

Modelo Computacional Para Analizar El Comportamiento De Geomallas Biaxiales Aplicadas En El Reforzamiento De Suelos Para Pavimentos

Computational Model To Analyze The Behavior Of Biaxial Geogrids Applied In Soil Reinforcement For Pavements

Autores

Luis Miguel Pincay Baque¹, Félix Michael Hernández López²

¹ Ingeniero Civil Universidad Técnica de Manabí UTM, Avenida Urbina, y, Portoviejo 130105, Ecuador, luispincay23@hotmail.com

² Doctor en Ciencias Profesor Titular de la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría CUJAE, Calle 114 # 11901 / Ciclovía y Rotonda CP 19390, La Habana Cuba, fmichaelhl@gmail.com

RESUMEN

El artículo presenta los resultados de la modelación computacional de una capa de pavimento reforzada con una geomalla biaxial, para ello se emplea un software multipropósito basado en el método de los elementos finitos ABAQUS/CAE. Inicialmente, se explican las diferentes etapas del proceso de modelación computacional de un ensayo de módulo de superficie, en dicho proceso se va transitando por cada una de las invariantes detallando las principales características e hipótesis tomadas en los modelos de carga, las condiciones de borde y las características de los materiales. Posteriormente, se realiza una calibración matemática y física de los resultados tomando como referente un programa experimental. Luego de definir el modelo se realiza un estudio donde primero se analizan los distintos mecanismos de comportamiento de la estructura reforzada y los mismos son contrastados con lo que plantean las referencias bibliográficas. Finalmente, se realiza un análisis cuantitativo de cuanto mejora el comportamiento de la estructura con la inclusión del refuerzo a distintas profundidades.

Palabras claves: Geomalla biaxial, modelación computacional, pavimentos.

ABSTRACT

The article presents the results of the computational modeling of a pavement layer reinforced with a biaxial geogrid, for which a multipurpose software based on the ABAQUS/CAE finite element method is used. Initially, the different stages of the computational modeling process of a surface modulus test are explained. In this process, each one of the invariants is explained, detailing the main characteristics and hypotheses taken in the load models, the boundary conditions and the characteristics of the materials. Subsequently, a mathematical and physical calibration of the results is carried out, taking as a reference an experimental program developed by an author in the bibliography. After defining the model, a study is carried out where first the different behavior mechanisms of the reinforced structure are analyzed and they are contrasted with what the bibliographical references suggest. Finally, a quantitative analysis is made of how much the behavior of the structure improves with the inclusion of the reinforcement at different depths.

Keywords: Biaxial geogrid, computational modeling, pavements.

1. INTRODUCCIÓN

El empleo de las geomallas es considerado en el mundo como una técnica efectiva para mejorar el comportamiento y alargar el servicio de diversas estructuras de tierra (Ej. Terraplenes, taludes, cimentaciones, muros de contención y pavimentos.) En el caso particular de los pavimentos han sido de gran utilidad tanto en el reforzamiento de vías no pavimentadas como en aquellas que cuentan con un paquete estructural.

El aporte de la geomalla en los pavimentos centra sus bases en tres mecanismos resultantes de la interacción de esta con el suelo a reforzar [1-3] : El confinamiento lateral, el aumento de la capacidad de carga y el efecto de membrana tensada. Figura 1.

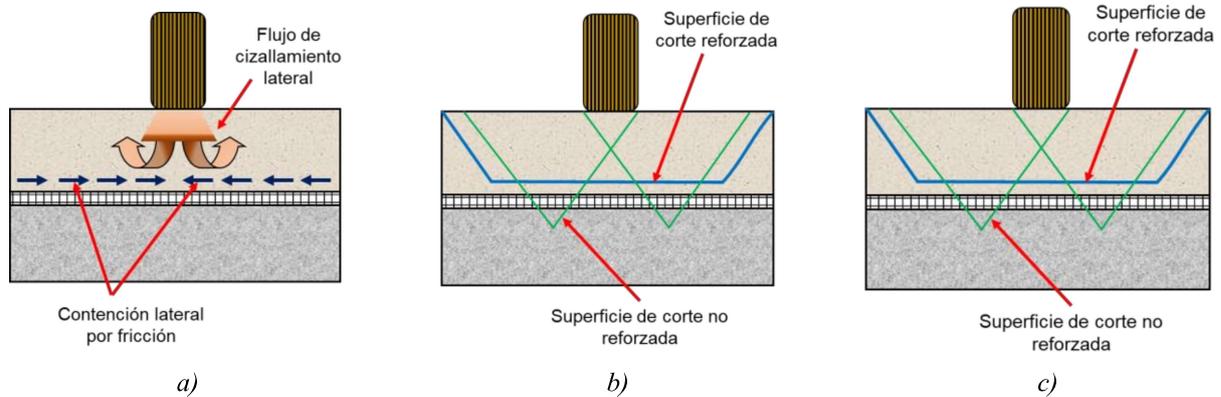


Figura 1: Mecanismos provocados por el reforzamiento: a) confinamiento lateral; b) aumento de la capacidad de carga; y c) efecto de membrana extensible.

El principal mecanismo asociado con la función de reforzamiento para pavimentos flexibles es la restricción lateral o confinamiento [4]. El nombre de este mecanismo puede ser engañoso ya que la restricción se desarrolla a través de una fricción en la interfaz entre el geosintético y el árido, por lo tanto el mecanismo es de resistencia al esfuerzo cortante en la interfaz [5]. Cuando una capa de pavimento compuesta por árido es sometida a la carga de tráfico, el árido constituyente de la capa tiende a moverse lateralmente a menos que su movimiento se encuentre impedido por la subrasante o por el reforzamiento con el geosintético. La interacción entre los áridos de la capa de base y el geosintético permite la transferencia del esfuerzo cortante desde la capa de base a un esfuerzo de tracción en el geosintético. La rigidez a tracción del geosintético limita las deformaciones laterales en la capa de base. Además, el geosintético confina la capa de base, lo que aumenta su tensión media y por tanto aumenta la resistencia al esfuerzo cortante. Ambas características, de fricción y de confinamiento en la interfaz entre el suelo y el geosintético, contribuyen a este mecanismo. Por consiguiente, las aberturas de la geomalla y el tamaño del material de la capa de base deben estar en consonancia [6]. Un geotextil con una buena capacidad de fricción también puede proporcionar resistencia a la tracción para el movimiento lateral de los áridos.

La mayoría de estudios relacionados con el comportamiento de estas subestructuras están ligados a investigaciones experimentales tanto a escala reducida como en tramos de pruebas [6-8]. Durante los últimos años con el avance de los ordenadores se ha potenciado cada vez más el empleo de las herramientas numéricas para la evaluación de las geomallas dentro de la estructura, en este sentido el método de los elementos finitos (MEF) y el método de los elementos discretos [9] han constituido las herramientas más empleadas por eficiencia para predecir los desplazamientos, las tensiones e incluso la falla del sistema. El presente artículo tiene como objetivo fundamental evaluar el comportamiento de bases no aglomeradas reforzadas con una geomalla biaxial en pavimentos flexibles, para ello combinará los resultados experimentales con los modelos computacionales de un sistema multicapa de Burmister.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Modelo experimental

Para el desarrollo del artículo se toma como referente para el proceso de calibración y validación los resultados de un ensayo de módulo de superficie desarrollados en la Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas de la Universidad Técnica de Manabí (UTM), Figura 2. El objetivo del experimento fue evaluar el comportamiento de pavimentos rígidos antes varias solicitaciones. Para ello se construyeron dos tipos de cimiento uno compuesto por el suelo natural de la zona y otro con una capa de subbase granular (Subbase Clase III) de 25 cm de espesor.



Figura 2: Tramo experimental construido en la UTM.

Para la preparación del cimiento del tramo, primero, se caracterizaron sus materiales componentes a partir de tomar muestras y llevarlas al laboratorio para realizar los ensayos pertinentes. Los materiales ensayados fueron el suelo del sitio de construcción y un material granular traído desde una cantera ubicada dentro del cantón Portoviejo clasificada como base Clase III. Se realizaron ensayos de granulometría e índices de consistencia, el ensayo Proctor con el objetivo de obtener la humedad óptima y máxima densidad, necesarios para los controles de compactación en la obra y precisar el valor de CBR (Índice Soporte de California) para el diseño.

Tabla 1: Tabla resumen de los resultados de caracterización del suelo.

Propiedad	Subrasante	Subbase Granular (Clase III)
Límite líquido	44.1	38.9
Límite plástico	27.2	30.2
Índice de Plasticidad (%)	16.9	8.7
Clasificación	A-7-6 (IP >LL-30)	A-2-4
Densidad seca (kg/m ³)	1382	1860
Humedad óptima P.M (%)	28.78	15.2
CBR (%)	3.9	61

El objetivo de la prueba de carga fue determinar módulo de reacción (k) del cual también se extrajo el módulo elástico en la superficie. Para la realización del ensayo se colocó un camión de aproximadamente 40 ton como contrapeso y una viga metálica de referencia tal como se muestra la Figura 3, debajo de la placa se colocó arena para lograr uniformidad en el momento de aplicación de la carga. La prueba se lleva a cabo según la norma ASTM- D1195 [11] empleando una placa de 76 mm de diámetro y 2 mm de espesor y comparadores de carátulas de 10 mm de rango y precisión una centésima de milímetro.



Figura 3: Preparación del ensayo con placa de carga estática.

A continuación, se muestran en una tabla y gráfico los resultados:

Tabla 2: Resultados del ensayo con placa de carga realizado en la UTM

Presiones en el experimento	Carga aplicada	Presión en la placa	Presión en la placa	Desplazamiento	Desplazamiento		
					psi	N	MPa
0	0.0	0.000000	0.00	0	0.00000	0.000000	0.000
750	9159.8	0.020084	20.08	0.006	-0.00015	-0.000681	-0.681
1750	21251.8	0.046598	46.60	0.025	-0.00064	-0.001580	-1.580
2750	33343.8	0.073112	73.11	0.0438	-0.00111	-0.002479	-2.479
3750	45435.8	0.099626	99.63	0.1108	-0.00281	-0.003377	-3.377
4750	57527.8	0.126140	126.14	0.1765	-0.00448	-0.004276	-4.276
5750	69619.8	0.152654	152.65	0.1885	-0.00479	-0.005175	-5.175

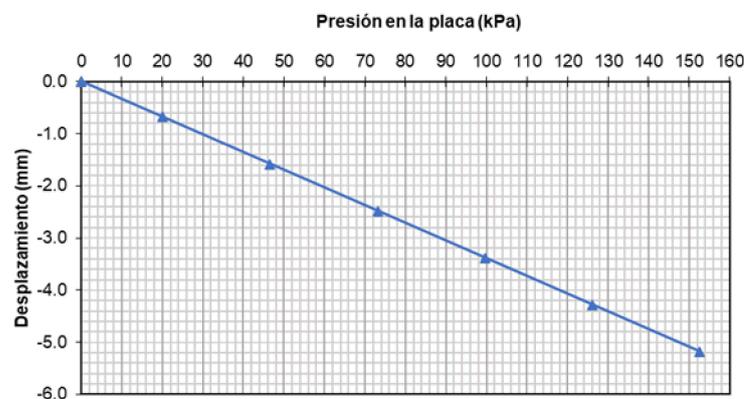


Figura 4: Preparación del ensayo con placa de carga estática.

2.2. Modelo numérico

La construcción del modelo numérico toma como punto de partida la prueba realizada en la UTM inicialmente, se modelará el suelo sin refuerzo para contrastar y calibrar los resultados (tipo y cantidad de elementos finitos) con el experimento. Luego, al modelo validado se le colocará una geomalla biaxial a una profundidad de 100 mm para analizar el comportamiento del refuerzo dentro de la estructura tomando como referencia lo planteado en la literatura. Finalmente, se analizará como influye la colocación del refuerzo y se cuantificará su aporte en la estructura. A continuación, se describirán las invariantes del modelo que generaliza el estudio (modelo reforzado con geomalla biaxial). El programa computacional para la realización del estudio será el ABAQUS/CAE.

a) Geometría

La geometría del modelo al simular un ensayo de placa constituye un problema con infinitos grados de libertad, por tanto, es necesario considerar un medio de dimensiones finitas descrito por un macizo elástico y continuo. El modelo se construyó de acuerdo a la teoría de capas elásticas de [12] siguiendo los criterios del “modelo de una capa con placa rígida de carga”. Como el modelo fue validado con resultados experimentales realizados en la UTM, se siguieron las recomendaciones de la norma de ensayo estático con placa de carga [11] empleados para este propósito.

El dominio se representa como un semiespacio continuo, las dimensiones de este dominio se establecieron teniendo en cuenta el criterio de autores como [13-16] a fin de evitar que la cercanía del contorno pueda distorsionar los resultados. Aprovechando la ventaja que ofrece la simetría del experimento solo se modelará la cuarta parte del medio, permitiendo disminuir considerablemente el costo computacional de la solución figura 5

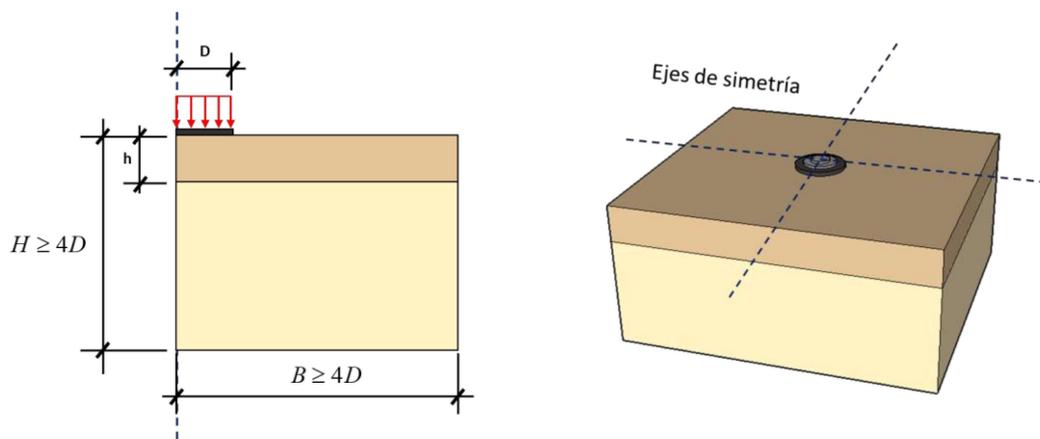
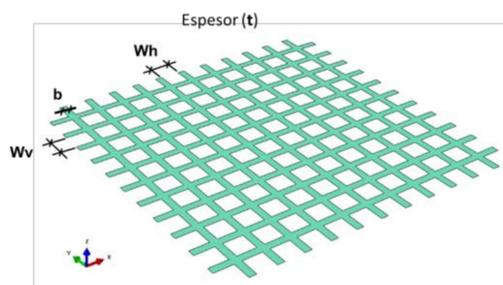


Figura 5: Esquema del modelo tridimensional del suelo.

La geomalla se modeló como un sólido 3D (figura 6), teniendo en cuenta las dimensiones de las aberturas y el espesor de la geomalla. A continuación, se presenta esquema con las características geométricas de la de geomalla empeladas en la investigación.



- Abertura en la dirección horizontal (W_h): 34 mm
- Abertura en la dirección vertical (W_v): 34 mm
- Ancho de la membrana (b): 4 mm
- Espesor de la membrana (t): 1.0 mm

Figura 6: Dimensiones de la geomalla empleada en la investigación.

b) Modelación constitutiva del material

La modelación del material se desarrolló teniendo en cuenta que el módulo en la superficie es un parámetro elástico, por eso, se toma un modelo constitutivo lineal elástico con módulo de elasticidad (relacionado con el módulo resiliente para los modelos de respuesta en pavimentos) y el coeficiente de Poisson (ν), ambos fueron estimados en función de la clasificación de los suelos de subrasante y subbase a partir de trabajos realizados por [17]. En la validación del modelo estas propiedades se estimaron a partir de la clasificación de los suelos del tramo experimental de la UTM. Los resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3: Propiedades elásticas 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	35-93	55	0.3-0.4	0.35

La geomalla está conformada por polímero de alta densidad con un módulo de elasticidad de 605 MPa y un coeficiente de Poisson de 0,2. La tensión máxima de la tela a tracción es 292 kN/m para una deformación de 2%. En el caso del análisis 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 del material.

c) Condiciones de contorno e interacciones

Teniendo en cuenta el costo computacional que representa modelar el continuo completo cuando el modelo tenga la geomalla y aprovechado las ventajas de comportamiento simétrico del problema, se decide realizar la primera simplificación geométrica en ambos modelos tomando la cuarta parte del modelo tridimensional. En este sentido las condiciones de contorno juegan un papel primordial ya que determinan las restricciones de simetría. Existe la posibilidad de realizarlo de forma axial-simétrica pero el análisis posterior del comportamiento de la geomalla biaxial condiciona que el análisis se realice en tres dimensiones.

Para lograr estas condiciones de simetría en el eje “Y” se restringe los grados de libertad en ese sentido (el desplazamiento y todos los giros), de igual forma se realiza en el eje “X”. A 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 máximo desplazamiento obtenido en el ensayo de placa). Ver figura 7.

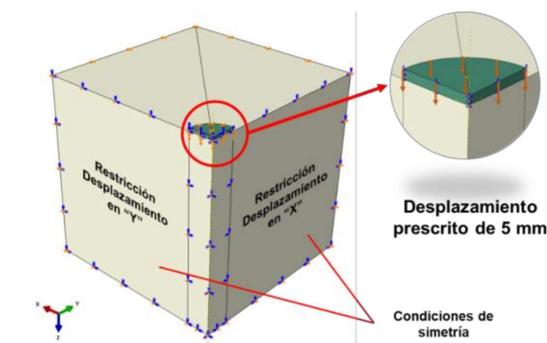


Figura 7: Condiciones de contorno de ambos modelos numéricos.

En el modelo existirán dos relaciones de interacción. La primera es entre las superficies de los suelos de subbase y subrasante. En esta interacción se consideran ambos suelos totalmente vinculados por tanto se toma un contacto del tipo “Tie”. La segunda es entre el suelo de subbase y la geomalla en este caso se modeló considerando que el suelo se introduce dentro de los huecos de la geomalla para ello se tomaron dos superficies de contacto (maestra/esclava) completamente adheridas tal como plantean [18, 19] . Esto evitará que ocurra un deslizamiento en la interfaz dentro del suelo y permitirá evaluar el efecto de confinamiento lateral en el suelo. Estas restricciones basadas en la superficie se aplican mediante la eliminación de los grados de libertad de la superficie esclava para mantener el mismo movimiento de transición y rotación igual a los de la superficie maestra. Para lograr esto se asigna el suelo como superficie maestra y la geomalla como superficie esclava (figura 8).

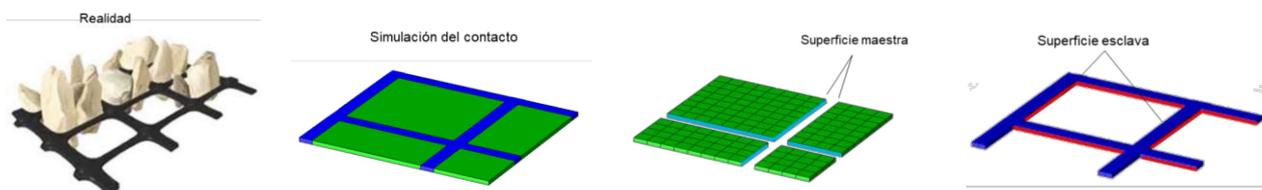


Figura 8: Interacción entre el suelo de subbase y la geomalla biaxial

d) Aplicación de las cargas

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, figura 9. Esto se demuestra con la expresión que describe la distribución de presiones para ese caso obtenida por [20] reflejada también en el libro de [21].

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

$$\text{si } r = a \therefore q \rightarrow \infty$$

a: radio de la placa

q: valor medio de la presión.

r: posición del punto en la función

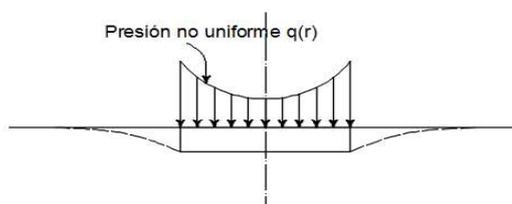


Figura 9: Representación del modelo teórico de una placa rígida en el pavimento.

Para modelizar este efecto en el software, se asignó una restricción del tipo “coupling” sobre un punto de referencia. Este tipo de restricción permite que tanto los desplazamientos como los esfuerzos que se apliquen sobre el punto de referencia sean distribuido en una superficie definida uniformemente. Para simular el ensayo se coloca una carga incremental que se controla en el paso del cálculo en forma de rampa con incrementos del 10% del total a aplicar hasta llegar al 100% (0,7 MPa), en este punto se determina cual es la deflexión en el suelo en el centro de la placa.

e) Simplificaciones geométricas (análisis de dominio)

Las características geométricas de la geomalla y del sistema de suelo provocan que el costo computacional de la solución sea extremadamente grande debido al elevado número de elementos finitos, incluso antes de hacer el análisis de la sensibilidad de la malla. Por tanto, es conveniente analizar el tamaño del dominio para realizar posibles simplificaciones en la geometría. Para realizar este análisis se tomó el modelo sin geomalla (mayores deflexiones) y se considera que la cercanía de las condiciones de borde en el modelo puede generar distorsiones en los resultados, es por ello que se analiza en la horizontal hasta dónde se propaga el efecto de la deflexión (U3), mientras que en la vertical se evaluará hasta que profundidad se propagan las tensiones (S33).

Se construye del mismo modelo del experimento dos gráficos de distancia vs variable analizada que se muestran a continuación.

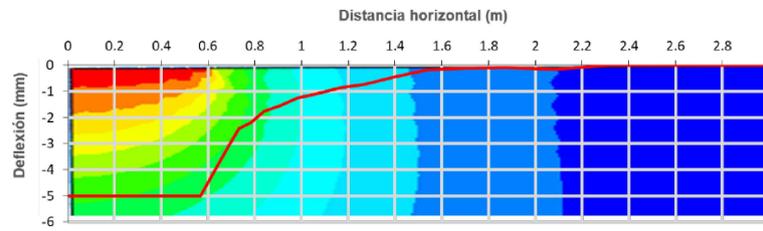


Figura 10: Análisis de las deflexiones en la dirección horizontal.

Como puede observarse en la Figura 10, a medida que 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 de 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 anteriormente a la mitad (1,5 m), al ser simétrico el dominio en las direcciones de "X" y "Y" queda reducido al mismo valor.

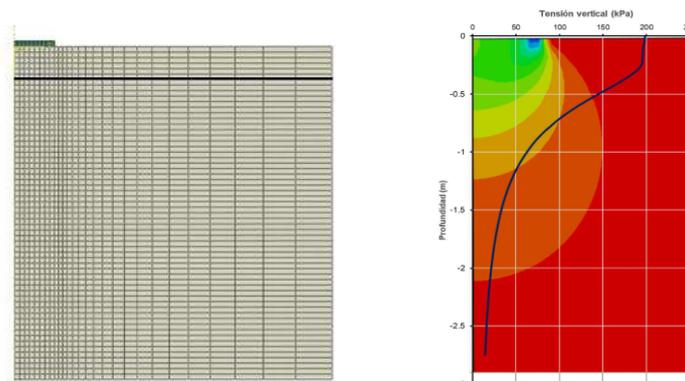


Figura 11: Análisis de las tensiones en la vertical.

La figura 11 muestra cómo se van disipando las tensiones en la profundidad encontrándose en la superficie los mayores valores. Se puede observar que sobre la profundidad aproximadamente de 2 m los valores de tensiones son muy pequeños, 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 1,5 x 1,5 x 2 m permitiendo así que se reduzcan un número considerable de elementos finitos tanto en el suelo como en la geomalla.

f) Calibración matemática y física de los resultados

A partir de estudios realizados con anterioridad [9, 18, 19, 22] en estos modelos solo se varió la densidad de malla sin cambiar el tipo de elemento o esquema de integración. Se probaron 10 densidades en la zona de interés, partiendo de una malla gruesa (100 mm) hasta una muy densa (10 mm), en cada caso se extrajo la variable de respuesta (presión debajo del centro de la placa marcado en rojo) Figura 12.



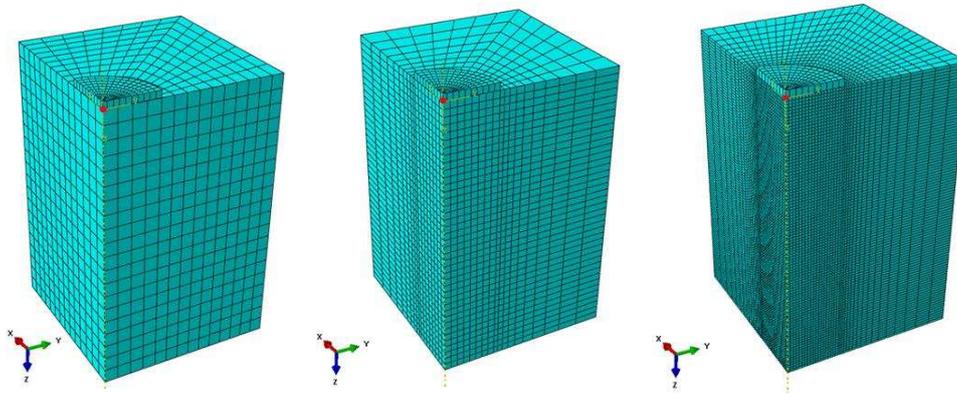


Figura 12: Ejemplo de la progresión que sigue el incremento de la densidad de malla en el suelo de subrasante.

Las variantes se representaron en un gráfico para evaluar el comportamiento de la variable de respuesta y definir cuando el modelo estabiliza la solución. El hardware empleado para la simulación fue un Procesador Core i5 con una memoria RAM de 8 Gb. Conocer las características hardware es importante pues el proceso de calibración está condicionado por la disponibilidad computacional. Los resultados se muestran en el siguiente gráfico.

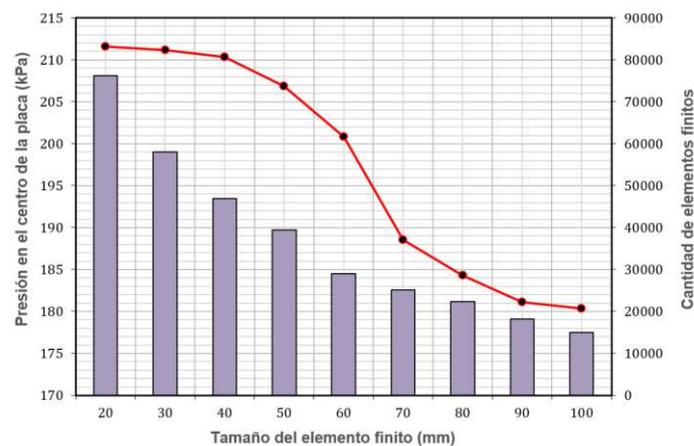


Figura 13: Análisis de la densidad de malla en los modelos del suelo

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 (50 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 (10 mm) no aparece en el gráfico ya que el costo computacional del modelo superó la disponibilidad de cómputo que se tenía para la investigación.

Después de una valoración de los criterios antes tratados, se decidió adoptar la densidad de malla del modelo (40 mm), ya que este se encuentra dentro del rango estable de la solución y el costo computacional no es elevado.

g) 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 3) y en cada caso se extrajo en el mismo punto de control, la presión que es necesaria ejercer en el 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 muestra un gráfico con los resultados.

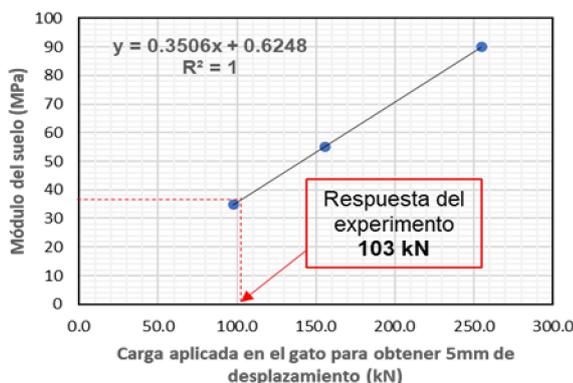


Figura 14: Carga aplicada para obtener 5.0 mm de deflexión teniendo en cuenta el intervalo de confianza de las resistencias del suelo.

En la figura 15 se puede validar los resultados comparando el modelo numérico sin calibrar (valor medio del módulo de la capa)

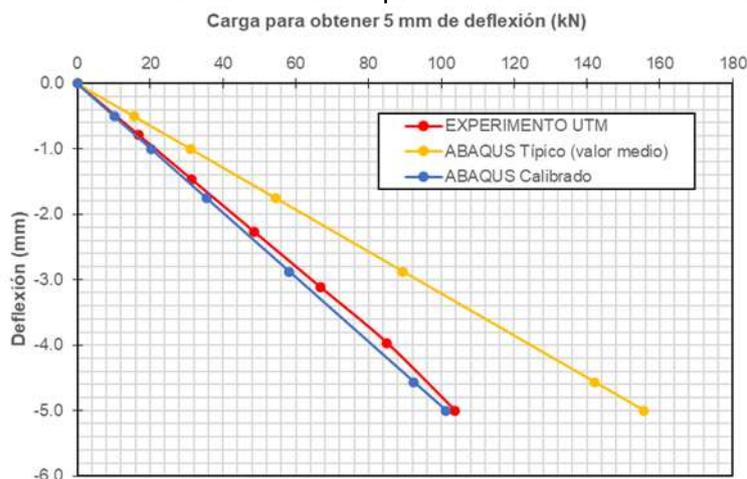


Figura 15: Comparación de los resultados del modelo numérico sin calibrar y el calibrado con el experimento.

Como se observa en el gráfico, el modelo calibrado físicamente se comporta similar al ensayo físico [23]. 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 de una geomalla biaxial.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los resultados obtenidos en la calibración matemática del problema y su validación con los resultados experimentales, se puede utilizar el modelo para determinar el aporte resistente de las geomallas biaxiales en capas de pavimentos. Para ello primeramente se estudiará el efecto que tienen estas en el suelo tratando de verificar su comportamiento mecánico, tal y como lo describen los autores en la bibliografía. Se realizará un estudio de la profundidad de colocación de la geomalla. Finalmente, se concluye con un análisis cuantitativo de cuanto es el aporte resistente.

3.1. Análisis del comportamiento de las geomallas biaxiales en el suelo

Para definir el comportamiento de las geomallas en el suelo se parte de corroborar lo planteado por los autores relacionado con su principio de funcionamiento. Para la realización del estudio se confeccionaron dos modelos numéricos correspondiente a un ensayo con placa de carga (con geomallas y sin ellas). En los modelos se analizaron el comportamiento de variables exteriores e interiores, estas variables son:

- Deflexión (externa)
- Módulo de superficie (externa)
- Tensión vertical (internas)
- Tensión en la malla (internas)

El análisis de las variables se realiza en forma de imágenes policromáticas y gráficos de comportamiento. En cada caso se contrasta los resultados de la capa sin reforzar con aquellos modelos que tienen colocado la geomalla biaxial. A continuación, se muestra en la figura 16 los dos modelos a los que se hace referencia.

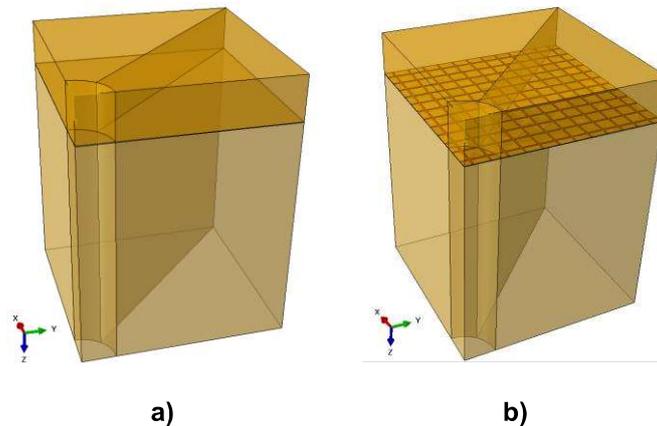


Figura 16: Modelos numéricos empleados en el estudio

El comportamiento de la geomalla se describe a partir de los planteado por [3], relacionado con el desempeño que puede tener este elemento en el suelo. En este caso solo se toma el modelo reforzado con el fin de evaluar los mecanismos en el suelo (figura 17) y como finalmente inciden en el comportamiento resistente.

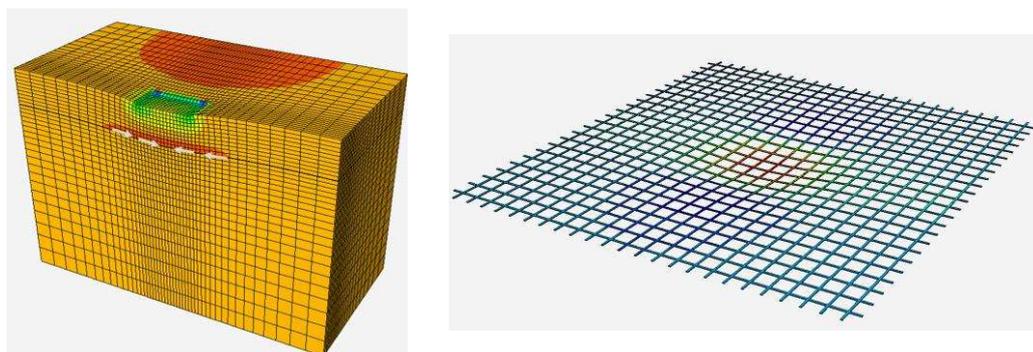


Figura 17: Comportamiento de la geomalla dentro del suelo

En la figura 17 policromática aparecen unas tensiones en la dirección que indican las flechas, esto evidencia el efecto de restricción lateral de la geomalla en el suelo. Este comportamiento es causado por la fricción entre el geosintético y el material subyacente. El material que queda dentro de las oquedades de la geomalla actúa como una fuerza de corte resistente entre las interfaces. Cuando cualquier pavimento está sometido a fuerzas cíclicas (tráfico), el agregado presente en las capas granulares tiende a moverse lateralmente y precisamente este fenómeno reduce considerablemente los desplazamientos laterales permitiendo que la capa obtenga resistencia a estas fuerzas.

Si se analiza solo la geomalla se puede notar que aparecen tensiones de tracción en la zona de influencia de la aplicación de la carga, esto da muestra de otros de los efectos que ofrece las geomallas en el suelo, el “efecto membrana”. El geosintético soportará la carga proveniente del eje funcionando como una membrana tensada, el refuerzo producirá una reacción vertical con el fin de minimizar la acción de la carga producida por el vehículo. Este efecto reducirá la tensión transmitida al lecho del pavimento, otorgándole una mayor capacidad de carga. Ambos efectos aportan en resistencia a la estructura lo cual queda evidenciado en el aumento de los módulos de superficie.

Para realizar estos estudios se trazaron dos líneas de muestreo, tomando como referencia las coordenadas de los puntos cada 4 cm. El muestreo horizontal permitirá evaluar el comportamiento del cuenco de deflexiones y abarca una línea desde el inicio hasta el final de la superficie del dominio. El muestreo vertical inicia en la superficie debajo del centro de la placa y se mueve en la profundidad del suelo. Ver figura 18.

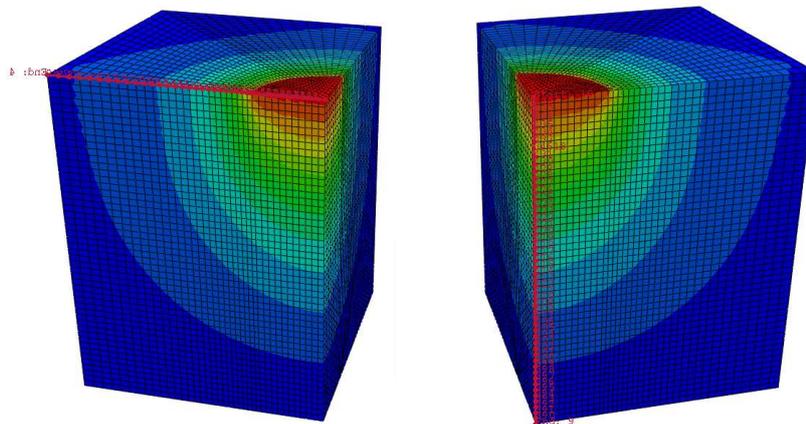


Figura 18: Muestreo de los puntos por coordenadas para analizar el comportamiento de las variables

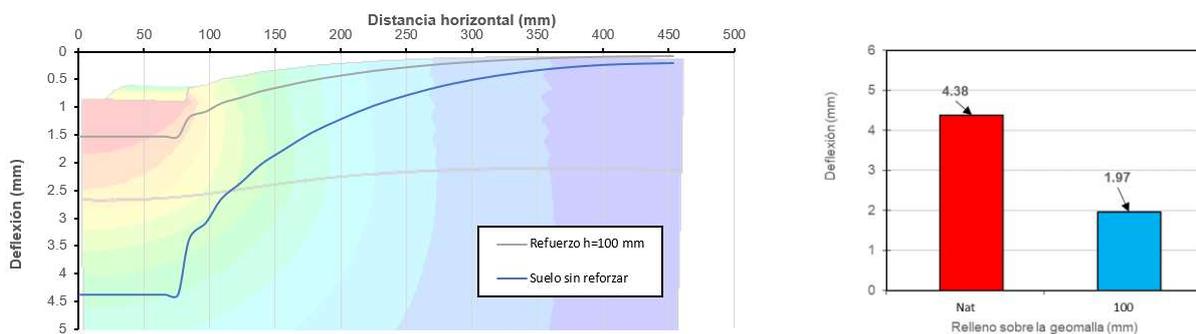


Figura 19: Comportamiento de las deflexiones superficiales

Como resultado del muestreo horizontal puede observarse en ambos gráficos de la figura 19 que existe una reducción considerable de las deflexiones, lo que evidencia el aporte de las geomallas dentro de la masa de suelo. La diferencia entre ambas soluciones es de un 56 %. Esta reducción puede ser traducida a un incremento del módulo de superficie, esta afirmación queda demostrada a partir de sustituir los valores en la expresión derivada de las formulaciones de Boussinesq presentada en el libro [21] definida como:

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

Donde:

- q : Presión ejercida sobre la placa de carga (MPa)
- a : Radio de la placa
- w_o : Deflexión máxima en el centro de la placa
- ν : Coeficiente de Poisson del suelo

La presión ejercida en la placa que se empleó para el desarrollo del estudio es la equivalente a una fuerza de reacción de 10 ton aproximadamente (0,22 MPa), el radio de la placa es de 380 mm. Luego tomando las deflexiones obtenidas se tiene que:

Tabla 3: Resultados del módulo de superficie

Variante	Deflexión	Módulo de superficie (MPa)
Suelo natural	4.35	33.04
Suelo con geomalla	1.13	73.42

Como se observa en la tabla con el empleo de las geoceldas existe un mejoramiento considerable en la resistencia del suelo. Si analizamos el suelo natural se tiene que este corresponde aproximadamente con un suelo de 3,6% de CBR, el cual es considerado como un material de baja calidad y luego de la colocación de las geomallas esta se convierte en un material que por sus características puede ser empleado en subrasantes adecuadas para recibir un tráfico medio.

3.2. Profundidad de colocación

En la práctica profesional una de las principales interrogantes a tener en cuenta para la colocación de esta tecnología es la profundidad de colocación de la geomalla. Algunos las colocan a muy poca altura de la superficie mientras que en otros casos se les cubre con cierto espesor del mismo material.

En la investigación se realiza un análisis donde se pretende determinar el efecto que puede tener en el funcionamiento de la geomalla el recubrimiento. Para ello se construyen un total de cinco modelos con una geomalla de 34 x 34 mm de abertura, se varía el recubrimiento desde 50 hasta 250 mm. En todos los casos la variable respuesta a controlar es la deflexión y por consecuencia el valor del módulo de superficie.

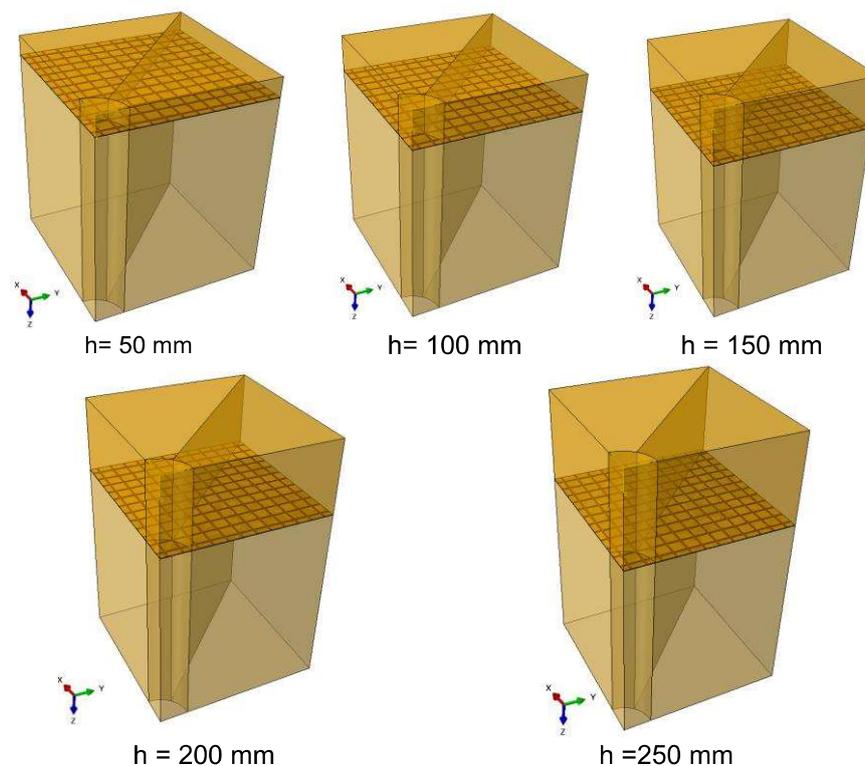


Figura 20: Profundidades analizadas en el estudio

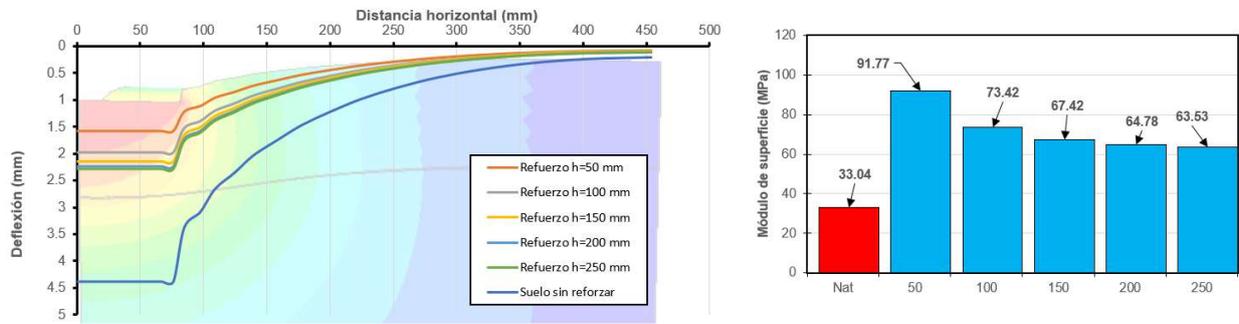


Figura 21: Cuenca de deflexiones y módulos de superficie para distintos espesores por encima de la geomalla

Los valores de las deflexiones (figura 21) se reducen en todos los casos comparado con el suelo natural. Se puede observar que cuando el suelo de recubrimiento supera los 100 mm las deflexiones máximas prácticamente no cambian lo que indica que el aumento del espesor de la capa provoca que gran parte de los esfuerzos sean disipados a través de esta restándole influencia a la geomalla. Para corroborar lo planteado anteriormente se analizó en todos los casos las tensiones de tracción en la geomalla (S11) verificando que a medida que el espesor se incrementa estas tensiones disminuyen, figura 22.

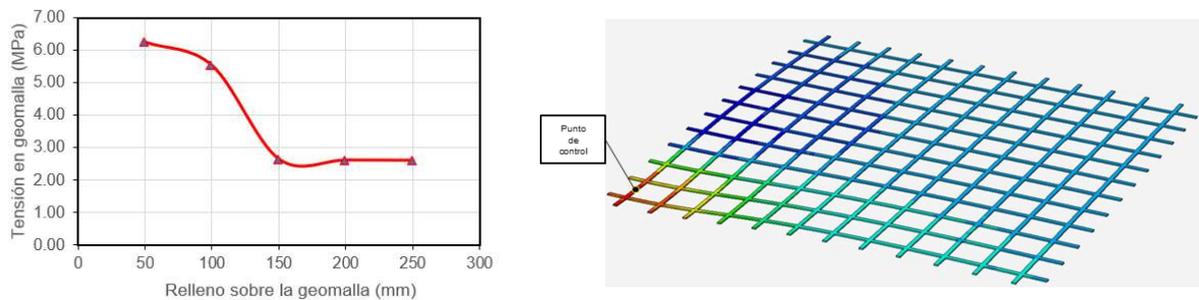


Figura 22: Comportamiento de las tensiones de tracción en la geomalla

3.3. Evaluación del aporte de la geomalla

Para evaluar el aporte de la geomalla en el pavimento, se tomó como referencia el modelo del sistema sin reforzar con un espesor en la base granular de 25 cm (valor usualmente empleado para un tráfico muy pesado). De este modelo se extrae el desplazamiento y por tanto también los valores de módulos de superficie. Posteriormente, se modeló el mismo sistema reforzado con la geomalla, pero en este caso se varió el espesor de la base granular hasta alcanzar el mismo desplazamiento en la superficie del modelo sin reforzar.

Para cuantificar este el aporte se emplea una expresión propuesta por varios autores [22, 24] que establece una relación porcentual entre el sistema reforzado y el sistema sin reforzar.

$$BCR[\%] = \left[\frac{(h_{B, \text{sin reforzar}} - h_{B, \text{Reforzar}})}{h_{B, \text{Reforzar}}} \right] \cdot 100 \quad (2)$$

BCR: Porcentaje de reducción del espesor de capa con el empleo del reforzamiento

Este estudio se realizó un diseño experimental con tres suelos de base de diferentes canteras (B1, B2 y B3) y una misma subrasante (SR) con el fin de obtener un valor característico para cada caso. A continuación, se muestran los valores característicos de cada uno de los materiales implicados en el experimento.

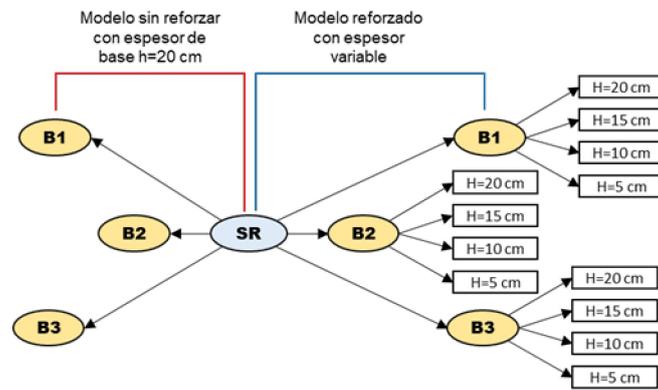


Figura 23: Diseño experimental realizado en la investigación

Tabla 4: Valores característicos de los materiales empleados en la investigación

Propiedad	Base 1	Base 2	Base 3	Subrasante
CBR [%]	20	30	40	3.2
Módulo resiliente [MPa]	155	168	202	32
Coefficiente de Poisson	0.35	0.35	0.35	0.35

Como resultado del análisis se obtuvo una curva para cada tipo de base, donde entrando con la deflexión del modelo sin reforzar y se obtiene el espesor de base que complementado con la geomalla ofrecen el mismo valor. Los resultados se muestran en el gráfico y la tabla.

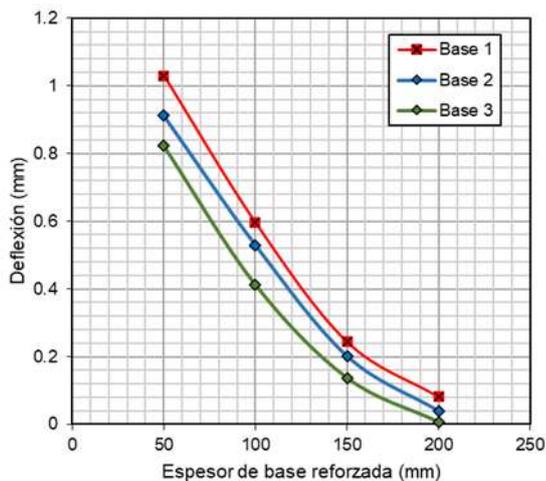
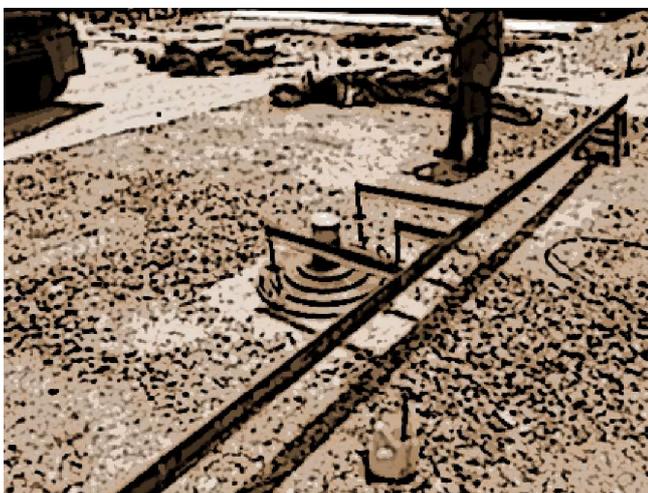


Figura 24: Resultados del diseño experimental

Tabla 5: Aporte de la geomalla en cada caso

Material	Espesor reforzado	Espesor sin refuerzo	BCR [%]
B1	95 mm	200 mm	52.5%
B2	74 mm	200 mm	63.0%
B3	50 mm	200 mm	75.0%



Como se observa en la tabla 5, todas las bases analizadas con el empleo de la geomalla ofrecen una reducción del espesor superior al 50 %, por otra parte, si se relacionan las calidades de las bases con los BCR se manifiesta que a medida que existe un incremento en la resistencia de los suelos se incrementa el porcentaje de BCR, lo que indica claramente una mayor reducción en el espesor en la capa. Estos análisis están ligados directamente con el impacto técnico económico de cualquiera de estas soluciones, ya que vincula no solo el empleo de la geomalla como técnica de reforzamiento sino su adecuada combinación con determinados suelos para obtener resultados óptimos.

4. CONCLUSIONES

En la investigación se realizaron estudios que pretenden reducir los costos en ensayos experimentales a partir de combinar simulación computacional y experimentación, este enfoque viene integrado en un proceso, donde después de simular numéricamente el fenómeno se realiza una calibración matemática y física, después es validado teniendo en cuenta las mismas condiciones del experimento. Esto avala el empleo de la modelación en el desarrollo de la investigación.

El proceso de calibración y validación del ensayo permitió obtener un modelo fiable y con un costo computacional adecuado para la disponibilidad de hardware con la que se contaba en la investigación.

El modelo computacional reforzado describe de forma aproximada todos los mecanismos de funcionamiento de la geomalla dentro del suelo.

El uso de geomallas biaxiales ha demostrado ser una técnica rápida y eficiente para reforzar terrenos en múltiples proyectos de ingeniería. Estas proveen confinamiento lateral y un efecto de membrana, que permite reducir el grosor requerido del diseño de las capas del paquete estructural manteniendo los mismos criterios de diseño.



1. S. F. I. AlAbdullah and N. S. Taresh, "Evaluation of soil reinforced with geogrid in subgrade layer using finite element techniques," *International Journal*, vol. 13, no. 35, pp. 174-179, 2017.
2. P. Villegas-Gómez, "Evaluación del aporte mecánico de un geosintético como material de refuerzo en pavimentos flexibles, ante distintas configuraciones cargas reales," 2019.
3. J. G. Zornberg, "Sistemas de pavimentos reforzados con geosintéticos Geosynthetic-reinforced Pavement Systems," *Ing. Civ.*, vol. 171, pp. 5-25, 2013.
4. P. Leiva, "Utilización de geosintéticos en pavimentos como estrategia contra el reflejo de grietas," San José, Costa Rica: Trabajo Final de Graduación para obtener el grado de maestría académica en Ingeniería del Transporte y Vías de la Universidad de Costa Rica, 2016.
5. S. W. Perkins and M. Ismeik, "A synthesis and evaluation of geosynthetic-reinforced base layers in flexible pavements-part i," *Geosynthetics International*, vol. 4, no. 6, pp. 549-604, 1997.
6. H. Alimohammadi, J. Zheng, V. R. Schaefer, J. Siekmeier, and R. J. T. G. Velasquez, "Evaluation of geogrid reinforcement of flexible pavement performance: A review of large-scale laboratory studies," vol. 27, p. 100471, 2021.
7. B. Han et al., "Accelerated pavement testing to evaluate the reinforcement effect of geogrids in flexible pavements," vol. 2674, no. 10, pp. 134-145, 2020.
8. Q. Chen, M. Abu-Farsakh, R. J. G. Sharma, and Geomembranes, "Experimental and analytical studies of reinforced crushed limestone," vol. 27, no. 5, pp. 357-367, 2009.
9. Z. A. Alkaisi and M. S. Al-Soud, "Effect of Geogrid Reinforcement on Behavior of Unpaved Roads," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 856, no. 1, p. 012007: IOP Publishing.
10. *Estructuras del pavimento*, 2002.
11. *Standard Test Method for Nonrepetitive Static Plate Tests of Soils and Flexible Pavement Components.*, 2012.
12. D. Burmister, "The general theory of stresses and displacements in layered soil systems. III.," *Journal of applied Physics*, 16(5), 296-302. , 1945.
13. 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.
14. 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 Geotécnia, ISPJAE, La Habana, Cuba, 2004.
15. 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.
16. 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.
17. A. T. Papagiannakis and E. A. Masad, *Pavement design and materials*. John Wiley & Sons, 2008.
18. G. Leonardi, a. L. Bosco, R. Palamara, and F. Suraci, "Finite Element Analysis of Geogrid-Stabilized Unpaved Roads," *Sustainability* vol. 12, no. 1929, 2020.
19. M. Hussein, M. J. G. Meguid, and Geomembranes, "A three-dimensional finite element approach for modeling biaxial geogrid with application to geogrid-reinforced soils," vol. 44, no. 3, pp. 295-307, 2016.
20. P. Ullidtz, "Pavement analysis. Developments in civil engineering," Elsevier, Amestrdam, vol. 3, no. 5556, p. 034, 1987.
21. Y. H. Huang, *Pavement analysis and design*, Second Edition ed. University of Kentucky: Pearson Prentice Hall, 2004, p. 785.
22. S. F. Ibrahim, A. J. Kadhim, and H. B. Khalaf, "Reinforcement effect of geogrid in the ballast and sub-ballast of the railway track," vol. 15, no. 48, pp. 22-27, 2018.
23. 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.
24. L. S. Calvarano, G. Leonardi, and R. J. P. e. Palamara, "Finite element modelling of unpaved road reinforced with geosynthetics," vol. 189, pp. 99-104, 2017.