reforzamientos De Suelos Para Pavimentos

Behavior Of Geocells In Soil Reinforcement For Pavements

Autores

Juan Andrés Moreira Naula ¹, Félix Michael Hernández López ²

¹Ingeniero Civil. Universidad Técnica de Manabí (UTM). Estudiante de la Maestría en Ingeniería Civil, Mención Vialidad
e-mail: jmoreira7994@utm.edu.ec

²Doctor en Ciencias, Investigador del Instituto de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, Avenida Universidad s/n, Anáhuac, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México CP-66450, e-mail: fmichaelhl@gmail.com

RESUMEN

La construcción de pavimentos es un tópico de la ingeniería civil que se enfrenta a diversos problemas, entre los que se encuentran los suelos de baja resistencia al corte como son las arenas, suelos arcillosos y suelos rocosos granulares. La baja capacidad resistente y elevada deformabilidad de estos suelos requiere grandes espesores de las carpetas granulares y asfálticas, lo que significa un incremento del costo y mayores tiempos de construcción. El presente artículo tiene como objetivo analizar el efecto de un sistema de confinamiento celular en un proyecto vial donde se emplearon geoceldas en el nivel de la capa base. Para esto, se utilizó el software ABAQUS CAE v6.14-3, en donde se analizaron nuevos diseños correspondientes a un pavimento flexible, calculando las mejoras mecánicas y la reducción de espesores de las capas granulares. Se obtuvo que el recubrimiento en las geoceldas aumentó la resistencia del conjunto estructural, sin embargo, debe existir un balance económico que garantice la sostenibilidad y factibilidad de su implementación a gran escala. Finalmente, se concluye que las geoceldas son un material que puede emplearse como refuerzo para mejorar el rendimiento de la capa del pavimento, aportando mejoras en el diseño, construcción y mantenimiento de suelos de baja calidad, lo que a su vez brinda un soporte estable y uniforme y evita la formación de surcos y grietas en pavimentos.

Palabras claves: Geoceldas, modelos numéricos, pavimentos flexibles

ABSTRACT

The construction of pavements is a subject of civil engineering that faces various problems, among which are low shear resistance soils such as sand, clayey soils and granular rocky soils. The low resistant capacity and high deformability of these soils requires great thicknesses of the granular and asphalt binders, which means an increase in cost and longer construction times. The objective of this article is to analyze the effect of a cellular confinement system in a road project where geocells were used at the base layer level. For this, the ABAQUS CAE v6.14-3 software was modified, where new designs corresponding to a flexible pavement were analyzed, calculating the mechanical improvements and the reduction of thickness of the granular layers. It was obtained that the coating in the geocells increased the resistance of the structural assembly, however, there must be an economic balance that guarantees the sustainability and feasibility of its large-scale implementation. Finally, it is concluded that geocells are a material that can be used as reinforcement to improve the performance of the pavement layer, providing improvements in the design, construction, and maintenance of low-quality soils, which in turn provides stable support and uniform and prevents the formation of grooves and cracks in pavements.

Keywords: Geocells, numerical models, flexible pavements

Nota Editorial: Recibido: Abril 2023 Aceptado: Mayo 2023

1. INTRODUCCIÓN

El sector de la ingeniería civil se enfrenta permanentemente a diversos problemas de índole técnico, específicamente en la construcción de carreteras los principales inconvenientes se presentan cuando el suelo no presta las condiciones necesarias para soportar los requerimientos de tráfico generando tipos de fallas como agrietamiento, hundimientos, entre otros. Estos problemas propios de la ingeniería vial han venido profundizándose con el paso del tiempo, por lo que se ha requerido la búsqueda de diversos mecanismos, materiales o métodos constructivos que permitan dar solución parcial o total a estas fallencias estructurales [1]. Entre las soluciones convencionales para mitigar el problema antes mencionado se encuentran la excavación y reemplazo de suelos inadecuados, empalizadas, compactaciones profundas y estabilizaciones químicas, sin embargo, los excesivos costos y los cortos periodos de vida útil son las principales limitaciones de estas alternativas. Bajo este enfoque, el uso de nuevas tecnologías de refuerzo estructural de pavimento mediante el uso de productos fabricados a partir de fibras sintéticas o naturales como lo geosintéticos, están teniendo un mayor protagonismo en el mejoramiento y optimización de los suelos [2-4]. El presente artículo centra su estudio en el comportamiento de la geocelda dentro de las capas de un pavimento, para ello inicia con los fundamentos teóricos relacionados con el mecanismo de trabajo de la geocelda dentro del suelo, posteriormente, se analiza todas las consideraciones generales para la modelación computacional de un ensayo de placa en un suelo sin reforzar y otro con geomalla tomando como referencia el modelo de Boussinesq. Finalmente, se verifica el comportamiento del suelo reforzado con los planteado en la bibliografía y se analizan algunos factores que son de suma importancia en el funcionamiento de esta solución.

2. MECANISMO DE TRABAJO DE LA GEOCELDA

Los sistemas de geoceldas son estructuras tridimensionales dispuestas en forma de panal, permeables, a base de polímeros (sintéticos o naturales), interconectadas, que encierran completamente un tipo de relleno, proporcionando confinamiento a toda la estructura, previniendo la extensión lateral del material de relleno. Cuando se le aplican cargas verticales a este sistema, las tensiones circunferenciales en las paredes de las celdas y las resistencias de las celdas adyacentes se movilizan. Estas tensiones y resistencias reducen la deformación lateral del material de relleno. Como resultado la rigidez incrementa generando que la capa de material de relleno y geocelda actúe como una matriz rígida y distribuya las cargas verticales del tráfico sobre un área más grande que la del suelo de la subrasante.

Varios autores plantean que el principal efecto que tiene un sistema de geoceldas, consiste en que éstas retienen horizontalmente el suelo encerrado en su interior, por lo tanto, limitan la deformación lateral bajo presión, para que el comportamiento del suelo mejore ante las fuerzas de deformación [1, 5]. Cuando el suelo estabilizado con un sistema de geoceldas es sometido a fuerzas o presiones, la dilatación lateral del material de relleno es restringida por las fuerzas del anillo de tracción de la geocelda y por la resistencia pasiva de las celdas adyacentes. Todo esto se conoce como “efecto haz” y su funcionamiento puede verse representado en la figura 1.

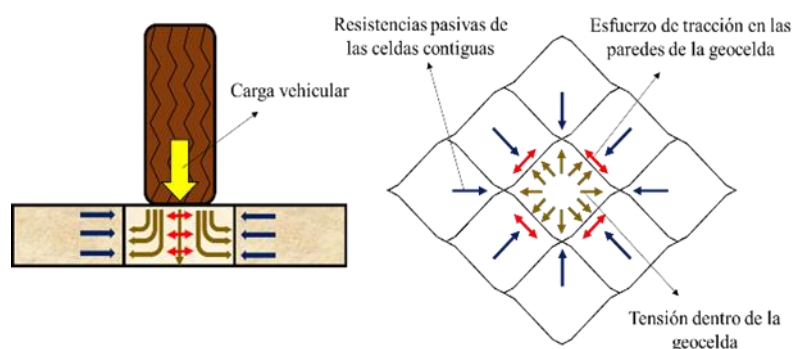


Figura 1: Esquema de funcionamiento de las geoceldas

La aplicación de la carga activa y las fuerzas del anillo de tracción en las paredes de la Geocelda, generan una estabilidad adicional al relleno. Según plantean Vibhoosha et al. [5] y Hegde & Sitharam [6] esto puede ser considerado como cohesión aparente, figura 2. El sistema de conexión de las geoceldas y el relleno presentan mayor rigidez, comparado con un sistema de suelo sin refuerzo, esto se da gracias a este fenómeno

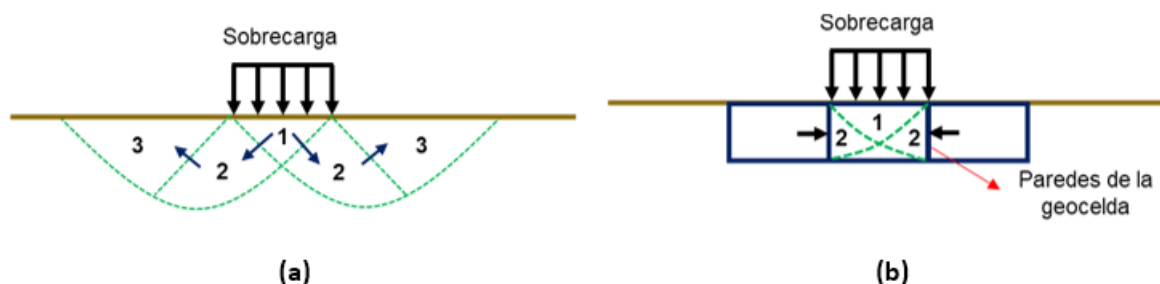


Figura 2: Zonas de Falla a) Suelos sin estabilizar y b) suelo estabilizado con un sistema de geocelda

Las geoceldas han sido aplicadas satisfactoriamente en la estabilización de subrasantes con malas características, sin embargo, la aceptación de las geoceldas para la estabilización de subrasante es limitada debido a la falta de métodos de diseño y por lo tanto se requiere de más investigación para que sea aceptada como una alternativa de solución [7, 8]. Los factores más influyentes en el desempeño de las geoceldas son: las variables geométricas, la calidad del relleno, la resistencia de la subrasante, y el tipo de carga.

3. MODELO EXPERIMENTAL

3. 1. Modelo Experimental

El tramo experimental definido para la presente investigación mostrado en la figura 3, ocupa una superficie de 325 m² y se encuentra ubicado frente a la facultad de Ciencias Matemáticas, Física y Química de la Universidad Técnica de Manabí (UTM). Este modelo experimental tuvo como objetivo evaluar el comportamiento de pavimentos rígidos bajo diferentes condiciones de clima, y tipos de suelo, por lo cual se elaboraron dos cimientos: cimiento compuesto por suelo natural de la zona y cimiento constituido de una capa de subbase granular (Subbase clase III) de 25 cm de espesor.



Figura 3: Tramo experimental evaluado en la investigación (UTM).

Para llevar a cabo la preparación del cimiento del tramo, se realizó la caracterización de los materiales componentes en muestras tomadas del suelo, estas muestras se llevaron al laboratorio para realizar los ensayos pertinentes. Los materiales evaluados fueron el suelo del sitio de construcción que actúa como subrasante y la subbase granular obtenida en una cantera situada en el cantón Portoviejo, Manabí, Ecuador. De los dos cimientos solo fue de interés los datos correspondientes a la subrasante natural, pues es la condición más desfavorable donde se simularán los resultados de la solución que se propone. Se efectuaron ensayos de granulometría, límites de consistencia y Proctor; si bien para estudios en carretera se emplea el ensayo Proctor modificado, en la presente investigación se consideró oportuno trabajar con el ensayo Proctor. Todos estos ensayos se aplicaron con la finalidad de obtener la humedad óptima y máxima densidad, puesto que estos parámetros son útiles para el monitoreo de compactación en la obra y para obtener el valor de CBR (Índice Soporte de California) para el diseño. Para estos ensayos se utilizó las normas MOP-001-F, 2002 [9].

También se caracterizó el suelo mediante un ensayo con placa de carga para la obtención del módulo de reacción de la subrasante (k), del cual también se extrajo el módulo elástico en la superficie. Para el desarrollo del ensayo se colocó un camión de aproximadamente 40 ton como contrapeso y una viga metálica de referencia, debajo de la placa se colocó una cama de arena para lograr uniformidad en el momento de aplicación de la carga. La prueba se lleva a cabo según la norma ASTM-D1196 [10] empleando una placa de 76 mm de diámetro y 50 mm de espesor y comparadores de carátulas de 10 mm de rango y precisión una centésima de milímetro. En las figuras 4 y 5 se muestran imágenes del ensayo y los resultados de este.



Figura 4: Preparación del ensayo con placa de carga estática.

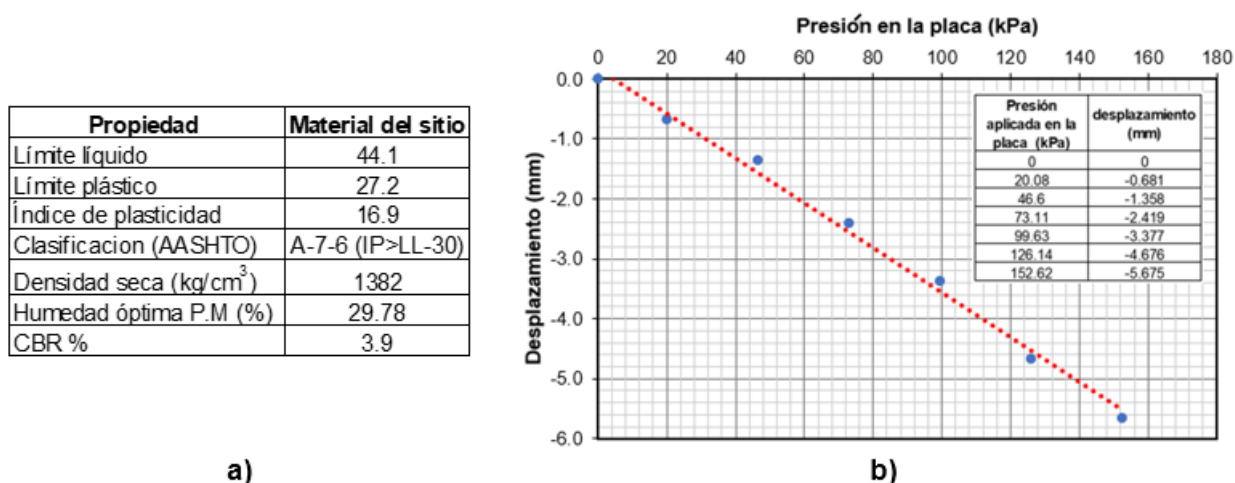


Figura 5: Caracterización de la subrasante natural a) Propiedades del suelo, b) Ensayo de placa

4. MODELO NUMÉRICO

Para conformar el modelo numérico del sistema, primeramente, se modeló el ensayo de placa realizado en la UTM, este modelo pretende recrear la condición del suelo sin reforzar contrastando y validando la respuesta estructural con resultados experimentales. Luego de ser validado se le incorporó un sistema de confinamiento celular en forma de panal (Geocelda) dentro de una capa de material de 150 mm de espesor. El programa computacional empleado en esta simulación fue el ABAQUS/CAE. En los siguientes apartados, se exponen las invariantes del modelo generalizado (modelo reforzado con geoceldas).

4. 1. Modelo Geométrico Del Suelo Y Geocelda

El modelo numérico está basado fundamentalmente en tratar de asemejar un ensayo con placa de carga in situ (dilema de infinitos grados de libertad), no obstante, para simplificar este proceso se debe realizar un medio de dimensiones finitas puntualizado por un macizo elástico y continuo, lo que se sustenta en la teoría del macizo de Boussinesq [11], pero con la particularidad de modelar el sistema de carga como una placa rígida. Como el primer modelo se orienta al ensayo experimental de la UTM para el desarrollo de la prueba se seguirán las recomendaciones establecidas por la ASTM-D1196 [10].

El dominio se representa como un semiespacio continuo, las dimensiones de este dominio se establecieron teniendo en cuenta el criterio de autores como [12-15] a fin de evitar que la placa cargada no interfiera en el estado tenso-deformacional del medio. Teniendo en cuenta esto se asume las siguiente siguientes recomendaciones que se muestran en la figura 6.

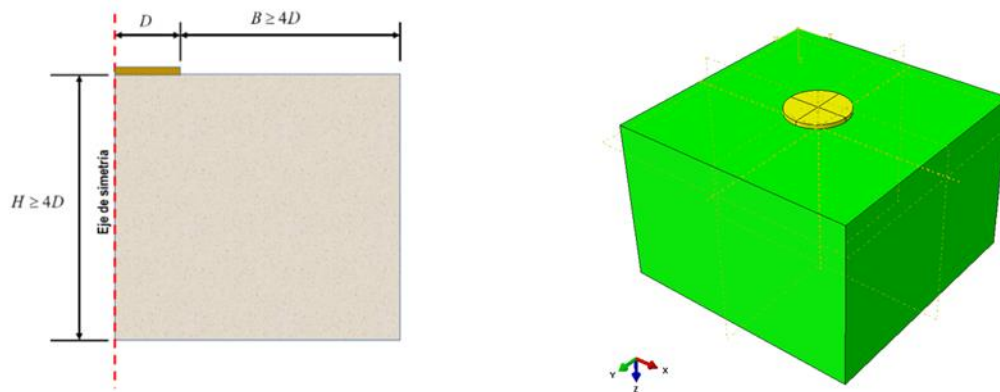


Figura 6: Esquema del modelo tridimensional del suelo

La geocelda fue modelada como un elemento Shell 3D. Tiene una geometría en forma de panal, para su elaboración se tomó como referencia todas las características extraídas de la ficha técnica proporcionada por el principal proveedor de esta tecnología en el Ecuador *GEOMATRIX® CONFICELL LS*. La siguiente figura muestra la configuración geométrica de la geocelda donde se reflejan todos los parámetros requeridos para su elaboración en el programa (figura 7).

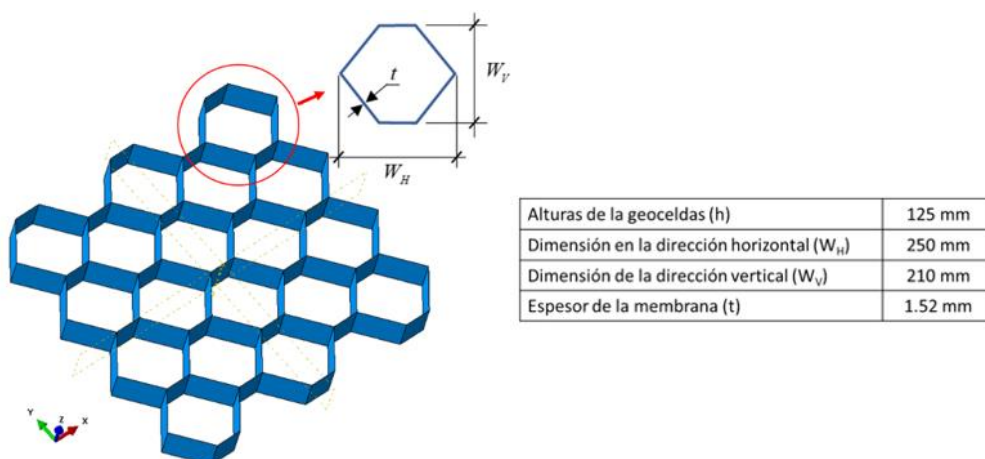


Figura 7: Morfología y dimensiones de la geocelda.

4. 2. Modelo De Material

Partiendo de que los principales mecanismos de deterioro en pavimentos no son ocasionados por problemas de capacidad de carga, los diversos autores adoptan modelos constitutivos lineales-elásticos para evaluar el comportamiento de los suelos para pavimentos [16], es por eso que se usan parámetros como el módulo resiliente y el módulo de balasto. Los parámetros empleado en el modelo del suelo fueron el módulo resiliente del suelo (M_r) y el coeficiente de Poisson (ν), ambos fueron estimados en función de la clasificación de los suelos de subrasante a partir de trabajos realizados por Papagiannakis & Masad [17]. En la validación del modelo estas propiedades se estimaron a partir de la clasificación de los suelos del tramo experimental. Los resultados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Propiedades elásticas de los suelos estimadas para los suelos de los experimentos numéricos.

Clasificación del suelo según AASHTO	Capa	Módulo de Elasticidad (MPa)		Coeficiente de Poisson (ν)	
		Intervalo	Valor medio	Intervalo	Valor medio
A-7-6	Subrasante	20-90	55	0.3-0.4	0.35

GEOMATRIX® CONFICELL LS es una geocelda conformada por polímero de alta densidad (nano fibras de poliéster/poliamidas dispersadas en una matriz de polietileno), con un módulo de elasticidad de 275 MPa, coeficiente de Poisson de 0.45 y una densidad de 950 kg/m³. La tensión máxima de la membrana a tracción es mayor que 20 kN/m para una deformación de 2%. En el caso del análisis en la investigación como no se trata de una prueba de capacidad de carga, los esfuerzos no se llevan al límite en los materiales por tanto solo se considerarán los parámetros elásticos de los materiales empleados.

4. 3. Condiciones De Contorno E Interacciones

Para la simulación del ensayo de placa todo el medio se modeló como un espacio semi infinito en tres dimensiones, para lograr este efecto, las condiciones de contorno en el exterior del dominio se le restringió los grados de libertad en X y Y, solo permitiendo desplazamientos en la vertical. En el fondo se colocaron condiciones de empotramiento (6gl). Finalmente se colocó una condición de desplazamiento vertical en la placa rígida introduciendo un desplazamiento de 0,005 m (5 mm, valor aproximado al último desplazamiento del ensayo). Ver figura 8.

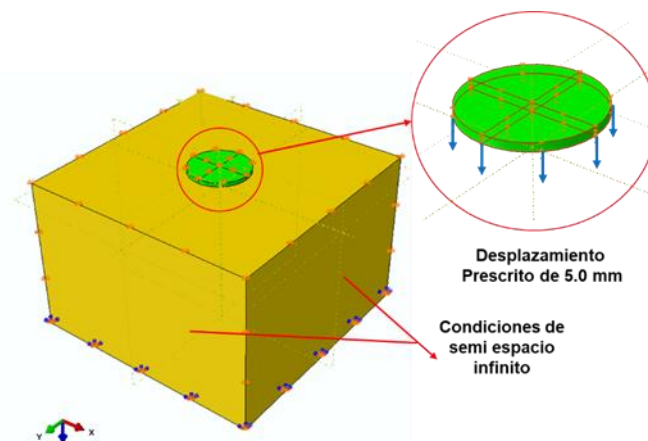


Figura 8: Condiciones de contorno de ambos modelos numéricos

Las relaciones de interacción que existen en los modelos son dos, en el primer modelo está la interacción Placa-Suelo, en el segundo modelo tendremos, interacción Placa-Suelo y la geocelda dentro del suelo.

Placa suelo: Se parte de la condición de que en el ensayo se realiza en una dirección (no existe descarga), por tanto, se define la interacción a partir de una restricción del tipo "Tie" (*vinculada*). Geocelda-Suelo: La geocelda es modelada como un elemento embebido dentro del suelo (*Embedded Element*).

La carga en el ensayo se aplicó sobre una placa rígida, lo que nos aleja de la posibilidad de simular el proceso como una carga distribuida en la superficie, ya que la distribución de presiones en una placa rígida es no uniforme y tiende al infinito cuando nos acercamos al borde, tal como demuestra Ullidtz [18] a partir de la siguiente expresión registrada en el libro de Huang y graficada en la figura 9 [19].

$$q(r) = \frac{qa}{2(a^2 - r^2)^{0.5}} \quad \text{si } r = 0 \therefore q = \frac{q}{2} \quad \text{si } r = a \therefore q \rightarrow \infty \quad (1)$$

Donde:

a: radio de la placa.

q: valor medio de la presión.

r: posición del punto en la función.

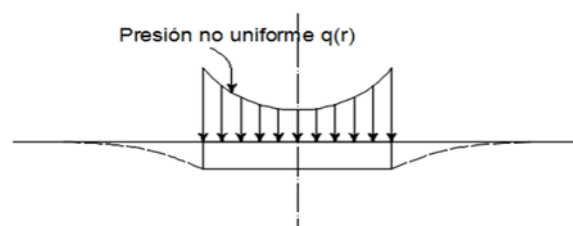


Figura 9: Representación del modelo de una placa rígida en el pavimento

Para la modelación del efecto antes mencionado en el paquete informático se definió una restricción del tipo “coupling” sobre una referencia. Se construyó la placa como un elemento conocido como rígido discreto, el cual es una parte que será cubierta pero su rigidez es infinita. En vez de colocar el valor de la carga se impuso un desplazamiento como se mencionó anteriormente, la evolución del desplazamiento se controla en el paso del cálculo en forma de rampa con incrementos del 10% del total a aplicar hasta llegar al 100% (0.005 m), en este punto se determina cual es presión en el suelo y se calcula la fuerza de reacción en el centro de la placa. Esta metodología ha sido descrita en trabajos previos [20-22].

4.4. Análisis De Dominio

Luego de haber tomado las consideraciones explicadas en la figura 6 e introducido la geocelda en el modelo, se pudo constatar que, a pesar de ser un modelo lineal elástico, los costos computacionales que generados eran extremadamente altos ya que el número de elementos finitos crecería considerablemente aun incluso antes de hacer el análisis de la sensibilidad de la malla. Por tanto, se decide analizar el tamaño del dominio con el fin de reducir el número y elementos finitos. Se partió de considerar que la cercanía de las condiciones de borde en el modelo no generase distorsiones en los resultados, es por ello que se analizó en la dirección horizontal hasta dónde llega el efecto de la deflexión provocada por la placa (U3), tal como se observa en la figura 10, mientras que en la dirección vertical se evaluó hasta que profundidad se propagan las tensiones (S33). Ambos estudios fueron realizados en el mismo modelo del experimento representando gráficamente los resultados en cada caso.

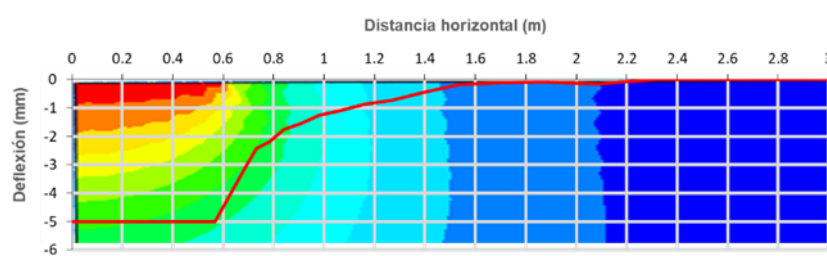


Figura 10: Análisis de las deflexiones en la dirección horizontal

Como se visualiza en la figura 10 a medida la distancia aumenta desde el punto de aplicación de la carga el cuenco de deflexiones se va cerrando hasta un punto donde sus valores son prácticamente despreciables, lo que evidencia que a la distancia aproximadamente de 1.5 m ya las deflexiones pueden despreciarse y por tanto pudiera hacerse una reducción del dominio en ese sentido de 3 m que tenía con anterioridad a la mitad (1.5 m). Por tanto, al ser simétrico puede decirse que el dominio en las direcciones de “X” y “Y” queda reducido a un bloque de 3.0x3.0 m. Por su parte, la figura 11 muestra el análisis de las tensiones en la vertical.

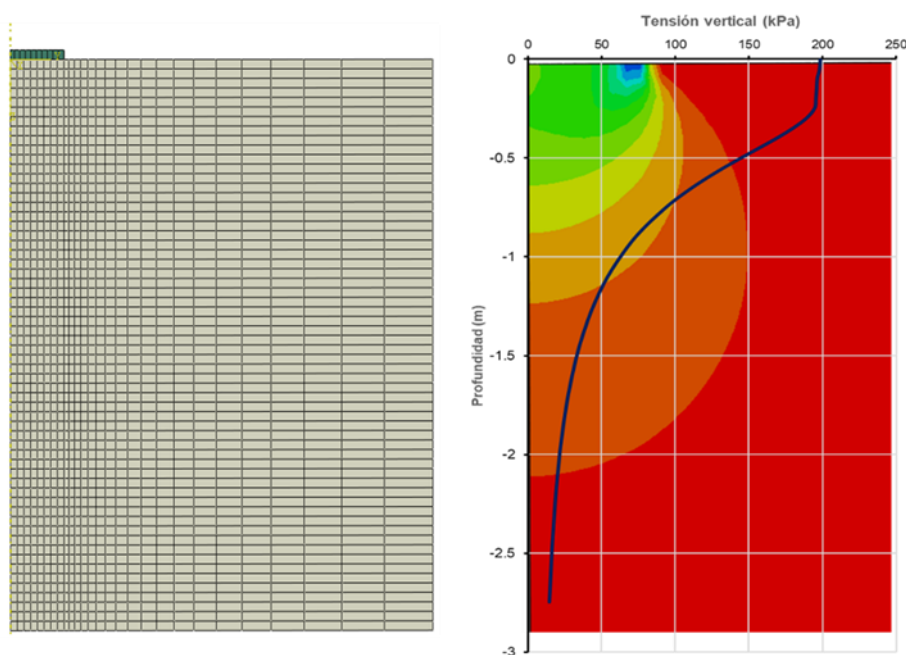


Figura 11: Análisis de las tensiones en la vertical

En el caso del análisis vertical se puede observar cómo se van disipando las tensiones en la profundidad encontrándose en la superficie los mayores valores. Sobre la profundidad aproximadamente de 2 m los valores de tensiones son muy pequeño, no son cercanos a cero, pero considerando que uno de los efectos principales de las geomallas es la reducción de los esfuerzos verticales, se puede considerar una reducción del dominio hasta esa profundidad. Finalmente, el modelo geométrico del suelo queda reducido a un macizo de $3 \times 3 \times 2$ m permitiendo así que se reduzcan un número considerable de elementos finitos tanto en el suelo como en la geocelda.

4.5 Calibración Y Validación De Los Resultados Experimentales

A partir de estudios realizados con anterioridad en estos modelos solo se varió la densidad de malla sin cambiar el tipo de elemento o esquema de integración [1, 5, 23]. Se probaron 9 densidades en la zona de interés, partiendo de una malla gruesa (100 mm) hasta una muy densa (20 mm). Como el experimento se basa un modelo con control por desplazamiento, lo que se evaluó como variable de respuesta fue la fuerza de reacción que aparece en el centro de la carga cuando se alcanza el 100% de los incrementos. La figura 12 plantea un ejemplo de la progresión en el incremento de la densidad de malla.

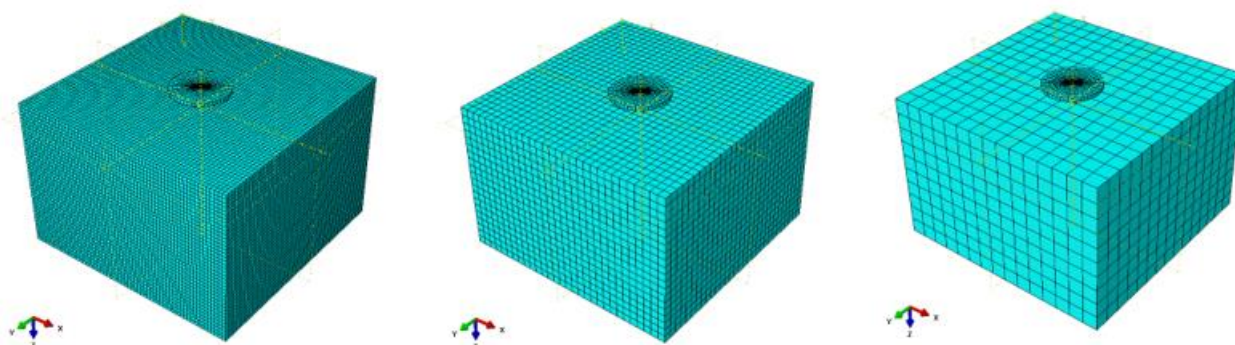


Figura 12: Ejemplo de la progresión que sigue el incremento de la densidad de malla en el suelo de subrasante

Las variantes se representaron en un gráfico para evaluar el comportamiento de la variable respuesta y definir cuando el modelo estabiliza la solución. El hardware empleado para la simulación fue un Procesador Core i7 con una memoria RAM de 16 Gb. Las características de hardware son muy importantes, puesto que el proceso de calibración está condicionado por la disponibilidad computacional. Los resultados se muestran en la figura 13

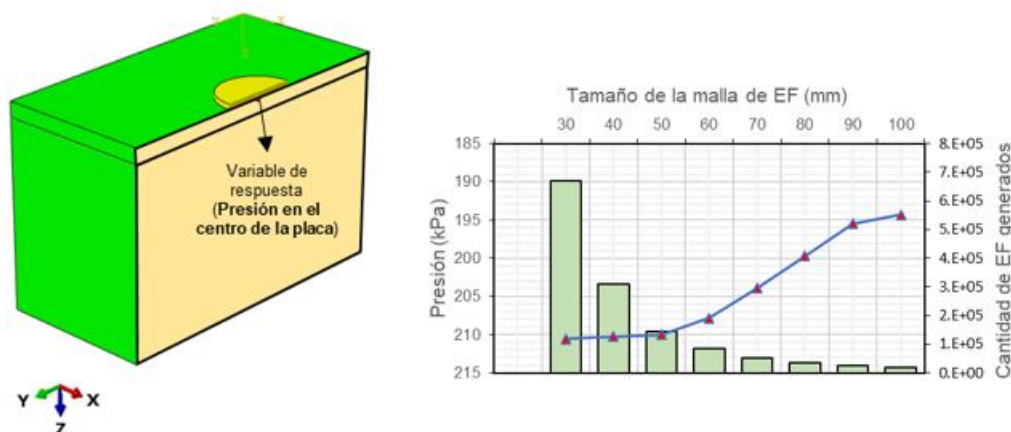


Figura 13: Evaluación de la densidad de malla en los modelos del suelo evaluados

La figura 13 muestra que a medida que aumenta la densidad de malla, el valor de las presiones debajo de la placa van aumentando hasta determinado punto (60 mm), donde se torna asintótico, esto significa que a partir de ahí no se obtendrán mejoras en la convergencia numérica del modelo, sin embargo, continuaría aumentando el costo de cómputo, tal es el caso que la última variante (20 mm) no aparece en el gráfico ya que el costo computacional del modelo superó la disponibilidad de hardware que se tenía para la investigación. Después de una valoración de los criterios antes tratados, se decidió adoptar la densidad de malla del modelo (50 mm), ya que este se encuentra dentro del rango estable de la solución y el costo computacional no es elevado.

4.6. Calibración Física Constitutiva Y Validación Del Modelo

Cuando se modelan fenómenos de la ingeniería relacionados con la mecánica del sólido usualmente se emplean propiedades específicas de los materiales útiles para el desarrollo de determinado modelo constitutivo, estas propiedades generalmente son el producto de múltiples ensayos, donde se extrae el valor medio como resultado.

El uso de estos valores medios para la modelación computacional al momento de validar la solución experimental trae ciertos errores, ya que las propiedades constitutivas del experimento en realidad no coinciden en la mayoría de los casos con los valores medios. Para ello es que se desarrolla lo que se conoce como calibración física donde se variarán las propiedades constitutivas del modelo numérico hasta obtener una respuesta similar a la del experimento, siempre siguiendo la aleatoriedad que persiguen dichas propiedades.

Se simuló el ensayo tomando el módulo de elasticidad de los extremos del intervalo y el valor típico (tabla 1) y en cada caso se extrajo en el mismo punto de control, la presión que es necesaria ejercer en suelo para lograr una deflexión de 5.0 mm en el suelo. Luego, se realizó un análisis inverso, donde a partir de la ecuación de regresión con las respuestas obtenidas y entrando con el valor resultante en el experimento (presión para obtener una deflexión de 5.0 mm) se estima el posible módulo de elasticidad del suelo en el campo. En la figura 14 se presentan dichos resultados.

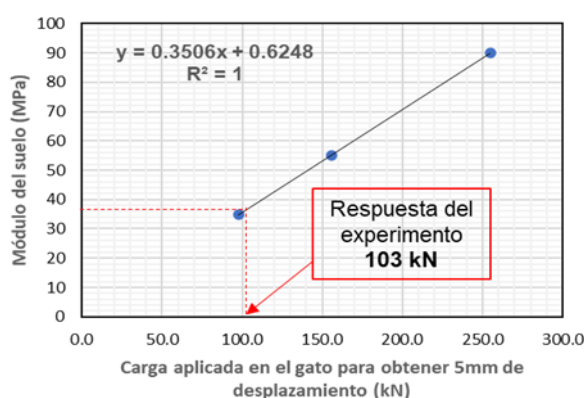


Figura 14: Carga aplicada para obtener 5.0 mm de deflexión teniendo en cuenta el intervalo de confianza de las resistencias del suelo

En la figura 15 se puede validar los resultados comparando el modelo numérico sin calibrar (valor medio del módulo de la capa) y el modelo ya calibrado con el ensayo experimental.

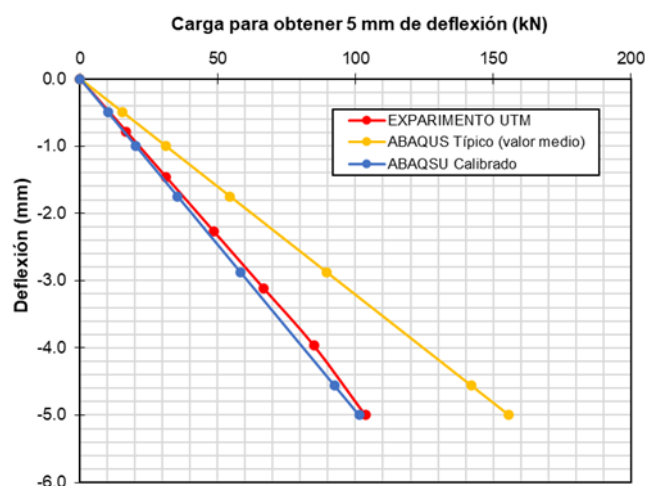


Figura 15: Comparación de los resultados del modelo numérico sin calibrar y el calibrado con el experimento

Como se observa en la figura 15, el modelo calibrado físicamente se comporta casi de igual forma que el ensayo desarrollado por Rodríguez et al [24]. Con ello es posible decir que la respuesta del modelo numérico se acerca bastante a la realidad. Es necesario aclarar que estas condiciones no son definitivas, pues los suelos para carreteras tienen un comportamiento extremadamente heterogéneo y muy difícil de caracterizar. Sin embargo, este estudio sirve como referencia para decir que el modelo numérico representa una aproximación fiable de un ensayo estático con placa de carga

A partir de los resultados obtenidos en el tramo experimental y en el modelo numérico se puede concluir que con un modelo empleado y una correcta calibración matemática y física fue posible la modelación confiable del ensayo con placa de carga, por lo que será posible también modelar el mismo ensayo con la colocación un sistema de confinamiento celular (Geoceldas).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En concordancia con los resultados obtenidos en la calibración numérica del modelo y su respectiva validación con los resultados experimentales, aplicó el modelo para estimar el aporte resistente de las geoceldas en subrasantes de baja calidad. En primer lugar, se analiza el comportamiento de las geoceldas, y finalmente se analiza la profundidad de colocación del geomaterial.

5. 1. Evaluación Del Comportamiento De Las Geoceldas En El Suelo

Para estudiar el comportamiento de las geoceldas en el suelo se desarrollaron dos modelos numéricos correspondiente a pruebas con placa de carga con geoceldas y sin geoceldas. Las variables internas y externas analizadas fueron: tensión vertical y tensión en celdas (internas), deflexión y módulo de superficie (externas).

Para analizar las variables mencionadas se utilizaron gráficos policromáticos y de comportamiento. A modo comparativo se estudió el efecto de las geoceldas en el modelo propuesto. En la figura 16 muestra los modelos empleados en la investigación.

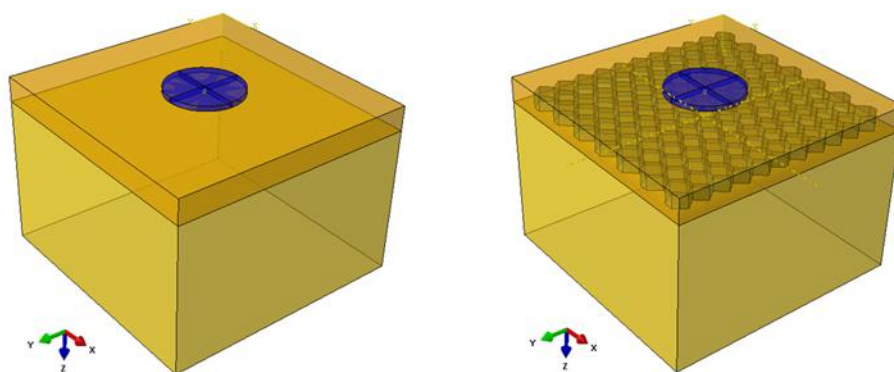


Figura 16: Modelos numéricos empleados para los estudios con y sin geoceldas.

Apoyándose en lo que plantea [20] sobre el llamado “efecto haz” se realizó la comprobación computacional del mismo, verificando el comportamiento de las tensiones en las paredes de la geoceldas y en el suelo. El estudio consistió en interpretar el comportamiento de las variables internas (tensiones y deformaciones) a partir de modelos policromáticos. A continuación, en la figura 17 se muestra imágenes de los resultados y posteriormente su interpretación.

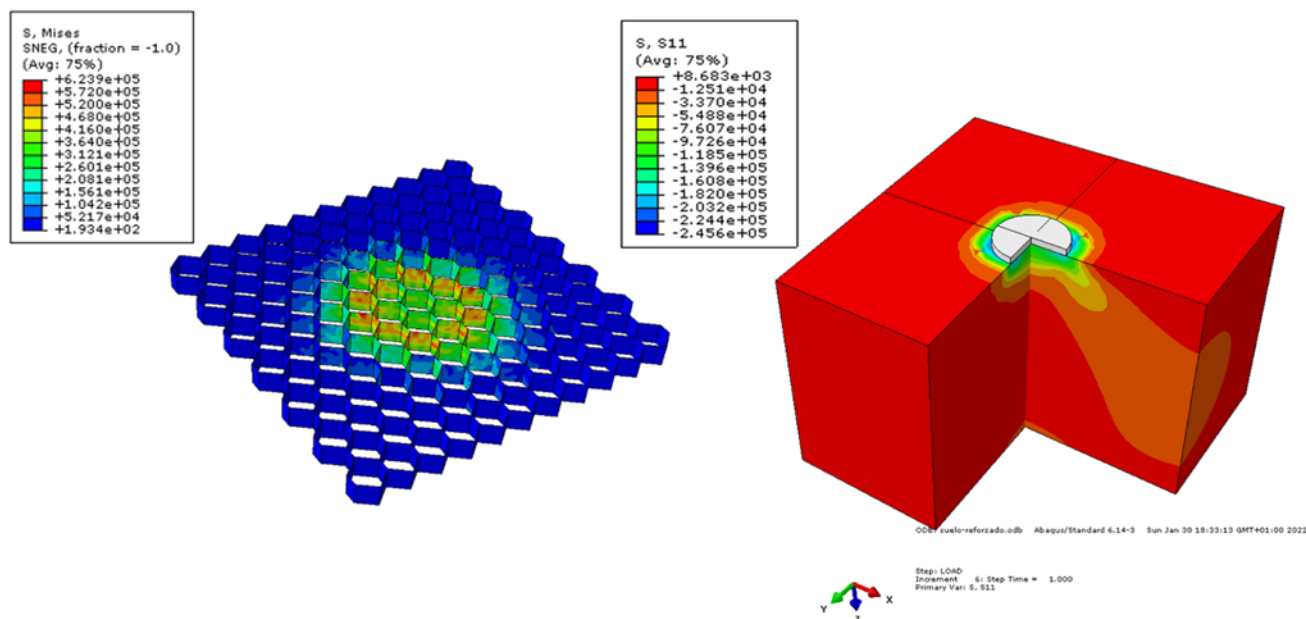


Figura 17: Comportamiento de las geoceldas en el suelo.

Como puede observarse en la figura 17, algunas celdas, sobre todo aquellas próximas a la zona cargada están traccionadas, mientras que otras se encuentran comprimidas. Por su parte, en el suelo se observa como toda la zona se encuentra comprimida (confinadas), elemento que es importante, pues el suelo eleva su capacidad de carga con el grado de confinamiento, por lo que evidentemente existe un incremento en la resistencia. Por tanto, se confirma lo planteado previamente, en donde se manifiesta que con los esfuerzos se origina una dilatación lateral del material de relleno, la cual es restringida por las fuerzas del anillo de tracción de la geocelda y por la resistencia pasiva de las celdas adyacentes, incrementando así el confinamiento en la zona.

Se evaluó el comportamiento de los desplazamientos y las tensiones verticales comparando los modelos de la figura 16. Para efectuar estas pruebas se trazaron dos líneas de muestreo, definiendo como referencia las coordenadas de los puntos cada 5 cm. El muestreo horizontal permitió analizar el cuenco de deflexiones, incluyendo una línea que recorre toda la superficie del dominio. Mientras que el muestreo vertical inicia en el área que está por debajo del centro de la placa y se desplaza hacia la profundidad (figura 18).

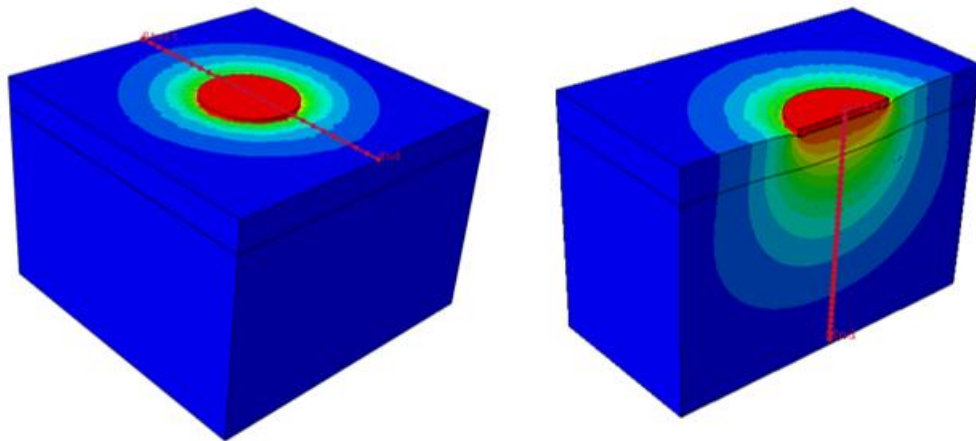


Figura 18: Muestreo de los puntos por coordenadas para el análisis del comportamiento de las variables estudiadas.

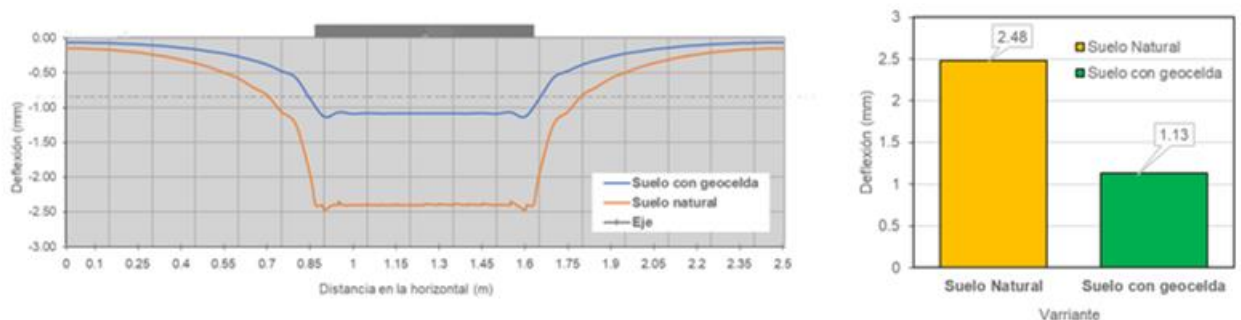


Figura 19: Comportamiento de las deflexiones superficiales.

Como se observa en la figura 19, existe una disminución importante de las deflexiones, lo que corrobora el impacto de las geoceldas sobre el suelo. La diferencia entre las soluciones estudiadas estriba en aproximadamente 5 veces. Esta reducción puede relacionarse con el aumento del módulo de superficie, lo que se comprueba con el uso de la ecuación obtenida de los planteamientos de Boussinesq [25]. La ecuación se plantea a continuación:

$$E = \frac{\pi(1 - \nu^2)qa}{2 \cdot w_o} \quad (2)$$

Donde:

ν : Coeficiente de Poisson del suelo.

q : Presión ejercida sobre la placa de carga (MPa).

a : Radio de la placa (mm).

w_o : Deflexión máxima en el centro de la placa (mm).

En la ejecución del estudio se utilizó una presión de 0.22 MPa, la cual equivale a la fuerza de reacción de 10 toneladas. Además, la placa tiene un radio de 380 mm. La tabla 2 muestra los módulos de superficie para cada valor de deflexión.

Tabla 2: Resultados del módulo de superficie

Variante	Deflexión (mm)	Módulo de superficie (MPa)
Suelo natural	2.48	46.5
Suelo con geocelda	1.13	102.0

Esto evidencia que con el uso de las geoceldas se producen mejoras significativas en la resistencia del suelo. Según las características del suelo natural, este tiene relación con un suelo 5% de CBR, por lo que la subrasante es considerada de baja calidad. Sin embargo, la implementación de las geoceldas optimiza las características del suelo y le permite a la subrasante recibir tráfico pesados.

5. 2. Influencia De La Profundidad De Colocación

Uno de los aspectos más importantes en la aplicación de geomateriales es la profundidad a la que se colocan, de modo que algunos autores reportan que pueden implementarse a la altura de la superficie o en su defecto se agrega un determinado espesor a base del mismo material (geocelda) [20-26-27]. Por consiguiente, se desarrolló un análisis para analizar el efecto que puede generar la instalación de la geocelda en el recubrimiento del suelo. Para ello se elaboraron cinco modelos con una geocelda de 150 mm de espesor y se varió el recubrimiento desde cero hasta veinte centímetros (figura 19). La variable de control es el módulo de superficie, que va en dependencia de la deflexión.

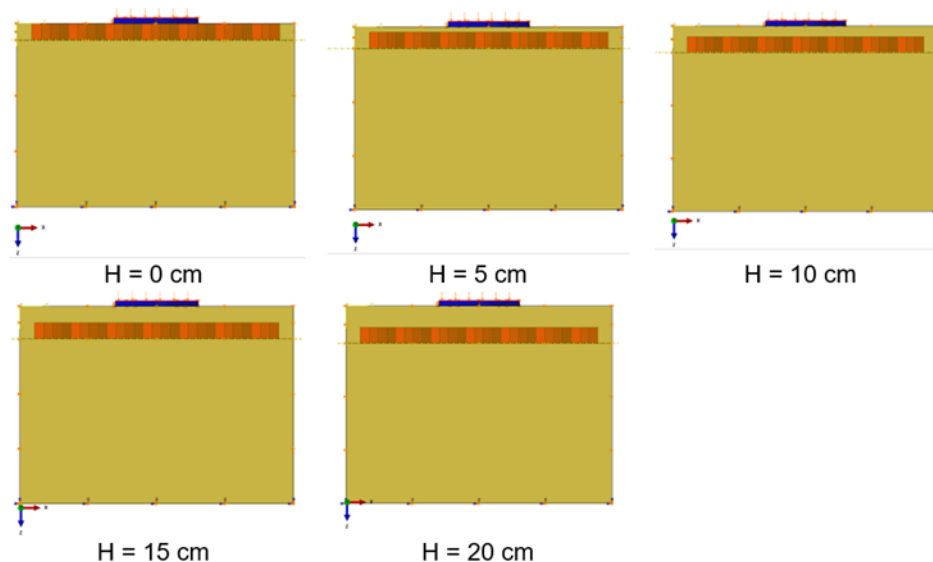


Figura 20: Profundidades evaluadas en la investigación.

Las deflexiones disminuyen en todos los casos contrastados con el suelo natural. La figura 21 evidencia que a medida que aumenta el recubrimiento las deflexiones disminuyen, ya que el suelo de aporte comienza a incrementar la rigidez de la capa. A partir de los resultados de las deflexiones, se puede observar cómo se comportan los módulos de superficie (tabla 3).

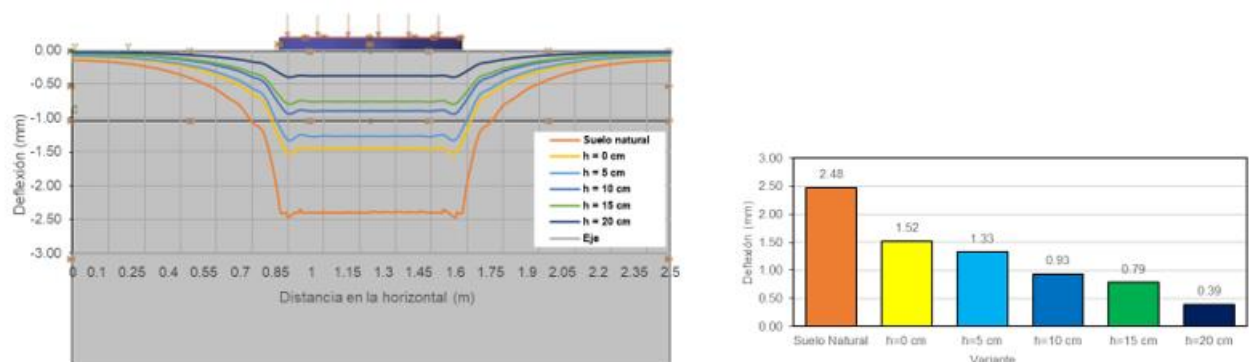


Figura 21: Cuenco de deflexiones para distintos espesores de recubrimientos.

Tabla 3: Resultados del módulo de superficie.

Variante	Deflexión (mm)	Módulo de superficie (MPa)
Suelo natural	2.48	46.55
h= 0 cm	1.52	75.64
h= 5 cm	1.33	86.84
h= 10 cm	0.93	123.41
h= 15 cm	0.79	146.55
h= 20 cm	0.39	293.10

A partir de la tabla 3 es posible determinar una relación entre el recubrimiento sobre las geoceldas y el incremento en el módulo de superficie, lo cual se confirma en los datos expuestos en la figura 22. Independientemente del notable aumento de la resistencia es preciso evaluar el criterio económico [20-28], por ejemplo, en la tabla 3 se pudo ver que sin colocar recubrimiento ya se tiene una mejora notable en la resistencia, por tanto, conociendo las características del tráfico de proyecto se debe seleccionar el mínimo espesor que satisfaga las condiciones requeridas.

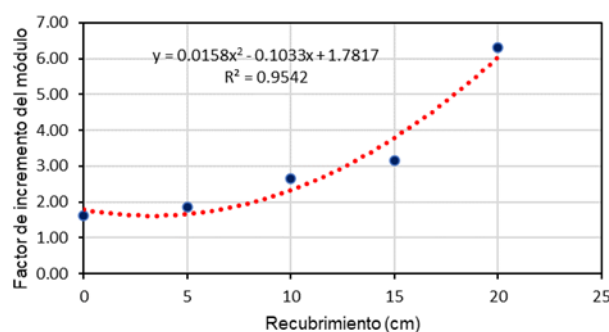


Figura 22: Incremento del módulo de superficie en función del recubrimiento.

6. CONCLUSIONES

Con el empleo de modelos computacionales se logró replicar el ensayo de placa para la realización de estudios relacionados con el reforzamiento de suelos con sistemas de confinamiento celular. Estos modelos fueron validados a través de datos experimentales y presentaron alta fiabilidad y un bajo requerimiento computacional.

Se pudo establecer una relación entre el recubrimiento y el incremento en la resistencia a partir de una ecuación de regresión parabólica que se ajustó a los experimentos realizados con aplicación de geoceldas.

El recubrimiento en las geoceldas aumenta la resistencia del conjunto estructural, pero encarece la solución, por tanto, debe existir un balance económico que garantice la sostenibilidad y factibilidad de este proyecto.

Finalmente, los resultados obtenidos en la presente investigación permiten concluir que las geoceldas son un material que puede emplearse como refuerzo para mejorar el rendimiento de la capa del pavimento, aportando mejoras en el diseño, construcción y mantenimiento de suelos expansivos, lo que a su vez brinda un soporte estable y uniforme y evita la formación de surcos y grietas en pavimentos.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa GEOMATRIX con su producto Conficell LS y al equipo del Departamento de Estudios y Proyectos Técnicos del Gad Municipal del Cantón Portoviejo.

1. A. Emersleben and N. Meyer, "The use of geocells in road constructions over soft soil: vertical stress and falling weight deflectometer measurements," in *Proceedings of 4th European Geosynthetics Conference, Edinburgh, UK*, 2008, pp. 2-7. <https://www.prs-med.com/wp-content/uploads/2016/11/BearingCapacity3.pdf>
2. M. Al Qurishee, "Application of geosynthetics in pavement design," *Int Res J Eng Technol*, vol. 4, no. 7, pp. 1-7, 2017. https://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:0pRU_-wlrHUJ:scholar.google.com/&hl=es&as_sdt=0,5
3. H. Alimohammadi, J. Zheng, V. R. Schaefer, J. Siekmeier, and R. Velasquez, "Evaluation of geogrid reinforcement of flexible pavement performance: A review of large-scale laboratory studies," *Transportation Geotechnics*, vol. 27, p. 100471, 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214391220303597>
4. G. P. Macharia, "Geosynthetics in road pavement design and construction in Kenya", University of Nairobi, 2019. http://erepository.uonbi.ac.ke/bitstream/handle/11295/106850/Macharia_Geosynthetics%20in%20Road%20Pavement%20Design%20and%20Construction%20in%20Kenya.pdf?sequence=1&isAllowed=y
5. M. Vibhoosha, A. Bhasi, and S. Nayak, "A review on the design, applications and numerical modeling of geocell reinforced soil," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 39, pp. 4035-4057, 2021. <https://www.scinapse.io/papers/3155440370>
6. R. Gedela and R. Karpurapu, "Laboratory and numerical studies on the performance of geocell reinforced base layer overlying soft subgrade," *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 7, pp. 1-18, 2021. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40891-020-00249-4>
7. S. G. Babu and P. Kumar, "An approach for evaluation of use of geocells in flexible pavements," in *Journal of the Indian Roads Congress*, 2012: Indian Geotechnical Society, pp. 159-168. <http://eprints.iisc.ac.in/49273/>
8. K. Mamatha and S. Dinesh, "Performance evaluation of geocell-reinforced pavements," *International Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 277-286, 2019. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19386362.2017.1343988>
9. *Especificaciones generales especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes*, MOP-001-F2002, Quito, Ecuador, 2002. https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/01/MPR_Chimborazo_Cumanda_Especificaciones-Tecnicas-MOP-001-F-2002.pdf
10. *Standard Test Method for Nonrepetitive Static Plate Tests of Soils and Flexible Pavement Components for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements*, ASTM-D1196, Estados Unidos, 2012. <https://www.astm.org/d1196-93r04.html>
11. D. M. Burmister, L. Palmer, E. Barber, and T. Middlebrooks, "The theory of stress and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways," in *Highway Research Board Proceedings*, 1944, vol. 23. <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbproceedings/23/23-016.pdf>
12. L. O. M. Ibañez, "Análisis del comportamiento geotécnico de las cimentaciones sobre pilotes sometidas a carga axial mediante modelación matemática.," Tesis de Doctorado, Facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara, Cuba, 2001.
13. W. Cobelo, "Contribución al análisis estructural y al diseño geotécnico de cimentaciones tronco cónicas bajo carga axial simétrica en estructuras tipo torre.," Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería Civil, Departamento de Geotécnica, ISPJAE, La Habana, Cuba, 2004.
14. J. L. L. Broche, "Conceptualización del comportamiento estructural de las cimentaciones superficiales asiladas aplicando técnicas de modelación numérica.," Tesis de Doctorado, Facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba, 2005.
15. I. L. G. Pérez, "Evaluación de pistas aéreas de pavimentos flexibles basándose en el método de ACN-PCN con la combinación de técnicas de modelación e instrumentación," Tesis de Doctorado, Facultad de construcciones, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba, 2008.
16. R. V. Siddharthan, N. Krishnamenon, M. El-Mously, and P. E. Sebaaly, "Validation of a pavement response model using full-scale field tests," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 85-93, 2002. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10298430290030595>

17. A. T. Papagiannakis and E. A. Masad, *Pavement design and materials*. John Wiley & Sons, 2008. https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=wipJ0qBvv40C&oi=fnd&pg=PA1&dq=%5B17%5D%09A.+T.+Papagiannakis+and+E.+A.+Masad,+Pavement+design+and+materials.+John+Wiley+%26+Sons,+2008.&ots=AoEWjM93KH&sig=0H6o_8X1n2zpDVwk8iEekZLuavQ&redir_esc=y#v=onepage&q=%5B17%5D%09A.%20T.%20Papagiannakis%20and%20E.%20A.%20Masad%2C%20Pavement%20design%20and%20materials.%20John%20Wiley%20%26%20Sons%2C%202008.&f=false
18. P. Ullidtz, "Pavement analysis. Developments in civil engineering," *Elsevier, Amsterdam*, vol. 3, no. 5556, p. 034, 1987. <https://trid.trb.org/view/279429>
19. Y. H. Huang, *Pavement analysis and design*, Second Edition ed. University of Kentucky: Pearson Prentice Hall, 2004, p. 785. <https://vdocuments.mx/pavement-analysis-and-design-yang-h-huang-2nd-edition.html>
20. L. M. P. Baque and F. M. H. López, "Modelo computacional para analizar el comportamiento de geomallas biaxiales aplicadas en el reforzamiento de suelos para pavimentos," *Revista Ciencia y Construcción*, vol. 3, no. 2, pp. 68-83, 2022. <https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/112>
21. H. Ge, J.C. Quezada, V. Le Houerou, and C. Chazallon, "Multiscale analysis of tire and asphalt pavement interaction via coupling FEM–DEM simulation", *Engineering Structures*, vol. 256, pp. 113925, 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029622000827>
22. N.D. Beskou, and E.V. Muho, "Microstructural effects on dynamic response of rigid and flexible pavements to moving load under plane strain", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 163, pp. 107544, 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026772612200389X>
23. I. R. Sheikh, P. Mandhaniya, and M. Shah, "A parametric study on pavement with geocell reinforced rock quarry waste base on dredged soil subgrade", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 7, pp. 1-11, 2021. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40891-021-00275-w>
24. E. A. Rodríguez, F. M. H. López, E. T. Piusseaut, and C. A. R. Morfa, "Instrumentación en pavimento de hormigón simple para estudios de tensiones originados por gradientes de temperatura", *Revista Española "Carreteras"*, no. No. 231, pp. pp. 79-87, 2020. https://www.researchgate.net/profile/Felix-Hernandez-Lopez/publication/366136738_Instrumentacion_en_pavimento_de_hormigon_simple_para_estudios_de_tensiones_originados_por_gradientes_de_temperatura/links/6392ae9c484e65005bf65538/Instrumentacion-en-pavimento-de-hormigon-simple-para-estudios-de-tensiones-originados-por-gradientes-de-temperatura.pdf
25. Y. H. Huang, *Pavement analysis and design*. Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 2004. https://testbank4textbook.com/pdf_samples/Solutions_Manual_for_Pavement_Analysis_and_Design_2nd_Edition_by_Huang_sample_chapter.pdf
26. L.L.R. Zipoli, and J.A. Neto, "Evaluation of back-calculated elastic moduli of unreinforced and geocell-reinforced unbound granular material from full-scale field tests", *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 50, pp. 910-921, 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266114422000619>
27. V. Hasthi, M.N.A. Raja, A. Hegde, and S.K. Shukla, "Experimental and intelligent modelling for predicting the amplitude of footing resting on geocell-reinforced soil bed under vibratory load", *Transportation Geotechnics*, vol. 35, pp. 100783, 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214391222000678>
28. M.P. Vibhoosha, A. Bhasi, and S. Nayak, "A review on the design, applications and numerical modeling of geocell reinforced soil". *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 39, pp. 4035-4057, 2021. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10706-021-01774-3>