

Aplicación del método de cálculo de la capacidad portante, de Avesani Neto, en el refuerzo, con geoceldas, de carreteras sin pavimentar

I. Zuloaga, geotecnia.ONLINE, Panamá

RESUMEN

Este trabajo se desarrolla una aplicación del refuerzo, con geoceldas, de carreteras sin pavimentar, basado en método de cálculo de Avesani Neto; incluyendo refuerzo adicional, cuando requerido. Se analizan y sintetizan las herramientas que se han empleado para el análisis geotécnico. Con la aplicación desarrollada, se pueden emplear geoceldas para aumentar la capacidad de carga de todo tipo de vías: carreteras para transporte, carreteras de grava, carreteras rurales o temporales, vías de acceso, así como: almacenes, depósitos, galeras, galpones, plataformas de trabajo, etc.

ABSTRACT

This paper shows a bearing calculation application for reinforced geocell gravel and unpaved roads, using the Avesani Neto Method, plus additional reinforcement, when needed. With the developed application, engineers may use geocells satisfactorily to increase the bearing capacity of their roads, enabling the use of local granular materials, protecting roads from rain run-off erosion, and enhancing the durability of treated surfaces.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Carreteras sin pavimentar

Cuando escuchamos el término carretera nos imaginamos varias bandas de asfalto u hormigón, rodeadas de brocales, hombros o defensas de metal, con carriles bien delimitados, señalizados con pintura reflectiva, acompañada de señales que nos ayudan a mantener la seguridad vial.

Explorando las cifras del Banco Mundial, vemos que aproximadamente un 80% de las carreteras del mundo, no están pavimentadas. Muchas de éstas, sobre suelos blandos o saturados, sometidas a cargas elevadas y acciones climáticas extremas. En consecuencia, para proporcionar un nivel de servicio adecuado, la estabilización del suelo, refuerzo de la base y mantenimiento periódico son necesarios. Todo ello para evitar su deterioro excesivo o la destrucción de su estructura.

Para atender estos requerimientos existe un material geosintético, con una estructura tridimensional abierta, constuido por células interligadas, que confina mecánicamente su relleno, cuya función predominante es el refuerzo, confinamiento de los materiales y control de erosión.

Este material, denominado: Geocelda, nos permite reforzar la base de este tipo de vías, también extender su vida útil, reducir el coste y frecuencia de mantenimiento, aumento de las cargas de forma importante y servir como sistema de confinamiento celular que mejora los módulos de deformación, la capacidad portante y facilita el drenaje.

1.2 Geoceldas (GCE)

Las geoceldas, son estructuras tridimensionales, semirígidas, en forma de panel o banda tridimensional, permeables, poliméricas (sintéticas o naturales), hechas de tiras de geotextiles, geomallas o geomembranas unidas alternativamente y utilizadas en contacto con el terreno, o cualquier otro material geosintético en aplicaciones de ingeniería civil.

Las geoceldas tienen atributos que las convierten en un material ideal para varias aplicaciones geotécnicas, tales como: revestimiento de taludes, protección de canales y cuerpos de agua, mejora del terreno, aumento de la capacidad de carga del suelo, reducción de las deformaciones, entre otras.

Entre los sistemas de refuerzo de cimientos que involucran geosintéticos (geoceldas, refuerzos planos y fibras aleatorias), las geoceldas, según la literatura internacional, destacan con el mejor rendimiento de refuerzo, tanto en la reducción de las tensiones transmitidas como en la reducción de los desplazamientos esperados.

La investigación de Webster, S. L., y Alford, S. J. (1978), confirmó el potencial de las geoceldas como base o capa de rodadura para carreteras y patios de almacenamiento, en suelos de baja capacidad. El estudio concluyó que, con su uso, el grosor del diseño de la base podría reducirse en un 70% o menos en comparación con el escenario no reforzado.

De la misma forma, tal y como describe Avesani Neto, J. O. (2013), en algunas aplicaciones, la capa de refuerzo de geoceldas también puede actuar como un drenaje. Para esto, se utilizan materiales de relleno granulares (arena o grava) y se emplean geoceldas con paredes celulares perforadas (tiras) permitiendo el flujo de agua, en el plano del colchón reforzado.

Según los manuales de geosintéticos, las principales funciones de las geoceldas son: control de erosión, protección y refuerzo. No obstante, las geoceldas tienen propiedades que las hacen ideales para aplicaciones geotécnicas como el refuerzo del terreno y la reducción de costes de mantenimiento, en carreteras sin pavimentar.

1.3 Geoceldas para la Mejora de la Capacidad de Carga en Carreteras sin Pavimentar

Una solución que se puede considerar, como refuerzo del terreno, en carreteras sin pavimentar, es usar una (o más) capas de geosintéticos debajo del punto de aplicación de la carga, para mejorar la capacidad de soporte del terreno. En este contexto, varios autores han desarrollado metodologías específicas, para cada aplicación, por ejemplo: Giroud & Noiray, (1981), descrito por Koerner (1998), Houlsby et al. (1989), y otros.

Por otro lado, en este caso, el uso de geoceldas puede aumentar la eficiencia del refuerzo debido a su sistema de confinamiento celular. Según Avesani Neto, J. O. (2013), cuando se compara un refuerzo plano con el sistema celular, se observa una rigidez significativamente mayor al usar las geoceldas. Queda entendido que hay un aumento importante en la rigidez, si comparamos el sistema de refuerzo con capas de geosintéticos, y además, el sistema celular proporciona un mejor rendimiento bajo cargas de servicio.

Según los autores estudiados en: Avesani Neto, J. O. (2013), esta diferencia se produce porque en el refuerzo plano, el suelo entre las capas de refuerzo sucesivas se comprime solo en una dirección y a un valor que excede tanto su resistencia al corte como la resistencia entre la interfaz entre el suelo y refuerzo. Mientras que en el caso de las geoceldas, debido a que el suelo está completamente encapsulado, hay un aumento de su confinamiento que mejora su resistencia. Además, la estructura celular compuesta por las geoceldas más el relleno, actúa como una losa que proporciona una mayor capacidad de carga al sistema.

Las geoceldas son óptimas en el refuerzo del terreno, tanto en situaciones de terrenos blandos, en el refuerzo de cimientos y otros tipos de aplicaciones como: las carreteras sin pavimentar. Esto se debe a que la geocelda, según la literatura estudiada por: Avesani Neto, J. O. (2013), destaca el mejor rendimiento de refuerzo (incluso en casos marginales), tanto en la reducción de las tensiones transmitidas, como en la reducción de los desplazamientos esperados.

Las geoceldas, pueden reforzar la base de todo tipo de vías: carreteras para transporte, carreteras de grava, carreteras rurales o temporales, vías de acceso, así como: almacenes, depósitos, galeras, galpones, plataformas de trabajo, etc.

2. MÉTODO DE CÁLCULO DEL REFUERZO CON GEOCELAS

Al aplicar geoceldas, como método de refuerzo del terreno, el principio de confinamiento celular es la base para el desarrollo de la resistencia de la capa de geoceldas. En carreteras no pavimentadas, se colocan capas de refuerzo sobre el terreno, para absorber las cargas superficiales del tráfico de vehículos, y redistribuirlas con menos intensidad a las capas subyacentes.

En la tesis de Avesani Neto, J. O. (2013), se expusieron y analizaron diferentes métodos de refuerzo con geoceldas, concluyendo que el estado del arte, presenta actualmente tres (3) modelos de cálculo: Koerner (1994), Presto (2008) y Cohesión Aparente.

También hay un método, llamado método de Zhang et al. (2010), sin embargo, esta propuesta, carece de resultados de pruebas de placa específicos, como para poder analizar los resultados.

Igualmente, tal y como constata Avesani Neto, J. O. (2013), en la literatura revisada en su tesis (Meneses, 2004; Yuu et al., 2008; Han et al., 2011), ningún método actual ha sido efectivo para predecir el refuerzo de las geoceldas; lo que produce una laguna en las aplicaciones geosintéticas con geoceldas. Deficiencia que ha sido solucionada luego de la publicación de la tesis de Avesani Neto, J. O. (2013).

2.1 Factores que Influyen en el Refuerzo con Geoceldas

Los factores que influyen en el refuerzo del terreno, con geoceldas, han sido evaluados por Avesani Neto, J. O. et al. (2013); siendo los principales:

- El factor más influyente, en la determinación de la eficiencia del refuerzo con geoceldas, es la relación de forma de la geocelda (h/d), seguido por la profundidad de incrustación del refuerzo (u);

- Se ha comprobado que existe una marcada diferencia, en el comportamiento del terreno reforzado con geoceldas cuando tenemos una relación de forma reducida ($h/d < 1$) y una elevada ($h/d > 1$). Siendo que para las de forma reducida, existe una mayor participación del efecto de confinamiento debido a una mayor "flexión", proporcionada por el refuerzo de la geocelda (similar a una viga). Mientras que en las que poseen un factor de forma elevada, hay un predominio del efecto losa, con una extensión más uniforme de las tensiones (análoga a un pozo de cimentación);
- El suelo reforzado con geoceldas proporciona una mejora notable en la resistencia del terreno, incluso cuando las geoceldas están rellenas con suelos de naturaleza arcillosa y/o saturados;
- La asociación de las geoceldas con refuerzos planos aumenta aún más la mejora del refuerzo en el caso de geoceldas de baja relación de forma;
- El ángulo de propagación de las tensiones verticales, en los suelos reforzados con geoceldas, se ve afectado principalmente por la relación de forma de la celda, obteniendo un valor óptimo para $h/d=1$.

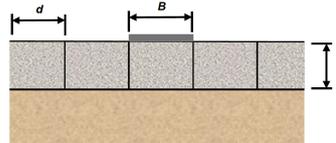


Figura 1. Geometría para relación de forma (imagen de Avesani Neto, J. O. (2013)).

Tal y como destaca Avesani Neto, J. O. (2013) en su tesis, los factores que influyen en el resultado de la capacidad de carga, no son tomados en cuenta, por los métodos de refuerzo actuales. Consecuentemente, éstos métodos, tampoco son capaces de proporcionar una aproximación adecuada a los resultados obtenidos con los ensayos de campo tal y como se estudia en la tesis de Avesani Neto, J. O. (2013).

Como solución a este problema, tenemos la tesis de Avesani Neto, J. O. (2013), que llena los vacíos que dejaron los otros autores, con su método de análisis geotécnico para el refuerzo con geoceldas.

2.2 Método de Cálculo propuesto por Avesani Neto para el Refuerzo de Suelos con Geoceldas

En el presente apartado, se presenta el método de cálculo del refuerzo del suelo con geoceldas que se desarrolla en la tesis de Avesani Neto, J. O. (2013).

2.2.1 Resistencia desarrollada por las Geoceldas

Al igual que con otros geosintéticos empleados como refuerzo del terreno, el desarrollo de la resistencia al usar geoceldas se atribuye a diferentes mecanismos que, actuando juntos, mejoran la capacidad de carga del suelo.

Sin embargo, a diferencia de otros geosintéticos, como los utilizados en el refuerzo plano, que movilizan la capacidad mejorada del suelo debido: al confinamiento y los efectos de membrana, las geoceldas desarrollan un tercer mecanismo: el efecto losa; además de tener una mayor eficiencia por el efecto del confinamiento del suelo dentro de las celdas.

Cada mecanismo puede entenderse y analizarse de manera específica; sin embargo, actúan juntos y están interrelacionados, siendo generados por la misma carga aplicada.

A saber los mecanismos son:

- Efecto de confinamiento: Tan pronto se inicia la aplicación de carga, la forma celular aumenta las tensiones de confinamiento en el material de relleno para inducir una compresión de este material en las células al densificar el agregado. Igualmente hay inducción de tensiones horizontales entre el material y las paredes celulares que movilizan una resistencia pasiva entre las células adyacentes, además de una tensión de corte de interfaz entre estos dos materiales. Por lo tanto, el efecto del confinamiento contribuye de dos maneras: al aumentar la resistencia y reducir la deformabilidad de la celda que llena el suelo; y al disipar estas cargas a través de tensiones horizontales en las células que se distribuyen y comparten entre las células adyacentes, movilizandolas resistencias pasivas confinadas del suelo y las resistencias al corte en la interfaz suelo/pared en las células.

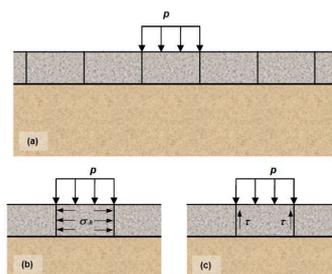


Figura 2. Ilustración esquemática del efecto de confinamiento: a) aplicación de la carga, b) inducción de tensiones horizontales dentro de la célula, c) movilización de las tensiones de corte en la interfaz suelo/pared de la célula (imagen de Avesani Neto, J. O. (2013)).

- Efecto losa: También llamado efecto de propagación de las tensiones verticales. Este mecanismo es similar al efecto de confinamiento por no requerir desplazamientos significativos para su movilización. De hecho, este es el efecto más fácil de entender, y puede traducirse como una dispersión de tensión o un efecto de propagación a la capa subyacente debido a la estructura tridimensional de las celdas interconectadas y rellenas. Debido a esta extensión, la carga que se transfiere al suelo de la base actúa sobre una superficie más grande, lo que conduce a valores de tensión más bajos en la base.

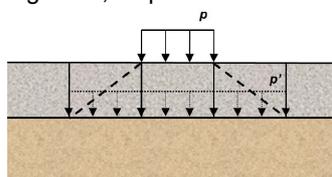


Figura 3. Ilustración esquemática del efecto losa (imagen de Avesani Neto, J. O. (2013)).

- Efecto membrana: Un geosintético, dispuesto sobre algún material compresible o cavidad, sometido a una carga normal en su plano tiene una desviación de forma geométrica similar a la de una membrana. Debido a su rigidez y sus extremos anclados, el refuerzo, curvado en forma cóncava debido a la desviación, actúa como una membrana tensada que ejerce una fuerza hacia arriba en un intento de soportar las cargas normales a su plano, redistribuyéndolas y transfiriéndolas a extremos anclados, movilizándose así la resistencia al corte de la interfaz de refuerzo/terreno. Este mecanismo también funciona mejorando la capacidad de soporte del suelo de cimentación y reduciendo los desplazamientos.

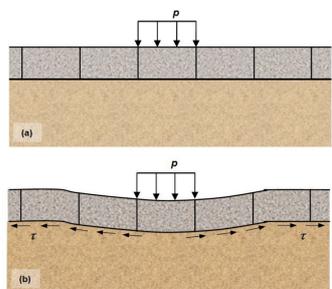


Figura 4. Ilustración esquemática del efecto membrana: a) aplicación de la carga, b) deformación del terreno de cimentación y activación de las tensiones de corte en el interfaz suelo/geocelda (imagen de Avesani Neto, J. O. (2013)).

Para que este efecto ocurra satisfactoriamente, se requieren algunas medidas de refuerzo, a saber: separación entre los materiales encima y debajo del refuerzo; alta rigidez longitudinal del material de refuerzo; altos desplazamientos verticales de los cimientos para su activación; interacción adecuada entre el refuerzo y el suelo para la movilización de la fricción de la interfaz y la consiguiente transferencia de tensiones.

2.2.2 Ecuación del Refuerzo del Terreno con Geoceldas según Avesani Neto

Avesani Neto, J. O. (2013) define la capacidad de carga del suelo reforzado con la variable (p_r); la suma de la capacidad de carga del suelo no reforzado o presión admisible del suelo no reforzado (p_u), y la mejora de capacidad de carga debida al refuerzo con geoceldas (I), tal y como muestra la Ec. (1).

$$p_r = p_u + I \quad \text{Ecuación [1]}$$

En su tesis, Avesani Neto, J. O. (2013), define la mejora debida al refuerzo de la geocelda (I) como la diferencia de la tensión que actúa sobre la geocelda (p), menos la que realmente actúa sobre el suelo (debajo de la geocelda) (p*), tal y como se indica en la Ec. (2), y se muestra en la Figura 7.

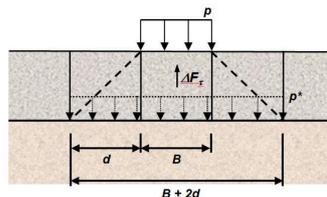


Figura 5. Ilustración esquemática de la actuación del efecto membrana aplicado en el Método de Avesani Neto (imagen de Avesani Neto, J. O. (2013)).

$$p_r = p_u + (p - p^*) \quad \text{Ecuación [2]}$$

Siguiendo el desarrollo de la tesis Avesani Neto, J. O. (2013), obtenemos que la capacidad de carga de un suelo reforzado con geoceldas es:

$$p_r = p_u + I_G \times p \quad \text{Ecuación [3]}$$

Con (I_G) como factor de refuerzo de la geocelda y (p) la tensión que actúa sobre la geocelda. Según Avesani Neto, J. O. (2013), tenemos que:

$$I_G = 4 \frac{h}{d} \tan \delta K e + (1 - e) \quad \text{Ecuación [4]}$$

Con (K): coeficiente de empuje, (δ): ángulo de fricción entre las paredes de la geocelda y el relleno, y (e): efecto de la propagación de la tensión vertical.

Con respecto al coeficiente de empuje (K), los métodos de cálculo actuales están divididos en cuanto a la adopción de un coeficiente de empuje. Los métodos de Koerner y Presto usan el coeficiente de empuje activo, mientras que el método de Cohesión Aparente usa el coeficiente de empuje pasivo.

Según el método de Avesani Neto, J. O. (2013), para la evaluación de este coeficiente, se emplearon pruebas de placa en el laboratorio con las siguientes conclusiones:

- El coeficiente de empuje pasivo estaba sobredimensionado, no correspondiendo al valor obtenido en las pruebas;
- Sin embargo, tanto los coeficientes activos como los de reposo mostraron resultados satisfactorios en la predicción con el modelo propuesto;
- No obstante, el coeficiente de reposo presentó el mejor ajuste para el método propuesto por Avesani Neto, J. O. (2013).

Por lo anterior Avesani Neto, J. O. (2013), sugiere que se emplee la formulación clásica de Jaky (1944) de $K_o = 1 - \sin \phi'$ para determinar el coeficiente de empuje (K).

En relación al ángulo de fricción, entre las paredes de la geocelda y el relleno (δ), Avesani Neto, J. O. (2013), estudia la variación observada en los estudios referenciados en su tesis, llegando a la conclusión de que lo ideal es emplear un ángulo de fricción de interfaz igual a 2/3 del ángulo de fricción interno del suelo de relleno; ello independientemente del material de la celda y su relleno. De ésta forma demuestra que esa simplificación aplica en el Analisis Geotécnico de su método.

Reemplazando y reorganizando, con el desarrollo de la tesis de Avesani Neto, J. O. (2013), tenemos que, la capacidad de carga del suelo reforzado (p_r) es:

$$p_r = p_u + \left[4 \frac{h}{d} \tan \delta K e + (1 - e) \right] \times p \quad \text{Ecuación [5]}$$

Tal y como confirma Avesani Neto, J. O. (2013), se observaron, en varios ensayos de laboratorio, que el aumento de la relación de forma (h/d) superior a la unidad cambia notablemente el comportamiento del refuerzo de la geocelda.

Según los autores consultados por Avesani Neto, J. O. (2013), las geoceldas con relación de forma pequeña ($h/d < 1.0$ a aproximadamente 1.5) tienen un comportamiento similar a la viga que, debido a la flexión, exhiben una mayor deformación y, por lo tanto, conduce a tensiones de contacto más altas en el suelo de cimentación.

Sin embargo, según los mismos autores, los refuerzos de geoceldas de mediana relación de forma ($h/d >$ aproximadamente 1.0 a 1.5) tienen mayor rigidez y se comportan como un pozo de cimentación, con una distribución de deformaciones y presiones más uniformes en su base. En este caso, la característica principal de refuerzo es la propagación de las tensiones verticales.

Así, pues, en el método de cálculo propuesto, para el refuerzo de geoceldas, por Avesani Neto, J. O. (2013), el efecto del confinamiento se limitó a una relación de forma ($h/d \leq 1$).

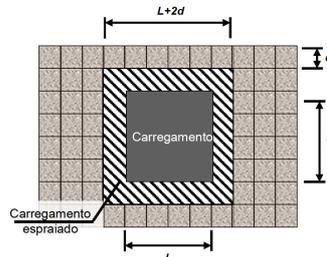


Figura 6. Vista en planta de una carga de dimensiones $B \times L$ sobre una capa de geoceldas, mostrándose la dispersión de cargas con dimensiones $B+2d$ y $L+2d$ (imagen de Avesani Neto, J. O. (2013)).

Queda establecido, una vez definida la geometría de la geocelda, el material de relleno y la magnitud de la carga, que es posible determinar, con la Ec. (5), la capacidad de carga del suelo reforzado (p_r). Igualmente, a partir de la formulación, se puede observar que capacidad de carga del suelo reforzado (p_r) es una función de la geocelda y la carga sabiendo que (e), en el caso de cargas corridas (donde $L \gg B$, generalmente $L > 5B$), o cargas circulares y cuadradas (situaciones donde $B = L$), la expresión del efecto de dispersión será función del ancho o diámetro de la carga solamente, y simplificado respectivamente, según el esquema de la Figura 8, tenemos:

$$e = \frac{1}{\left(1 + 2\frac{d}{B}\right)} \quad \text{Ecuación [6]}$$

Así pues, tenemos un nuevo método de Análisis Geotécnico, para el refuerzo del suelo con geoceldas, que es simple de aplicar y considera tanto los parámetros geométricos de geocelda, como los de carga, así como la resistencia del suelo de relleno y la contribución del suelo de cimentación; en el que se adoptaron como mecanismos de refuerzo los efectos de la losa (dispersión de tensiones verticales) y el confinamiento.

2.2.3 Factor de Seguridad y Tensión Admisible

La formulación propuesta por Avesani Neto, J. O. (2013), para la capacidad de carga de suelo reforzado (p_r) depende del valor de la tensión superficial aplicada (p), similar a la observada en otros métodos. Y a diferencia de otros métodos, Avesani Neto, J. O. (2013), propone una metodología para calcular el Factor de Seguridad y la tensión admisible para la situación del terreno reforzado.

El Factor de Seguridad es el resultado de dividir la resistencia disponible (capacidad de carga del suelo reforzado - (p_r)) entre la sollicitación (carga aplicada - (p)). Por lo tanto, al reelaborar la Ec. (3), dividiendo ambos términos por la carga aplicada (p), se obtiene una relación entre los factores de seguridad de la condición reforzadas (FS_r) y no reforzadas (FS_u), dependiendo del factor de refuerzo de la geocelda (I_g):

$$\frac{p_r}{p} = \frac{p_u}{p} + \frac{I_g p}{p} \quad \text{Ecuación [7]}$$

En aplicaciones de cimientos, es habitual trabajar con una tensión admisible, que cuando se aplica al suelo solo causaría tensiones que las estructuras en la superficie soportarían sin inconvenientes, lo que llevaría a una situación de seguridad satisfactoria.

$$FS_r = \frac{p_u}{p} + I_g \quad \text{Ecuación [8]}$$

Por lo tanto, a partir de la ecuación anterior, manteniendo el Factor de seguridad reforzado (FS_r) como variable de entrada y aislando la carga aplicada (p), definiéndola en esta situación como carga permisible (p_a) para el FS_r elegido, se obtiene:

$$FS_r = FS_u + I_g \quad \text{Ecuación [9]}$$

De esta formulación se puede observar que, para $FS_r = 1$ (y, en consecuencia, en el estado de ruptura para la situación reforzada: $p = p_r$), existe la condición de equilibrio límite entre: la carga aplicada en la base (carga

debajo de la capa de refuerzo de geocelda – (p^*)), con la capacidad de carga del suelo de cimentación (p_u) y usando las ecuaciones, se obtiene:

$$p = \frac{p_u}{1 - I_g} \quad \text{Ecuación [10]}$$

En este caso, tenemos, por lo tanto, la tensión de rotura calculada por el método propuesto por Avesani Neto, J. O. (2013).

Finalmente, tal y como advierte Avesani Neto, J. O. (2013), se debe considerar que, en el mecanismo propuesto para el modelo de cálculo, no se está considerando el posicionamiento de la carga en relación con la geocelda. En aplicaciones prácticas, no necesariamente la carga (una zapata, por ejemplo) estará perfectamente centrada con una celda de refuerzo. Ni la dimensión de carga ni el ancho de la celda serán exactamente iguales. Por lo tanto, como el modelo no captura estos efectos, puede ocurrir una variación de la extensión real en comparación con la calculada, lo que puede generar pequeñas diferencias en los valores pronosticados y medidos.

Para el caso de un neumático desplazándose sobre un suelo reforzado es razonable asumir que, en promedio, las cargas se aplican en el centro de la celda; entendiéndose que en una aplicación práctica, se introducirá un sobre-ancho, en los bordes, para que esta hipótesis se cumpla óptimamente.

2.3 Refuerzo de Geoceldas con otros Geosintéticos

Investigando los beneficios de combinar refuerzos celulares con planos, tal y como estudia Avesani Neto, J. O. (2013) en su tesis, existen pruebas de placa, en suelos reforzados con geoceldas, con adición de geomallas, tanto sobre, como debajo de la capa de geoceldas.

Las pruebas se realizaron variando la altura de la geocelda y la relación de forma, y los autores concluyeron que la disposición de un refuerzo plano debajo de la capa de la geocelda puede mejorar aún más el rendimiento del sistema en términos de capacidad de carga; en comparación con el rendimiento obtenido únicamente con el uso de la geocelda, independientemente de sus características geométricas.

La eficiencia de esta asociación es mayor, cuanto mayores son las deformaciones impuestas por la carga, como resultado de la activación del efecto de membrana, en el refuerzo plano. En la situación de la disposición de refuerzo plano, por encima de la capa de geocelda, según los autores, no se observaron mejoras significativas debido a las deficiencias de anclaje de la geomalla.

En la misma línea de investigación, pero con una zapata circular, se realizaron ensayos de asociación geocelda-geomalla, solo bajo la geocelda. Los autores informan que el refuerzo plano debajo de la capa de geocelda proporciona un rendimiento adicional del sistema en términos de capacidad de carga y rigidez, especialmente en casos de geocelda de altura reducida (relación $h/B < 1.26$), en el que se obtuvo hasta un 100% de mejora.

Además, se observó que los efectos del refuerzo plano debajo de la capa de geocelda son más significativos a deformaciones más altas, con la misma explicación para un mayor efecto de membrana en la capa de geomalla.

2.4 Geosintético de Separación o de Contacto en las Geoceldas (inferior)

Además de los tres mecanismos expuestos, se podría citar un cuarto efecto, sin embargo, presente únicamente bajo el uso de un material separador, como un geotextil, además de la geocelda: el efecto de separación. Descrito como el impedimento del desplazamiento descendiente del suelo desde el relleno de las celdas; que también tendría la capacidad de mejorar la eficiencia del refuerzo de geoceldas.

Sin embargo, para que este efecto pueda considerarse, debe medirse, y es muy difícil de cuantificar debido a su pequeña magnitud y camuflaje con los otros mecanismos.

3. CAPACIDAD PORTANTE DE CARRETERAS SIN PAVIMENTAR

Las teorías de capa elástica asumen que las tensiones y las deformaciones unitarias solo dependen del módulo elástico (E) y la relación de Poisson (μ). La hipótesis de un comportamiento elástico isotrópico puede ser válido para materiales de pavimento relativamente rígidos y pavimentos sometidos a bajas tensiones de tráfico. No obstante, en carreteras sin pavimentar, que consisten en bases granulares no tratadas sobre subgrados arcillosos, la suposición de un comportamiento elástico lineal no es adecuada. El comportamiento de tales estructuras, incluso con poca intensidad de tráfico, es marcadamente no lineal.

Por otro lado, al usar métodos de resistencia última, se supone que la falla de corte de la estructura ocurre si las tensiones del tránsito son suficientemente elevadas. Esto supone que el comportamiento del material es plástico en lugar de elástico. Por lo tanto, la hipótesis de respuesta plástica es más realista, para carreteras sin pavimentar, en las que las tensiones de tráfico, invariablemente, exceden el rango elástico de los materiales. Lo mismo puede aplicarse a estructuras de soporte gruesas, sometidas a altas tensiones de tráfico (Oloo Y. S. et al. (1997)), como por ejemplo el almacenamiento en puertos de contenedores o almacenes de materiales y maquinaria.

La implementación de las teorías de la capa elástica, en el proceso de diseño de carreteras no pavimentadas, requiere la cuantificación del módulo de elasticidad (E), y la relación de Poisson (μ). Las dificultades asociadas con la determinación de estos parámetros para materiales de estructuras viales, son bien conocidas. Los métodos de resistencia máxima para el diseño de estructuras viales, se basan en los parámetros de resistencia al corte (c') y (ϕ') (y también en ϕ^b en el caso de materiales parcialmente saturados) (Oloo Y. S. et al. (1997)).

Por otro lado, los enfoques de resistencia máxima tienen la gran desventaja que las deformaciones previas, al colapso de la estructura vial, no pueden cuantificarse. Las deformaciones durante la vida útil son las que determinan la capacidad de servicio y éstas deben controlarse (Oloo Y. S. et al. (1997)). Las dificultades asociadas, con la predicción de los desplazamientos durante la vida útil de la estructura vial, pueden superarse mediante el uso de relaciones ampliamente utilizadas, tales como: i) la relación empírica para estructuras no pavimentadas no reforzadas derivada por Hammitt, G .M. (1970), y también ii) la integrada por Giroud, J., y Noiray, L. (1981) en el análisis de carreteras sin pavimentar reforzadas con geosintéticos; junto con iii) la fuerza máxima bruta requerida para el equilibrio según Jewell, R.A. (1996).

3.1 Ecuación Básica para Estructuras no Pavimentadas no Reforzadas (i)

La relación empírica de Hammitt, G .M. (1970), para carreteras sin pavimentar sin reforzar, permite estimar el espesor de relleno requerido de gravas (H), a partir del radio de la zona cargada (R) (asumida como circular), el número de ciclos de carga (N), la presión superficial aplicada (p), y la resistencia al corte sin drenar del terreno (C_u).

$$H = R [0.176 \times \log_{10} N + 0.12] \times \sqrt{1.687 \times \frac{p}{C_u} - 1} \quad \text{Ecuación [11]}$$

La fórmula se ha derivado para la correlación estándar de $CBR = C_u/30$ Ecuación [12], donde (CBR) es la Relación de Soporte de California.

Una buena aproximación, al radio de la zona carga (R), se muestra en Jewell, R.A. (1996), asumiendo que la presión vertical aplicada en la superficie (p) es circular, e igual a la presión de hinchamiento del neumático ($p_{neumático}$), y que la carga del eje es (P_{eje}), lo que nos permite encontrar el radio de la zona de carga (R), para un solo eje con dos ruedas individuales, con:

$$R = \sqrt{\frac{P_{eje}}{2 \pi p_{neumático}}} \quad \text{Ecuación [13]}$$

y para dos ejes el radio de la zona de carga (R) se estima con:

$$R = \sqrt{\frac{P_{eje}}{\sqrt{2} \pi p_{neumático}}} \quad \text{Ecuación [14]}$$

3.2 Ecuación para el Análisis de Carreteras sin Pavimentar Reforzadas con Geosintéticos (ii)

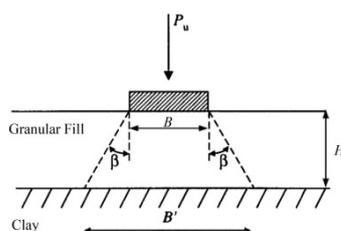


Figura 7. Ángulo de dispersión de cargas (β) asumido en el análisis para igualar tensiones de equilibrio que se deben satisfacer en el diseño (imagen de Jewell, R.A. (1996)).

Giroud, J., y Noiray, L. (1981) propusieron, para la condición estática, el uso de dos factores de capacidad de carga separados para las carreteras, sin pavimentar, no reforzadas ($N_c^{nr} = \pi$) y reforzadas ($N_c^r = 2 + \pi$). A partir del desarrollo de este trabajo, podemos estimar, mediante la geometría mostrada en la Figura 8, la tensión de contacto con el subgrado (p^*) de la capa de rodadura.

Para ello se utiliza la distribución de carga por capa agregada, en función de la geometría, con la dimensión de referencia de la aplicación de la presión (B), que se puede igualar al radio de aplicación de la carga (R), la altura de la capa de agregado (H), y el ángulo de dispersión (β) que se asume como 31° .

$$p^* = \frac{p_{\text{pneumático}}}{2(B+2H \tan \beta)(L+2H \tan \beta)} \quad \text{Ecuación [15]}$$

3.3 Fuerza Máxima Bruta requerida para el equilibrio (P_r) (iii)

Jewell, R.A. (1996), proporcionó la fórmula para estimar la fuerza de tensión máxima de diseño en el refuerzo (P_r)

$$P_r = p \times B \times \left[\frac{K_{as}}{\tan \beta} \times \ln \left(1 + \frac{D}{B} \times \tan \beta \right) - \tan \delta \right] + (K_{as} - \zeta \times K_{ps}) \times \gamma \times \frac{D^2}{2} \quad \text{Ecuación [16]}$$

Con: (p) como la presión vertical sobre la superficie de relleno, (B) es la longitud lateral del área cargada de forma cuadrada, (K_{as}) es el coeficiente de presión activa del relleno, (β) es el ángulo de la carga (p) disipada a través del relleno, con un ángulo de 31° , (D) es el grosor del relleno, ($\tan \delta$) es la relación entre la carga horizontal y vertical en la superficie de relleno, (ζ) es el coeficiente de activación de la resistencia pasiva en el llenado ($\sim 2/3$ o $1/2$) K_{ps} es el coeficiente de presión pasiva del relleno, y (γ) es el peso unitario del relleno.

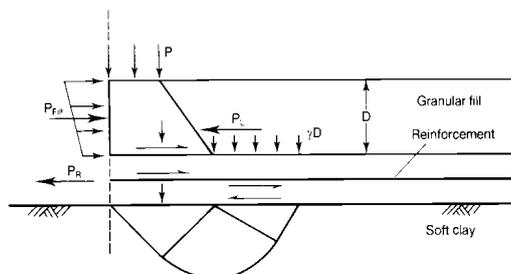


Figura 8. Acción del refuerzo para aliviar a la subrasante del esfuerzo cortante externo (imagen de Jewell, R.A. (1996)).

4. APLICACIÓN PARA EL DISEÑO DE CARRETERAS SIN PAVIMENTAR CON GEOCELDAS Y OTROS REFUERZOS

Hasta aquí, hemos desarrollado, un resumen de la información técnica y formulación matemática que vamos a emplear para reforzar carreteras no pavimentadas con geoceldas o geoceldas combinadas con refuerzo adicional, en caso de ser necesario; relacionando el empirismo, del diseño de carreteras sin pavimentar de Hammitt, G.M. (1970), el desarrollo de Giroud, J., y Noiray, L. (1981), con el tratamiento analítico, análisis geotécnico y comprobación experimental realizada de Avesani Neto, J. O. (2013), junto con la fuerza máxima bruta para el equilibrio de Jewell, R.A. (1996).

Para dar este paso, vamos a asumir que el principio de superposición aplica a nivel del contacto con el terreno. Es decir, que debido a las cargas de tránsito, la tensión, en la base del elemento resistente (capa de contacto con el terreno); tanto para la estructura reforzada con geoceldas (según Ec. (5)), como la estructura hipotética de gravas con espesor (H), (estimada mediante la Ec. (11)), encontramos equilibrio de fuerzas y desplazamientos.

Esta hipótesis es razonable, ya que si además de que las fuerzas a nivel de contacto son moderadas, las deformaciones resultan pequeñas, entonces los desplazamientos del contacto resultan casi proporcionales a las deformaciones.

A seguir, los cinco (5) pasos (fácilmente programables en una hoja de cálculo), para la aplicación del método de cálculo de la capacidad portante, de Avesani Neto, en el refuerzo con geoceldas, de carreteras, incluyendo refuerzo adicional, cuando es requerido:

- 1) Cálculo del espesor hipotético de gravas (H) necesario para soportar la carga (p), según la Ec. (11) de Hammitt, G.M. (1970);

- 2) A partir del espesor calculado (H), e incluyendo la carga (p), se determina la “tensión admisible hipotética” (p^*), en la base inferior de la capa de refuerzo de gravas, con $D=H$, según Ec. (14) de Giroud, J. y Noiray, L. (1981);
- 3) Empleando la Ec. (4) de Avesani Neto, J. O. (2013), sustituyendo el relleno hipotético de gravas, por una capa de geoceldas rellenas, con material granular, se determina el factor de refuerzo de la geocelda (I_G);
- 4) Se compara la “tensión admisible hipotética” (p^*) con el producto del factor de refuerzo (I_G) por la carga (p). Si esta es menor, el refuerzo con geoceldas es adecuado. Si la “tensión admisible hipotética” es excedida, o mejor dicho el soporte de las cargas por las geoceldas es insuficiente para acomodar las cargas, con el factor de seguridad adecuado, se procede a reforzar el contacto del terreno y las geoceldas con la diferencia requerida;
- 5) Empleando la Ec. (16) de Jewell, R.A. (1996), se introduce un refuerzo adicional para lograr el equilibrio de fuerzas de la diferencia entre ($p^* - (p \times I_G)$), con el factor de seguridad adecuado, y el espesor (D) igual a la altura de las geoceldas (h).

NOTAS

Avesani Neto, J. O. (2013), advierte que sus ecuaciones son válidas para una razón geométrica, de la geocelda, de: $d/B < 1$. De la misma forma, lo ideal es que exista una incrustación de geocelda (u) en relación con la dimensión de carga (B) de $u/B < 0.2$; para nuestra aplicación esto se logra adicionando una capa de rodadura de unos 5 cm aproximadamente. Asimismo, la zona de refuerzo se debe construir con un sobreancho total de refuerzo (b) mayor que la dimensión de carga (B) más 4 (cuatro) anchos de celda equivalentes (d): $b \geq B + 4d$. También, la resistencia a la tracción del material de la geocelda debe ser mayor de 30 kN/m. El relleno de la geocelda debe ser de material granular grueso, no erosionable o degradable por el flujo de agua. Es muy importante tener un elemento de separación en contacto con el refuerzo de la geocelda con el suelo de la base. Finalmente, es fundamental una buena compactación del material de relleno de la geocelda para lograr resultados óptimos.

Jewell, R.A. (1996), sugiere el uso de coeficientes de seguridad para la resistencia a la rotura del refuerzo de 1.2 para daños mecánicos, de 1.1 para degradación ambiental y de 1.5 para factor de material (debido a la extrapolación de los datos de prueba al tiempo de vida de diseño). En total un factor de seguridad de 2.0.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a geotecnia.ONLINE por concederme los recursos y el tiempo para desarrollar este trabajo. Igualmente a: BNSF Railway Company, DC-Port (Buenaventura, Colombia), Geo Products, LLC, Nilex Inc., Panaweb Soluciones Constructivas de Panamá, Stabilization Solution Systems, LLC, etc. por emplear, el Análisis Geotécnico aquí desarrollado, para ofrecer a sus clientes soluciones seguras y económicas con Geoceldas.

REFERENCIAS

Avesani Neto, J. O. (2013), Desenvolvimento de uma metodologia de cálculo e simulações numéricas aplicadas na melhoria da capacidade de carga de solos reforçados com geocélula, *Tese (Doutorado em Geotecnia)*, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Avesani Neto, J. O., Bueno, B. S. y Futai, M. M. (2013), A bearing capacity calculation method for soil reinforced with a geocell, *Geosynthetics International*, 20, No. 3, 129–142.

Giroud, J., y Noiray, L. (1981), Geotextile Reinforced Unpaved Road Design, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE. Vol 7. No GT9. 1233-1254.

Hammit, G.M. (1970), Thickness requirements for unsurfaced roads and airfields, bare base support, *US Army Waterways Research Station*, Vicksburg, TR2-70-5.

Houlsby, G.T., Milligan, G.W.E., Jewell, R.A., BURD H.J. (1989), A New Approach to the Design of Unpaved Roads-Part I, *Ground Engineering*, Vol. 22, No. 3. pp. 25 - 29.

Jewell, R.A. (1996), *Soil reinforcement with geotextiles*, CIRIA, London, UK.

Koerner, R.M., *Designing with Geosynthetics*, Prentice Hall, 3rd Ed., Saddle River, USA.

Oloo, S.Y, Fredlund, D.G., y Julian K-M. G. (1997), Bearing capacity of unpaved roads, *Canadian Geotechnical Journal*, 34: 398–407.

Webster, S. L. y Alford, S. J. (1978), Investigation of Construction Concepts for Pavements Across Soft Ground. *Report S-78-6*, Geotechnical Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.