

**REFUERZO EN BASES DE CIMENTACIÓN CON GEOCELDAS**

**CHRISTIAN CAMILO POLANIA SÁNCHEZ**

**UNIVERSIDAD COOPERATIVA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL  
NEIVA  
2023**

# REFUERZO EN BASES DE CIMENTACIÓN CON GEOCELDAS

**CHRISTIAN CAMILO POLANIA SÁNCHEZ**

**Informe Final de análisis sistemático de literatura presentado como requisito  
para optar al título de INGENIERO CIVIL**

**Asesores**

**Ing. Esp. MAURICIO HERRERA RODRIGUEZ**



**UNIVERSIDAD COOPERATIVA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL  
NEIVA  
2023**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Neiva, Marzo de 2023

## **DEDICATORIA**

Primeramente, agradezco a Dios por darme un día más de vida. Por haberme permitido disfrutar de mi aprendizaje profesional y compartir con mis seres amados .

Agradezco a toda mi familia, especialmente a mi madre que fue y es mi motor de vida para haber logrado esta etapa profesional.

También, agradezco a otras personas que se volvieron parte de mi familia e importantes para haber llegado a este logro. En especial a mi novia, que fue parte fundamental de mi aprendizaje y constancia para lograr esta meta.

Y a todos mis compañeros de la universidad, profesores y asesor el Ing. Mauricio Herrera que gracias a él, pude finalizar esta etapa con éxito.

## CONTENIDO

	Pág.
1. DEFINICIÓN DEL TEMA	9
2. JUSTIFICACIÓN	10
3. OBJETIVOS	12
3.1 OBJETIVO GENERAL	12
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
4. METODOLOGIA	13
4.1 FASE I	13
4.2 FASE II	13
4.3 FASE III	14
4.4 FASE IV	14
5. RESULTADOS	15
5.1. GEOCELDAS Y COMPOSICIÓN MECÁNICA	15
5.1.1. Geoceldas	15
5.1.2. Composición Mecánica	16
5.2. EVOLUCIÓN DEL SISTEMA HDPE 3D A SISTEMA 4D NEOLOY	19
5.3. ESTUDIOS EXPERIMENTALES	24
5.4. ESTUDIOS ANALITICOS	28
5.4.1. Formulación Matemática	30

5.4.2. Validación	34
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	48
7. CONCLUSIONES	54
BIBLIOGRAFIA	56

## LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Diagrama Metodológico del Proyecto	13
Ilustración 2. Componentes de la Geocelda.	16
Ilustración 3. Imagen SEM de una Geocelda	17
Ilustración 4. Geoceldas HDPE	19
Ilustración 5.Comparación Neoloy vs demás polietilenos	20
Ilustración 6. Evolución de las Geoceldas	21
Ilustración 7. Ensayo SIM.	22
Ilustración 8.Gráfico Esfuerzo vs deformación con y sin refuerzo.	22
Ilustración 9.Sección sin Neoweb y con Neoweb	23
Ilustración 10.Autopista en proceso constructivo y final del Proyecto.	23
Ilustración 11.Representación esquemática del modelo de laboratorio	24
Ilustración 12.Círculo de Mohr para el cálculo de la cohesión aparente	27
Ilustración 13. Croquis zapata.	29
Ilustración 14.Capa corte Pasternak idealizada sobre resortes Winkler.	29
Ilustración 15.Perfil deflexión capa corte Pasternak sobre resortes Winkler	30
Ilustración 16. Fuerzas que actúan sobre un área elemental	31
Ilustración 17. Perfil de asentamiento desde el borde de la Zapata	32
Ilustración 18. Curva de asentamiento de carga lineal (Variación en $\alpha$ )	33
Ilustración 19. Curva de asentamiento de carga normalizada ( $H=0.33B$ ).	35
Ilustración 20.Curva de asentamiento de carga normalizada ( $H=0.66B$ )	36

Ilustración 21. Curva de asentamiento de carga normalizada ( $H=B$ ).	36
Ilustración 22. Perfil deflexión desde el borde zapata hasta el borde Geocelda.	37
Ilustración 23. Curva de asentamiento de carga normalizada (Variación en $\alpha$ ).	38
Ilustración 24. Perfil de deflexión borde de la zapata hasta borde Geocelda	39
Ilustración 25. Curva de asentamiento de carga normalizada (Variación en $\mu$ ).	40
Ilustración 26. Curva asentamiento carga normalizada - C variable ( $\mu=25, \alpha=1$ )	41
Ilustración 27. Curva asentamiento carga normalizada variable C ( $\mu=50, \alpha=1$ ).	41
Ilustración 28. Variación de $I_f$ con $\alpha$ (Variando $W_o$ )	42
Ilustración 29. Variación de $I_f$ con $R_g$ (Variando $\mu$ )	43
Ilustración 30. Variación de $I_f$ con $R_g$ (Variando $a$ )	43

## 1. DEFINICIÓN DEL TEMA

El proyecto a continuación se titula como “Refuerzo en bases de cimentación con Geoceldas”, aplicado a investigaciones ingenieriles para demostrar la importancia del uso de este sistema ante la estabilización de suelos.

Amarnath Hedge (2017), cuenta que el origen de las Geoceldas, proviene del Cuerpo de Ingenieros del Ejército Estadounidense en la década de 1970, con el fin, de mejorar las vías transitadas por ellos en suelos blandos. A principios de 1980 se comercializó la fabricación de las Geoceldas por la empresa PRESTO, como material de alta resistencia a la compresión<sup>1</sup>. Las Geoceldas están soldadas por ultrasonidos compuestas de polietileno y entre otros, debido a su naturaleza de celdas tridimensional y en forma de panel, ofreciendo gran confinamiento en suelos arcillosos con amplia aplicabilidad en la rama de ingeniería civil, Amarnath, Hedge (2017).

La utilización de las Geoceldas, son de gran uso en las diferentes aplicaciones de campo de la ingeniería, como lo son en la parte de capacidad portante en suelos, ya sea para cualquier construcción, confinamientos en taludes (Control de erosión en taludes, revegetalización de taludes, revestimientos de canales), Control de asentamientos (Protección de tuberías, Vías Férreas). Todo esto contribuye a sus excelentes propiedades mecánicas y que también son determinadas por tipos o dimensiones para su uso específico<sup>2</sup>.

Acorde a lo comentado anteriormente, es lo que se verá reflejado en el presente proyecto de investigación para evidenciar si es recomendable o no, emplear este sistema de confinamiento en el refuerzo de las bases de cimentaciones, ya que, se presenta una nueva Geocelda en base de aleación polimérica de nombre Neoloy como material Ecoamigable y de largo periodo de vida.

---

<sup>1</sup> PRESTO, 1990

<sup>2</sup> TEXDELTA, 2022

## 2. JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto se enfoca en el análisis sobre los refuerzos en bases de cimentación con Geoceldas, puesto que, Torres Miguel (2021) demuestra que este sistema de confinamiento celular posee excelentes propiedades mecánicas ante suelos inestables con CBR menores al 3%<sup>3</sup>. Según Amarnath Hedge (2017) observa que el rápido incremento de la urbanización en el siglo XXI, la construcción en terrenos blandos, ha sido muy complejo para la sociedad<sup>4</sup>. Gracias a esta misma problemática, investigadores e ingenieros han estado en constante trabajo de búsquedas de nuevas técnicas que sean tanto económicas como rápidas y a su vez seguras, para llegar a soluciones óptimas que no requieran de un trabajo complicado para afrontar el problema de suelos blandos, las erosiones en taludes o realizar refuerzos convencionales en cimentación como la cal, entre otros, Amarnath & Sitharam (2014)<sup>5</sup>.

Al realizar múltiples investigaciones en base a artículos científicos sobre el refuerzo de bases en cimentaciones con Geoceldas, permite la facilidad del aprender sobre las diferentes propiedades que posee un suelo y de lograr entender de cómo se comportan y que afectaciones tienen, para así mismo, obtener este tipo de análisis en la utilización de las Geoceldas como solución al refuerzo de estructuras del pavimento, refuerzo en estructuras férreas, refuerzo de cimentaciones, control de erosiones o en taludes, para la estabilización vegetal y absorción en cambios de rigidez y asentamientos diferenciales, aportando como grandes ventajas de resistencia frente a los agentes químicos, bacterianos y a la tensión<sup>6</sup>.

El comportamiento y la durabilidad de los materiales como hormigón, grava, arena o tierra pueden incrementarse de manera muy significativa al confinarlos dentro de estos sistemas de confinamiento, de esta forma, el sistema permite la utilización de materiales que se encuentren disponibles en la zona sin necesidad de importarlos. Los suelos al igual que el concreto presentan una buena resistencia a la compresión, pero son deficientes cuando se trata de asumir esfuerzos de tracción, por tal motivo cuando los suelos son combinados con elementos que sean capaces de absorber esfuerzos de tracción como son los Geosintéticos. La utilización de las propiedades mecánicas de una Geocelda mejora el comportamiento mecánico de una estructura geotécnica. El material novedoso tiene unas características geométricas importantes a conocer, las cuales, tienen

---

<sup>3</sup> TORRES, Miguel, 2021

<sup>4</sup> HEDGE, Amarnath, 2017

<sup>5</sup> AMARNATH & SITHARAM, 2014

<sup>6</sup> TEXDELTA, 2022

similitud a la red interna de un panal de abejas con dimensiones variadas según su proveedor<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> WAVIN, y otros, 2011

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Estudiar los refuerzos en bases de cimentación con Geoceldas.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar la composición y propiedades de las Geoceldas.
- Describir los procesos físicos-mecánicos de los cuales las Geoceldas mejoran el suelo de cimentación.
- Interpretar los estudios analíticos y experimentales en bases de cimentación con Geoceldas.

## 4. METODOLOGIA

Este capítulo desarrolla la descripción de todos los procedimientos llevados a cabo para el cumplimiento de los objetivos planteados para el proyecto, por lo tanto, se divide en cuatro fases como se observa en la Ilustración 1.

Ilustración 1. Diagrama Metodológico del Proyecto



Fuente: autor

### 4.1 FASE I

Se establece la búsqueda minuciosa sobre las Geoceldas y el material en que están hechas. Luego, se profundiza en detalle la información con relación a refuerzos en cimentaciones con Geoceldas y, por último, se agrupa la información necesaria para el desarrollo del proyecto, teniendo en cuenta, las fuentes de información empleadas como, por ejemplo, tesis o artículos científicos en relación al tema presente.

### 4.2 FASE II

Al obtener la información sobre Geoceldas, se inicia con la descripción de este material de construcción, el cual, se encontraron 2 tipos de Geoceldas que son: **(1)** Geocelda HDPE en 3D; **(2)** Geocelda Neoloy en 4D, según PAVCO & Marín (2011). Por último, se especifica las propiedades mecánicas o composición del sistema de confinamiento celular.

### 4.3 FASE III

En la presente fase, se describe los estudios experimentales realizados por diferentes ingenieros e investigadores, como Amarnath Hedge. Para el desarrollo experimental típico, Hedge consideró un tanque conectado al gato hidráulico con el fin de aplicar la carga a través de una placa de acero. Después, se finaliza la Fase con el estudio analítico a las Geoceldas, lo cual, se basa en el aumento de la presión de confinamiento, la capacidad de carga, los esfuerzos y deformaciones de falla, realizado por diferentes ingenieros, entre esos, Yoshida & Saji (1995)<sup>8</sup>.

### 4.4 FASE IV

En esta fase, se habla sobre las perspectivas a futuro y conclusiones con estas Geoceldas Neoloy™ en la ingeniería, que, por lo tanto, estudios que se han realizado en diferentes aplicaciones de la ingeniería civil, se limitan a usos de carga estática de las Geoceldas. Por último, se analiza y discute sobre los resultados e información que se han encontrado mediante las investigaciones sobre el refuerzo en bases de cimentaciones con Geoceldas<sup>9</sup>, así, como lo comenta Moghaddas & Dawson (2010) sobre el estudio que realizaron para zapatas con y sin refuerzo de Geoceldas. Además, este sistema de confinamiento sigue en constante avance, permitiendo un estudio muy profundizado en tecnologías para la construcción, siendo así, un material muy importante para el refuerzo de suelos o cimentaciones con Geoceldas y que, por ende, a futuro la aplicación será más prominente en los demás campos de aplicación de la ingeniería<sup>10</sup>.

---

<sup>8</sup> YOSHIDA & SAJI, 1995

<sup>9</sup> MOGHADDAS & DAWSON, 2010

<sup>10</sup> HEDGE, Amarnath, 2017

## 5. RESULTADOS

### 5.1. GEOCELDAS Y COMPOSICIÓN MECÁNICA

#### 5.1.1. Geoceldas

##### Estado del Arte

**Antecedentes.** Las Geoceldas corresponden a un historial de excelente desempeño y uso a lo largo de la ingeniería. Durante la guerra del golfo, el cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos las empleó por primera vez con el objetivo de lograr movilizar sus tropas rápidamente sobre suelos arcillosos<sup>11</sup>. Las primeras pruebas de las Geoceldas en suelos con CBR menores al 3% (arcillas y arenas poco compactas) se realizaron en el año de 1983 en Fort Story Virginia (EEUU). Dichas pruebas, se le aplicaron más de 2 millones de ejes equivalentes, logrando resultados positivos con las Geoceldas<sup>12</sup>. Su comercialización inició en 1990 en Estados Unidos, fabricadas por la empresa PRESTO y hoy en día es una alternativa muy viable y segura para suelos blandos<sup>13</sup>.

**Definición.** Una Geocelda es un sistema tridimensional, basado en Geosintéticos de alta tecnología y fabricados de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) en forma de un panel de abejas. Las Geoceldas son resistentes a la radiación ultravioleta y están unidas mediante soldaduras ultrasónicas, por lo cual, se obtiene una estructura alveolar que retiene y refuerza el material de relleno contra cargas extremas<sup>14</sup>. Después de 20 años, las Geoceldas eran muy costosas, presentando limitantes para diseñarlos, especificarlos e instalarlos en obra, sin embargo, hoy en día, lo demuestra Sandra (2018) que realizó una comparación económica con sistema convencional y otro con Geoceldas, el cual, hubo un ahorro del 12% con el sistema de confinamiento celular. A continuación, se muestra un esquema de la Geocelda en la

---

<sup>11</sup> VIANA SEPULVEDA, 2018

<sup>12</sup> PRESTO, 1990

<sup>13</sup> GREENFIX, 2018

<sup>14</sup> Geopolímeros, 2018

Ilustración 2:

Ilustración 2. Componentes de la Geocelda.



Fuente. (Viana Sepúlveda, 2018).

Este sistema tridimensional, se fabrica de distintos materiales como en Geotextiles, Geomallas, Bambú, Polietileno de alta densidad y otros polímeros que mantienen una forma en panal de abeja. Es importante tener en cuenta el tipo de actividad que se maneja en la obra, para, asimismo, saber con exactitud su modo de instalación, en este caso en cimentaciones, este sistema se usa cuando existe un estudio Geotécnico con resultados de un CBR menor al 3%. ML Ingeniería (2016) explica el modo de instalación de este sistema de confinamiento celular, comúnmente se inicia desde la preparación del terreno, lo cual, se debe remover todo material deletéreo como puede ser rocas de distintos diámetros, raíces, etc. Luego, se prepara (excavación de zanja) los bastones, se extiende la Geocelda hasta alcanzar su dimensión de abertura total, y por último se hacen traslapes entre Geoceldas con bastones en las uniones de los paneles<sup>15</sup>.

### 5.1.2. Composición Mecánica

Las Geoceldas se fabrican en dos variantes:

**Geoceldas de pared no perforada y texturada** (Aumenta la fricción entre el material de relleno y el Geosintético).

**Geoceldas de pared perforada y texturada** Permiten el engranaje de partículas entre las perforaciones y la circulación de fluidos, nutrientes y raíces.

Los Geosintéticos varían en sus dimensiones (Ancho, largo y altura de la celda) como se muestra en la siguiente

---

<sup>15</sup> ML INGENIERIA, 2016

Tabla 1:

Tabla 1. Propiedades de la Geocelda

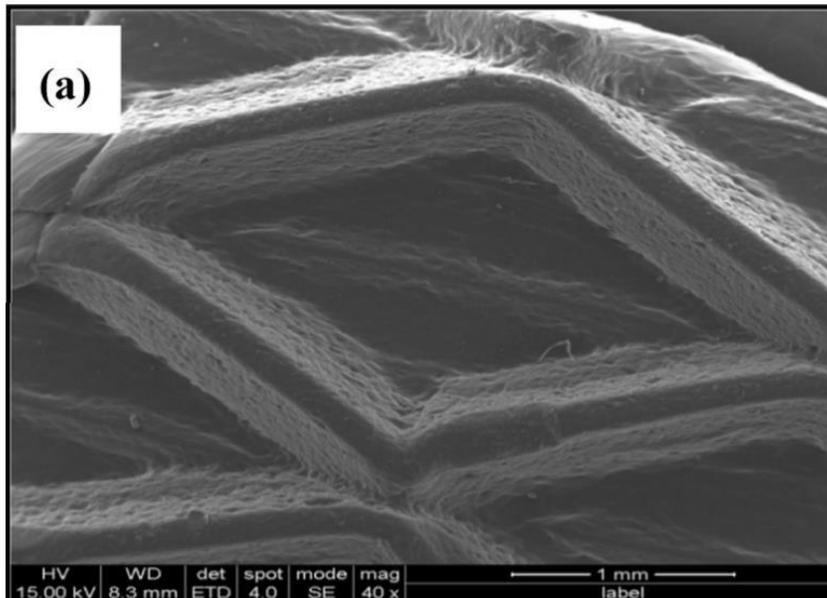
Detalles	Altura h (mm)	Tamaño+10% (mm) l*a	Área (cm <sup>2</sup> )
<b>GCS – Celda Estándar</b>	50, 75, 100, 150, 200, 300	244x203	248
<b>GCS – Celda Estándar Plus</b>	50, 75, 100, 150, 200, 300	259x224	290
<b>GCM – Celda Media</b>	50, 75, 100, 150, 200, 300	345x285	500
<b>GCL – Celda Grande</b>	50, 75, 100, 150, 200, 300	488x406	992

Fuente. Geopolímeros (2018).

Una caracterización detallada de cualquier material es fundamental antes de su disposición, en general, Hedge (2017) cuenta que las Geoceldas incluye la determinación de las dimensiones en la celda, la relación de aspecto, espesor de la franja, densidad, superficie, resistencia a la tracción y resistencia de la costura, además, el conocimiento sobre las propiedades avanzadas de este sistema de confinamiento como los factores de reducción de la fluencia, la durabilidad UV y la resistencia permitida para el diseño de 50 años, son esenciales en el diseño de las estructuras geotécnicas.

En la siguiente Ilustración 3, Hedge & Sitharam (2015) muestran la textura de la superficie de una Geocelda con el Microscopio Electrónico de barrido SEM, lo cual, se conoce que las texturas son responsables de la rugosidad de la superficie y que seguidamente la rugosidad es responsable de la fricción de interfaz entre el material y el suelo. Cuanto mayor es la rugosidad de la superficie, mayor es la fricción de la interfaz, se puede cuantificar utilizando el perfilómetro óptico.

Ilustración 3. Imagen SEM de una Geocelda



Fuente: Amarnath Hedge (2017).

En las aplicaciones de soporte de carga, como lo comenta Hedge (2017), las características de la superficie de las Geoceldas juegan un papel importante en la decisión de su desempeño. Generalmente, las Geoceldas posee una textura única en forma de copa en su superficie, cuando se someten a diversos grados de temperatura, humedad, presión u otro estrés, las Geoceldas deben conservar sus dimensiones originales. Este sistema de confinamiento celular pierde sus dimensiones originales, puede debilitar el confinamiento y la compactación que lleva a la degradación o falla de una estructura, por lo tanto, la forma más sencilla de medir la estabilidad dimensional es mediante el Coeficiente de Expansión Térmica (CTE).

El desarrollo de las tecnologías, según Hedge & Sitharam (2015) se ha logrado con el tiempo encontrar otro tipo de material más eficiente que el polietileno HDPE en las Geoceldas, por lo que, se había notado algunas irregularidades de este material ante grados de temperaturas altos, humedad y entre otros factores. Por lo tanto, hoy en día las Geoceldas Neoloy hechas con refuerzos de Nanofibras en una poliolefina, son químicamente también muy estables y tienen un Coeficiente de Expansión Térmica (CTE) inferior a 80 Ppm/C. En la Tabla 2, se muestra las propiedades típicas de las Geoceldas<sup>16</sup>.

Tabla 2. Propiedades Típicas de las Geoceldas

PROPIEDADES	VALORES	UNIDADES	MÉTODOS DE PRUEBA
Densidad	0.95	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D-1505
Grosor de la tira	1.53 (±10%)	mm	ASTM D-5119
Fuerza de Tensión	>20	N/mm	Método PRS
Ø Agujero superficie	10	mm	N/A
% Área Abierta Sup.	16	%	N/A
Resistencia al Agrietamiento por Estrés Ambiental	>3000	Hr	ASTM D-1693
Factor de Reducción de Fluencia	>2.7		ASTM D-6992
Resistencia permitida para diseño de 50 años	>8	kN/m	ASTM D-6992
CTE	<80	Ppm/°C	ISO 11359-2
Durabilidad UV	>250	Min	ISO 11357-6; ASTM D-3895 (OIT a 200°C, 25 kPa)
Tiempo de inducción Oxidativa (OIT)	>100	Min	ISO 6721-1
Módulo de almacenamiento de flexión a la temperatura (30°C; 45°C; 60°C; 75°C)	>750; >650; >550; >300.	MPa	ASTM E-2254

Fuente: Amarnath Hedge (2017).

<sup>16</sup> HEDGE & SITHARAM, 2015

## 5.2. EVOLUCIÓN DEL SISTEMA HDPE 3D A SISTEMA 4D NEOLOY

**Geoceldas HDPE.** Es un sistema de confinamiento celular en 3D, con forma de panal de abeja. Su principal característica es que es de material Polietileno de Alta Densidad (HDPE) unido por ultrasonidos, con diversos fines ingenieriles. En la Ilustración 4, se aprecia este sistema llenado con material grueso o con vegetación, además, PAVCO & Marín (2011) explican que están hechas para una vida útil en aplicaciones temporales máxima de 50 años, y poca utilización en cargas como el control de erosiones. También poseen características débiles, suaves, dúctiles, resistencia y deformaciones solo a corto plazo, sensible a cambios extremos y son basados en normas irrelevantes a 2D con similitud en los ensayos de tuberías<sup>17</sup>.

Ilustración 4. Geoceldas HDPE



Fuente: Google

**Geoceldas Neoloy™.** Es un sistema de confinamiento celular en 4D compuesto de Nanofibras con estabilidad dimensional en una matriz de Poliolefinas, lo que combina el poliéster con HDPE. En la Ilustración 5, se muestra el gráfico comparativo de la Neoloy vs demás Polietilenos, con relación a la Resistencia de Agrietamiento y la fuerza para el diseño a largo plazo<sup>18</sup>. Este tipo de Geoceldas innovadoras, ofrece múltiples mejoras a largo plazo como lo es:

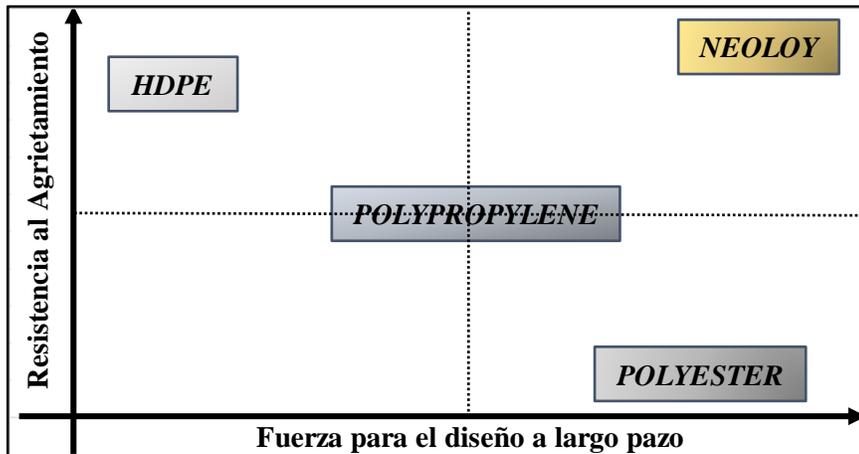
- **Resistencia a:** Fatiga, fisuración y Oxidación.
- Bajo coeficiente de expansión térmica.
- Estabilidad dimensional a largo plazo.
- Alta resistencia UV.
- Diseño a largo plazo (75 años).

---

<sup>17</sup> PAVCO Marín, 2011

<sup>18</sup> WAVIN, y otros, 2011

Ilustración 5. Comparación Neoloy vs demás polietilenos



Fuente. (Wavin, y otros, 2011).

Las Geoceldas Neoloy posee mejores propiedades en comparación con los demás Geosintéticos comunes, siendo así, una solución óptima para la reducción de costos en una obra de 10% - 50%, en tiempos de 20% - 50% y mantenimiento hasta 85%, además, es un material amigable con el medio ambiente sin generar Dióxido de carbono desde su fabricación hasta in situ<sup>19</sup>.

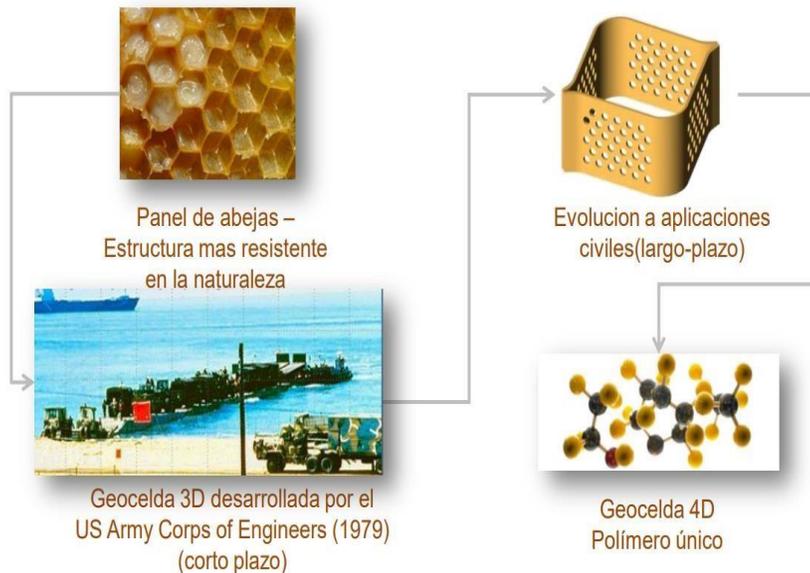
**Proceso evolutivo de las Geoceldas.** Las Geoceldas surgieron a partir del estudio del panal de las abejas como el sistema más resistente de la naturaleza. Gracias a esto, se desarrolló el sistema de confinamiento celular 3D (Neoloy) como un gran avance en la tecnología de la construcción hoy en día. Algunas de las empresas en el mundo de la construcción como PRS Geo-Technologies, creó una nueva generación de Geoceldas basadas en una nueva aleación polimérica llamada Neoloy, la cual, se crea en varias capas que utilizan tiras dobles alrededor de una capa central interna de alta resistencia para lograr un rendimiento óptimo. Las Geoceldas poliméricas están diseñadas específicamente para el refuerzo estructural de aplicaciones exigentes, como en cimentaciones, estabilización de taludes y entre otros<sup>20</sup>. Seguidamente, en la

<sup>19</sup> AXIATECH, 2022

<sup>20</sup> PRS, 2008

Ilustración 6 se evidencia la evolución de las Neoloy.

## Ilustración 6. Evolución de las Geoceldas



Fuente. (Wavin, y otros, 2011).

**Ensayos, comparación y aplicación de la Neoloy.** Para comprobar que las Geoceldas Neoloy son el sistema más seguro y eficiente, las empresas<sup>21</sup> y entre otras, realizaron el ensayo SIM, que es el Método Isotérmico Escalonado<sup>22</sup>. La prueba se centra en materiales de refuerzo con Geosintéticos como hilos, nervaduras de Geomallas o especímenes angostos de Geotextil. Estos determinan la deformación a largo plazo de los polímeros mediante la superposición de tiempo-temperatura para emplearlo en Geoceldas de poliolefinas (Neoloy). Un incremento en la temperatura, acelera el movimiento molecular y segmental, llevando al sistema más rápidamente al equilibrio o “equilibrio aparente” acelerando todos los procesos viscoelásticos<sup>23</sup>. En la Ilustración 7, se evidencia el resultado para las Neoloy de -3.53mm y HDPE de -32.55mm en un periodo de 30 minutos, lo cual, define que las Neoloy son más resistentes a la fluencia por tracción y bajo coeficiente de expansión térmica<sup>24</sup>.

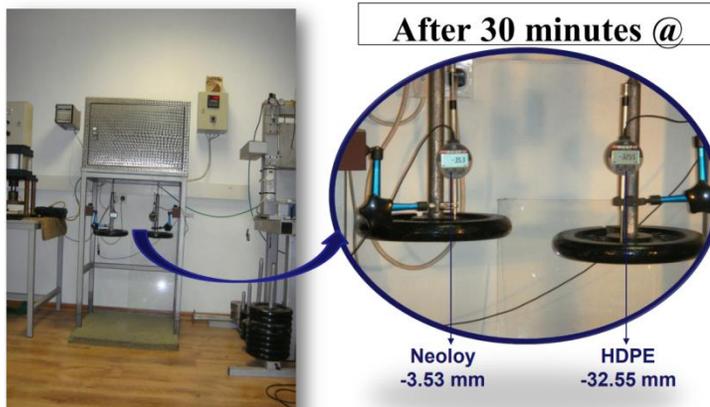
<sup>21</sup> PAVCO (2011) y PRS (2015)

<sup>22</sup> ASTM, 2016

<sup>23</sup> GÓMEZ G., 2017

<sup>24</sup> WAVIN, y otros, 2011

Ilustración 7. Ensayo SIM.



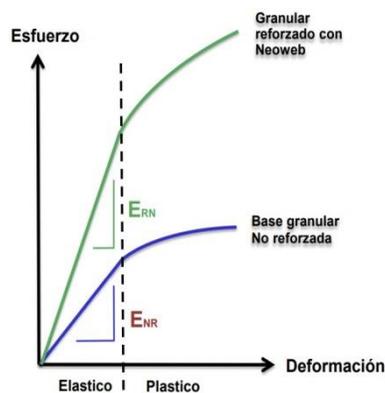
Fuente: (Wavin, y otros, 2011).

Según PAVCO & Marín (2011) las Geoceldas HDPE en comparación con las Neoloy, son poco empleadas hoy en día en el campo de la ingeniería civil, algunas son utilizadas para la protección y control de erosiones, taludes y canales. Las nuevas Geoceldas Neoloy, tienen un amplio uso en la construcción como en la infraestructura vial, las cargas cíclicas, cimientos con poca capacidad portante y entre otros. En la Ilustración 8, se muestra el esquema de gráfica Esfuerzo vs Deformación con y sin refuerzo Las Neoloy, proveen un Alto Módulo Elástico y un Alto Módulo Plástico, las cuales se muestran sus propiedades a continuación:

**Módulo Elástico Mejorado:** Contienen menos deformaciones en el rango elástico, expansiones de la zona de esfuerzos elásticos, reduciendo el rango de esfuerzos causadas por deformaciones plásticas.

**Módulo Plástico Mejorado:** Contienen menos deformaciones en el rango plástico, reducción de deformaciones plásticas acumuladas, mantenimiento del módulo mejorado por largos periodos de tiempo.

Ilustración 8. Gráfico Esfuerzo vs deformación con y sin refuerzo.

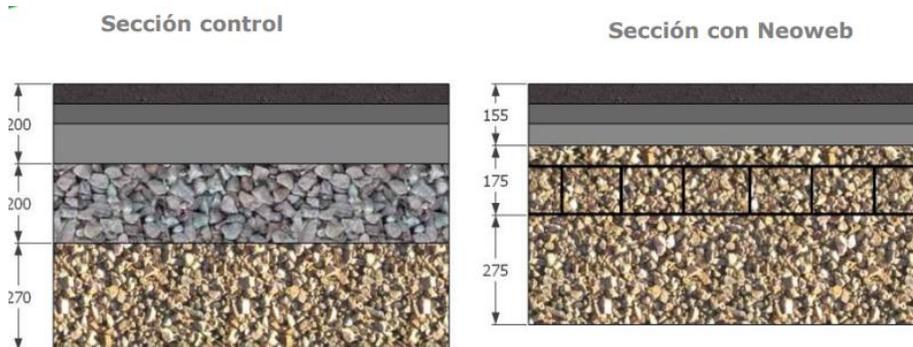


Fuente. (Wavin, y otros, 2011).

Según Gómez (2017), el comportamiento de algunos materiales al someterlos a cargas cíclicas, muestran deformaciones plásticas a largo plazo o Creep, para el caso de la solución de confinamiento celular de materiales granulares, resulta de gran importancia conocer este comportamiento dado que las Geoceldas son las que proporcionan el control de dichas deformaciones, por lo tanto, para medir este comportamiento en las Geoceldas, se debe realizar el ensayo SIM a través de la inclusión de temperatura en el material para recrear el paso del tiempo, normalizado por la ASTM D6992<sup>25</sup>.

Un ejemplo de aplicación en la vida real con este sistema de confinamiento celular 4D, fue en Cross Israel Highway, el cual, es una autopista ubicada al sur de Israel con longitud de 140Km (Ver Ilustración 10). Tiene como objetivo lograr el refuerzo del suelo mediante las Neoloy, ya que, este terreno posee un CBR entre 4 – 5%. Mediante la Ilustración 9, se muestra las ventajas del refuerzo con Neoloy para la subrasante del proyecto<sup>26</sup>.

Ilustración 9. Sección sin Neoweb y con Neoweb



Fuente: (Wavin, y otros, 2011).

Ilustración 10. Autopista en proceso constructivo y final del Proyecto.



Fuente. (Wavin, y otros, 2011).

<sup>25</sup> GÓMEZ, 2017

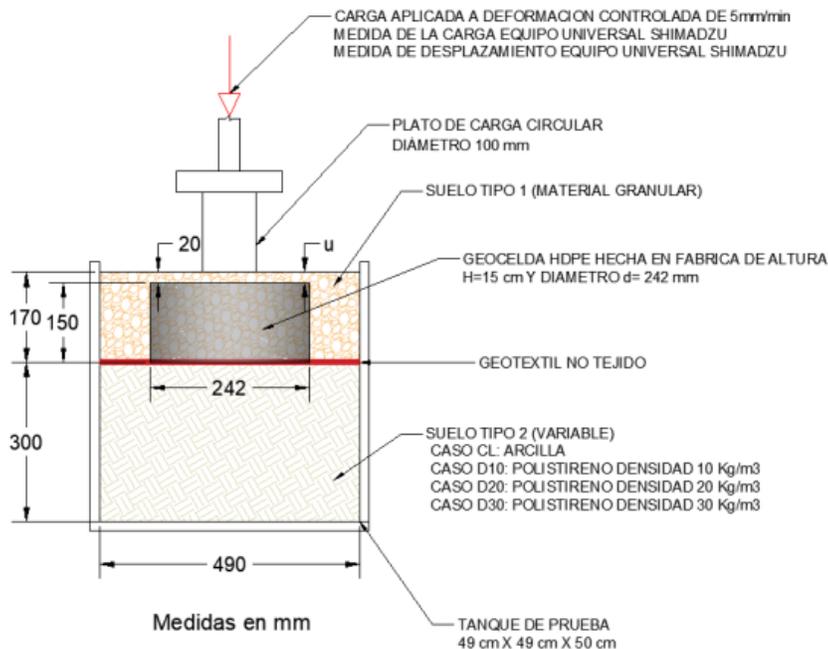
<sup>26</sup> WAVIN, y otros, 2011

En el proyecto de Israel, reemplazaron el material tipo base de alta calidad por subbase granular y redujeron el espesor de base asfáltica en 5cm, obteniendo un ahorro de 37% en costo. Considerando dimensiones de las celdas con distancia de soldadura de 330mm y de altura igual a 125mm.

### 5.3. ESTUDIOS EXPERIMENTALES

Según Torres Miguel (2021), inició con la realización de un modelo experimental con un tanque de pruebas de dimensiones cercanas a un área de un metro cuadrado que permitiera el uso de varios bolsillos de Geoceldas. La base de cimentación para el test de modelo en laboratorio, se muestra en la Ilustración 11. Seguidamente, Torres Miguel preparó un tanque y una carga de placa en acero con relojes comparadores y celdas de cargas que se emplearon para medir el desplazamiento de la base y la carga aplicada respectivamente. Luego, realizó el diseño de la configuración de un modelo experimental de tal forma que se pudiera materializar acorde a los recursos disponibles en el laboratorio de geotecnia y estructuras de la Universidad Nacional de Colombia, con base en ello, decidió utilizar el equipo universal de ensayos servocontrolado de referencia Autograph AG-X plus con capacidad máxima de carga de 300 kN fabricado por la compañía SHIMADZU, este equipo permite medir un amplio rango de fuerzas en la prueba con una sola celda de carga, así como también permite medir los desplazamientos que se dan en el centro de aplicación de la carga de forma automatizada.

Ilustración 11. Representación esquemática del modelo de laboratorio



Fuente. (Torres. P, 2021).

Para este estudio experimental realizado por Torres Miguel (2021), define las siguientes configuraciones de los modelos:

- Dimensiones del tanque de prueba: 49 cm largo x 49 cm ancho x 50 cm de altura.
- La forma del plato de carga fue circular con un diámetro de la placa utilizada como fundación en la prueba modelo de laboratorio  $B=100$  mm.
- Se aplicó carga por desplazamiento servocontrolado a velocidad de 5 mm/min.
- Se usó como suelo tipo 1 un material granular como relleno de la matriz de la Geocelda la altura de esta capa se mantuvo constante en  $H=170$  mm.
- Se usó una Geocelda disponible comercialmente fabricada en HDPE hecha en fábrica.
- La altura de la Geocelda utilizada en el modelo fue de  $h=150$  mm.
- El diámetro equivalente del bolsillo de Geocelda fue de  $d=242$  mm.
- Como profundidad de ubicación de la Geocelda se tomó  $u=20$  mm.
- Se utilizó un geotextil no tejido típico para separación de capas granulares y capas de subrasante.
- El suelo tipo 2 utilizado como base subyacente al suelo tipo 1 se varió en cuatro materiales diferentes que fueron arcilla, poliestireno de densidad 10 kg/m<sup>3</sup>, poliestireno de densidad 20 kg/m<sup>3</sup>, y poliestireno de densidad 30 kg/m<sup>3</sup>. La altura del suelo tipo 2 fue constante en  $H_2=300$  mm para todas las pruebas.

Investigadores como Yoshida & Saji (1995) que estudiaron el comportamiento de la zapata circular que descansa sobre arena reforzada con Geocelda, también, Han; Pokharel; Yang; Manandhar; Leshchinsky; Halahmi & Parsons (2011) realizaron el estudio de bases RAP reforzadas con Geoceldas sobre subrasantes débiles bajo cargas de ruedas y entre otros que se suman entorno a este sistema de confinamiento celular, evaluando el rendimiento general de bases de cimentación con Geoceldas, además, se estudiaron el efecto de la geometría de Geoceldas, las propiedades de las bases de cimentación, los materiales de relleno y el efecto de la geomalla basal. El rendimiento global del lecho de cimentación se cuantificó en términos del aumento de la capacidad portante y la reducción del asentamiento<sup>27</sup>.

---

<sup>27</sup> HEDGE, 2017

En la Tabla 3, se resume importantes estudios de laboratorio relacionados con bases de cimentación reforzados con Geoceldas.

Tabla 3. Estudios experimentales con zapatas soportadas con Geoceldas

Resumen de los estudios experimentales relacionados con zapatas soportadas con Geoceldas

INVESTIGADORES	FORMA	SUELO DE FUNDACIÓN	MATERIAL RELLENO	MATERIAL GEOCELDA	PÁRAMETRO VARIADO
Rea y Mitchell	Circular	Arena	Caucho/Arena	Papel	D/b ; b/h ; k
Bathurst y Jarrett	Tira	Turba	Agregado Triturado	Polietileno	T
Mandal y Gupta	Tira	Arcilla Marina Blanda	Arena	Geotextil	h/B
Krishnaswamy et al.	Tira	Aceite Suave	Aceite Suave	Geomallas	GM
Dash et al.	Tira	Arena	Arena	Geomallas	b/B ; h/B; d/B
Dash et al.	Circular	Arcilla Limosa	Arena	Geomallas	b/D ; h/D ; BG
Dash et al.	Tira	Arena	Arena	Geomallas	BG
Sitharam y Sireesh	Circular	Arena y Arcilla	Arena, Arcilla Húmeda	Geomallas b/D; H/P; u/D	b/D; h/D; u/D
Sitharam y Sireesh	Circular	Arena y Arcilla	Arena	Geomallas h/D ; BG	h/D; BG
Thallak et al.	Circular	Arcilla Limosa	Arcilla Limosa	Geomallas b/D; H/P; Tu/D	b/D; h/D; RD
Madhavi y Somwanshi	Cuadrado	Arena	Arena	Geomallas y Georedes	RD
Pokharel et al.	Circular	Base Firme	Arena	HDPE y Neoloy	h; IM; GS; GM
Hedge y Sitharam	Cuadrado	Arena y Arcilla	Arena	Neoloy	BG
Hedge y Sitharam	Cuadrado	Arcilla	Arena	Neoloy, Bamboo	GM

Fuente. Hedge (2017).

Según cuenta Hedge & Sitharam (2015), el aumento en la capacidad portante debido a la provisión del refuerzo se puede medir a través de un parámetro adimensional llamado factor de mejora de la capacidad portante ( $I_f$ ), que se define de la siguiente manera.

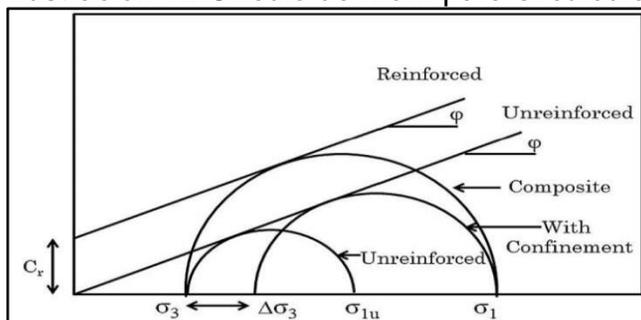
$$I_f = \frac{q_r}{q_o}$$

Donde  $q_r$  es la presión portante de la base reforzada en un asentamiento particular y  $q_o$  es la presión portante de la base no reforzada en el mismo asentamiento. El factor de mejora de la capacidad de carga es similar al índice de capacidad de carga informado. Cuando la relación está más allá de la capacidad de carga última de la base no reforzada, se utiliza la capacidad de carga última ( $q_{ult}$ ) en lugar de  $q_o$ . El factor de mejora depende de varios parámetros, como las propiedades del suelo de cimentación, el material y la relación de aspectos de la Geoceldas y las propiedades del suelo de relleno. Además, para un tipo particular de Geoceldas y el suelo, el factor de mejora incluso varía con el asentamiento de

la base. En promedio, el factor de mejora para las Geoceldas Neoloy varía en el rango de 4 a 6. Sin embargo, algunos investigadores han informado valores incluso de hasta 9 para diferentes condiciones de banco de pruebas.

Hedge (2017) comenta que la mejora en la resistencia y la rigidez del suelo reforzado con las Geoceldas, también se puede estudiar mediante ensayos triaxiales. Según Bathurst & Karpurapu (1993) llevaron a cabo una serie de pruebas triaxiales a gran escala en muestras de Geoceldas aisladas de 200 mm de altura, por lo que, los resultados indicaron una mejora drástica en la aparente cohesión con refuerzo de este sistema de confinamiento celular. Luego, Rajagopal (1999) también realizó pruebas de compresión triaxial en suelo granular encerrado en Geoceldas simples y múltiples. Tanto las muestras reforzadas con Geoceldas como las no reforzadas exhibieron la misma resistencia a la fricción, pero observaron un incremento significativo en la cohesión aparente ( $C_r$ ) en el caso reforzado, como se muestra en la Ilustración 12. El círculo pequeño se refiere al círculo de Mohr del suelo no reforzado, debido a la provisión de refuerzo de Geoceldas y la tensión de confinamiento aumenta de  $\sigma_3$  a  $\sigma_3 + \Delta\sigma_3$ . Debido a lo cual, la tensión normal última aumenta a  $\sigma_1$  desde  $\sigma_{1u}$ . El círculo intermedio en la Ilustración indica el círculo de Mohr correspondiente a este estado. La misma tensión última también se puede representar con el círculo de Mohr más grande que tiene una presión de confinamiento de  $\sigma_3$  y una cohesión aparente de  $C_r$ . Los investigadores observaron que el refuerzo de Geoceldas imparte una aparente fuerza cohesiva incluso al suelo sin cohesión. Además, Zhang; Javadi & Min (2006) opinaron que la inclusión del refuerzo 3D aumenta tanto la cohesión aparente como el ángulo de fricción interna del suelo. Los estudios realizados por Hedge (2017) sobre las Geoceldas por los distintos investigadores, han comprendido que la forma diferente de las Geoceldas, a saber, circular, rectangular y el hexagonal<sup>28</sup>. De todas las formas probadas de las Geoceldas, encontraron que la forma circular era la más efectiva para aumentar la cohesión aparente. La Tabla 4 resume las actividades de investigación pasadas relacionadas con los estudios triaxiales sobre las Geoceldas.

Ilustración 12. Círculo de Mohr para el cálculo de la cohesión aparente



Fuente: Hedge (2017).

<sup>28</sup> HEDGE, 2017

**Caracterización de las Geoceldas en laboratorio.** Las Geoceldas utilizadas en los modelos del presente estudio de Torres Miguel (2021), fue suministrada por la empresa Syntex Colombia SAS (2022). Estas Geoceldas fueron fabricadas en polietileno de alta densidad (HDPE) y Nanofibras con una altura de 15 cm y un diámetro equivalente del bolsillo  $\emptyset$  de 242 mm. Las Geoceldas utilizada en el modelo tiene una separación entre soldaduras de 445 mm. La Tabla 4 presenta las propiedades y especificaciones de las Geoceldas utilizadas<sup>29</sup>.

Tabla 4.Ficha Técnica Geoceldas utilizadas en el laboratorio

<b>PROPIEDADES DEL POLÍMERO</b>	<b>MÉTODO DE ENSAYO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALORES TÍPICOS</b>
DENSIDAD DEL POLÍMERO	ASTM D-1505	g/cm <sup>3</sup>	0.94
CONTENIDO DE NEGRO DE HUMO	ASTM D-1603	%por peso	1.5% mínimo
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>	<b>MÉTODO DE ENSAYO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALORES TÍPICOS</b>
ESPESOR NOMINAL <sup>2</sup> DE LA PARED DE LA CELDA ANTES DE TEXTURIZAR	ASTM D-5199	mm	1.1±10%
ESPESOR NOMINAL <sup>2</sup> DE LA PARED DE LA CELDA DESPUÉS DE TEXTURIZAR	ASTM D-5199	mm	1.25±10%
MEDIDA NOMINAL DE CELDA EXPANDIDA	MEDIDA	mm	325 x 283
MEDIDA NOMINAL DEL PANEL EXPANDIDO	MEDIDO	m	2.60 x 9.51
ÁREA NOMINAL DEL PANEL EXPANDIDO	MEDIDO	m <sup>2</sup>	24.99
ALTURA DE LA CELDA	MEDIDA	mm(in)	150(6)
<b>PROPIEDADES MECÁNICAS</b>	<b>MÉTODO DE ENSAYO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALORES TÍPICOS</b>
RESISTENCIA ÚLTIMA A TENSIÓN DE LAS UNIONES	ISO 13426-1 Método B	kN/m	15
RESISTENCIA ÚLTIMA A TENSIÓN DE LAS UNIONES	ISO 13426-1 Método C	kN/m	28
ESFUERZO DE FLUENCIA A TENSIÓN	ASTM D6693	kN/m	25
ESFUERZO DE ROTURA A TENSIÓN	ASTM D6693	kN/m	20
EFICIENCIA DE LA SOLDADURA (%)	GRI-SS-13	%	100
TIEMPO DE INDUCCIÓN OXIDATIVA	ASTM D3895	min	>100
RESISTENCIA AL AGRIETAMIENTO EFECTOS AMBIENTALES	ASTM D1693	horas	4000
ÁNGULO DE FRICCIÓN CONJUNTO ARENA PARED DE CELDA		°	>30°

Fuente. Syntex Colombia SAS.

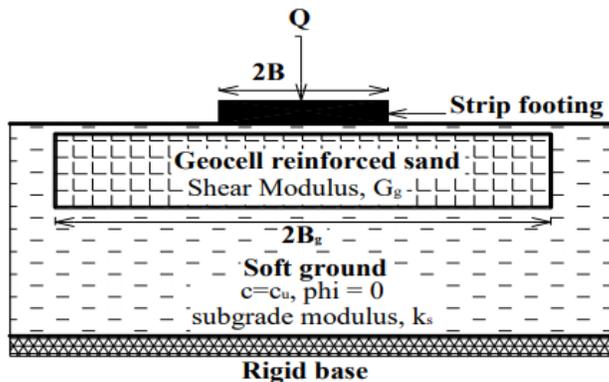
#### 5.4. ESTUDIOS ANALITICOS

<sup>29</sup> TORRES, Miguel, 2021

Koerner (2012) propuso la solución analítica para estimar la capacidad portante de las bases de cimentación reforzados con Geoceldas. Este método atribuye el aumento en la capacidad portante del suelo reforzado con este sistema de confinamiento celular al efecto de resistencia lateral desarrollado debido a la fricción interfacial entre el suelo y la pared celular. Además, en el presente capítulo Mole, Faby (2013) cuenta sobre cimentaciones en suelos reforzados con Geoceldas, en zapatas rígidas y el comportamiento de la capa granular reforzada (asocia la dependencia de la tensión) sobre suelo blando, como se muestra en la Ilustración 13<sup>30</sup>.

Ilustración 13. Croquis zapata.

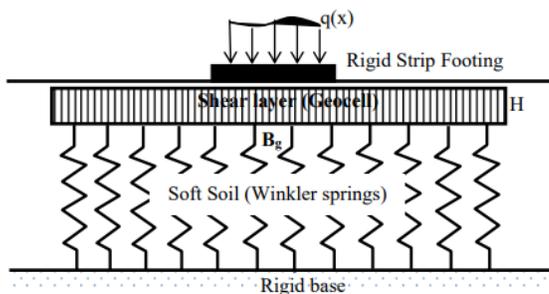
Croquis zapata corrida sobre base de cimentación reforzada con Geoceldas



Fuente: (Mole, 2013).

El sistema se idealiza considerando el modelo de Pasternak elástico de dos parámetros como se muestra en Ilustración 14. El relleno granular reforzado con Geoceldas y el suelo de cimentación blanda se idealizan utilizando una capa de corte Pasternak y una serie de resortes Winkler, respectivamente. El perfil de asentamiento de la cimentación reforzada con Geoceldas sobre suelo blando se asume como se muestra en la Ilustración 15.

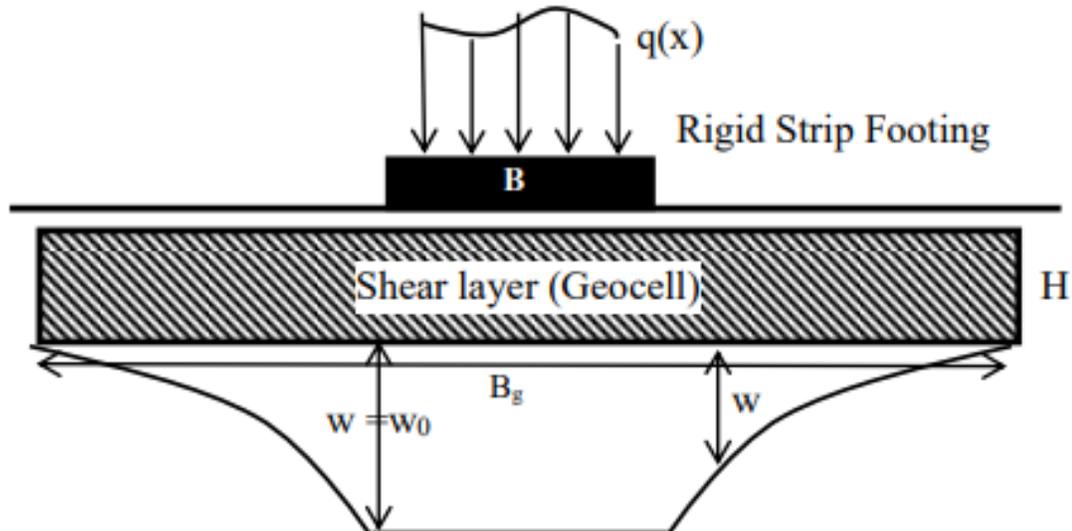
Ilustración 14. Capa corte Pasternak idealizada sobre resortes Winkler.



<sup>30</sup> MOLE, Faby, 2013

Fuente: (Mole, 2013).

Ilustración 15. Perfil deflexión capa corte Pasternak sobre resortes Winkler



Fuente: (Mole, 2013).

Se supone que para una unidad de desplazamiento dada ( $W_0$ ) sobre la zapata continua rígida, la capa de cortante se deforma con el mismo desplazamiento sobre el ancho de la zapata ( $B$ ) y la deflexión desde el borde de la zapata hasta el borde la capa de corte de ancho ( $B_g$ ). La rigidez relativa de la capa de corte reforzada con Geoceldas y el suelo de cimentación son los parámetros clave para comprender el comportamiento de los lechos granulares reforzados con Geoceldas sobre suelos blandos<sup>31</sup>.

#### 5.4.1. Formulación Matemática

**Formulación lineal.** Se presenta la ecuación gobernante para el patrón de deflexión de carga del problema considerando la capa de corte, con la ayuda del modelo de Pasternak que incorpora el comportamiento dependiente de la tensión:

$$q(x) = K_s * W_0 ; 0 \leq |x| \leq \frac{B}{2}$$

$$K_s * W - G_g * H * \frac{d^2W}{dx^2} = 0 ; \frac{B}{2} \leq |x| \leq \frac{B_g}{2}$$

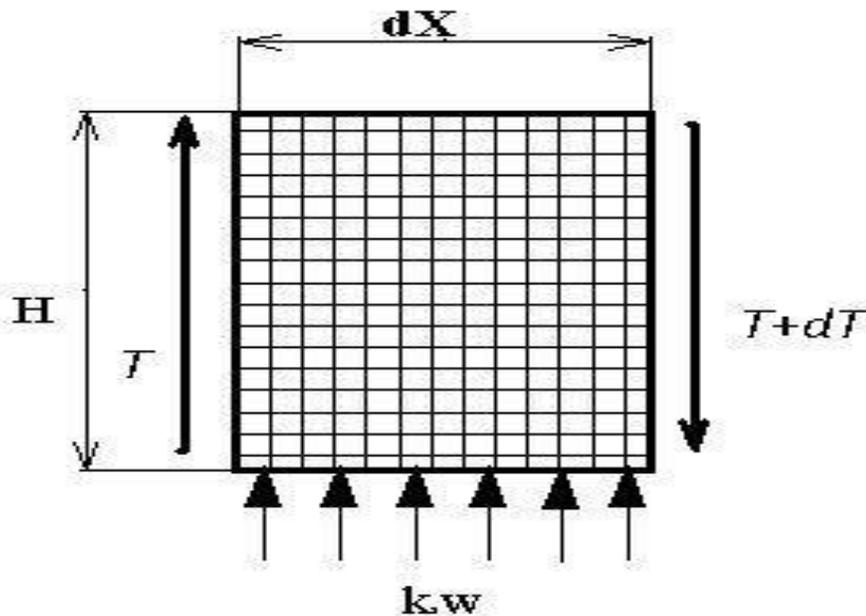
<sup>31</sup> MOLE, Faby, 2013

La ecuación anterior representa el perfil de deflexión desde el borde hasta el borde de la Geocelda. Está bien establecido que el módulo de deformación o el módulo de corte del suelo es directamente proporcional a la tensión de confinamiento. Según la relación de Janbu, el módulo de corte es una función de la tensión de confinamiento de la siguiente manera:

$$G = G_0 * \left( \frac{\sigma'}{\sigma_0'} \right)^n$$

Las fuerzas que actúan sobre el área elemental en la capa de corte se muestran en la Ilustración 16.

Ilustración 16. Fuerzas que actúan sobre un área elemental



Fuente. (Mole, 2013).

Los perfiles de deflexión desde el borde de la zapata hasta el borde de la Geocelda se muestran en la

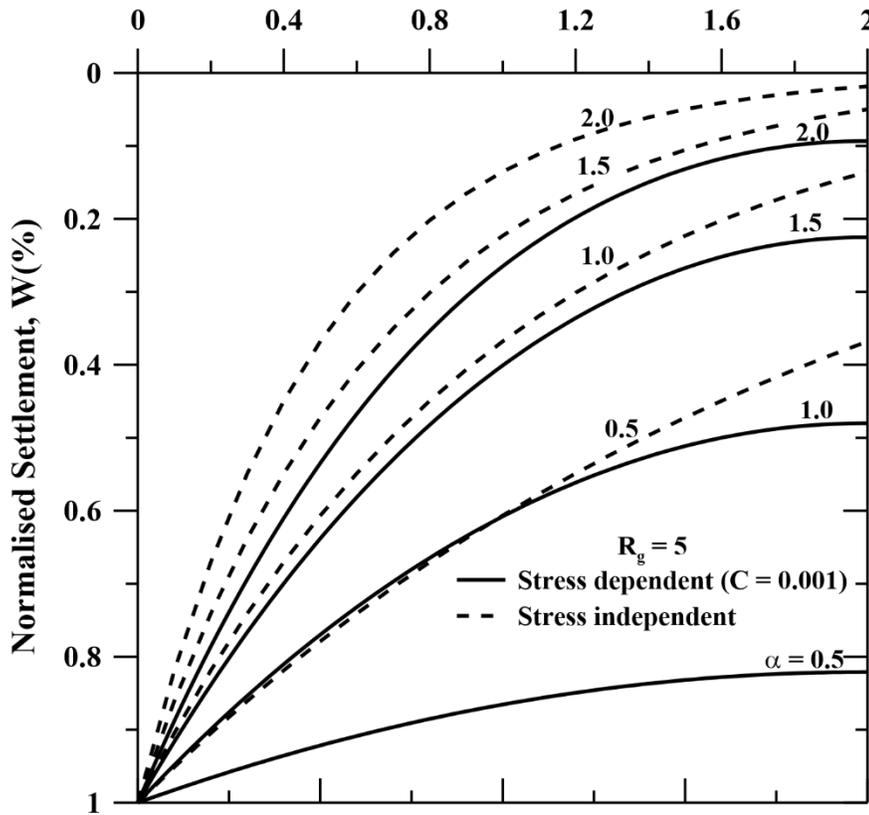
Ilustración 17. Las líneas continuas representan el modelo que predice el patrón de asentamiento cercano al comportamiento real incorporando las tensiones de confinamiento en la capa de Geoceldas. En el análisis normal, el módulo de corte de la Geocelda se toma como constante en toda la capa de corte, mientras que el modelo mejorado considera la variación en el módulo de corte de la capa de Geocelda. El modelo mejorado muestra una distribución uniforme de la carga con alta capacidad de carga<sup>32</sup>.

---

<sup>32</sup> MOLE, 2013

Ilustración 17. Perfil de asentamiento desde el borde de la Zapata

Perfil de asentamiento desde el borde de la Zapata hasta el borde de la capa de Geoceldas



Fuente: (Mole, 2013).

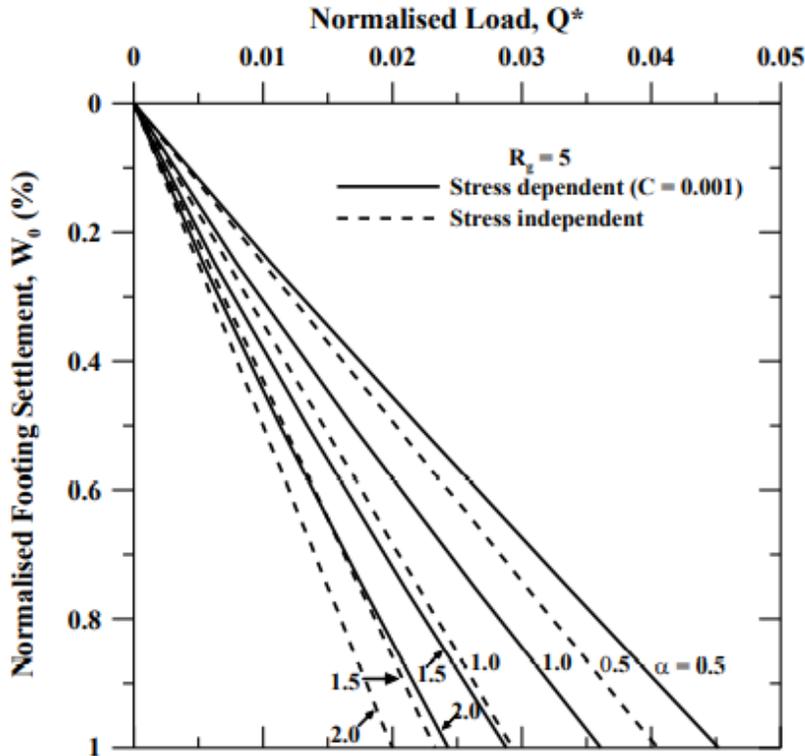
El asentamiento de carga correspondiente con la variación en la rigidez de la capa de Geoceldas se representa en la

Ilustración 18. Como era de esperar, el modelo que incorpora el efecto de confinamiento/dependencia del estrés es capaz de soportar cargas más altas. El modelo anterior predice el comportamiento real. La curva de asentamiento de carga lineal es aplicable para asentamientos normalizados muy bajos del orden del 1%<sup>33</sup>.

---

<sup>33</sup> MOLE, 2013

Ilustración 18. Curva de asentamiento de carga lineal (Variación en  $\alpha$ )



Fuente. (Mole, 2013).

**Condiciones de contorno.** Según Mole Faby (2013). El asentamiento continuo rígido se considera uniforme bajo el área cargada. Por lo tanto, el asentamiento normalizado ( $W$ ) en el borde es igual al asentamiento normalizado ( $W_0$ ). La pendiente del perfil de asentamiento (gradiente del perfil de asentamiento,  $dW/dX$ ) es cero en el borde de la capa de Geoceldas, es decir,  $R = R_G/2$ . Estas dos condiciones de contorno han sido fundamentales para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias tanto lineales como no lineales.

En forma matemática se puede escribir como:

$$@R = 0,5 ; W = W_0$$

$$R = \frac{R_g}{2} \rightarrow \frac{dW}{dX} = 0$$

### 5.4.2. Validación

**Validación numérica.** En asentamientos muy altos, la curva carga-asentamiento, Ecuación converge a una constante  $Q^*$ , obtenida de la Ecuación.

$$Q^* = \frac{1}{\mu} + 2 \int_{0,5}^{R_g/2} \frac{1}{\mu} dx = \frac{1}{\mu} + \frac{2}{\mu} \left( \frac{R_g}{2} - 0,5 \right)$$

Para comprobar la precisión del modelo dependiente de la tensión, se realizó una prueba con asentamientos del 75 % para determinar si coincide con el resultado obtenido de la Ecuación. Para  $R_g = 5$  y  $\mu = 50$ , la Ecuación da como resultado la solución 0,1. El resultado obtenido del análisis numérico (Matlab) es 0,0974. El porcentaje de error es -2,73%. Este error se debe a errores de truncamiento y redondeo en el método de diferencias finitas, como es mencionado por Mole Faby (2013).<sup>34</sup>

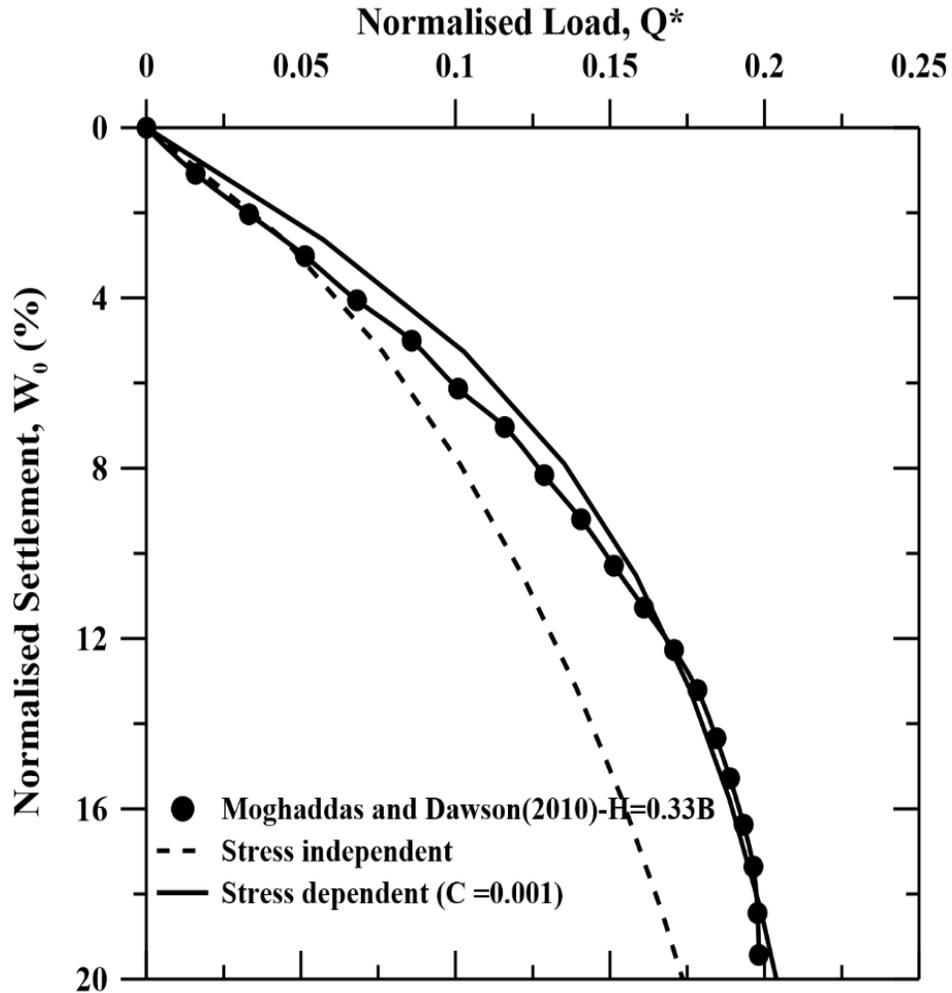
**Validación Teórica.** El modelo que incorpora la dependencia del estrés se reduce al modelo no lineal cuando el parámetro de Janbu,  $n=0$ . Se llevó a cabo un análisis similar en el modelo dependiente de la tensión sustituyendo  $n=0$  y se encontró que los resultados del modelo no lineal y dependiente de la tensión concordaban bien, como lo menciona Mole Faby (2013).

**Validación Experimental.** Según Mole Faby (2013), la eficiencia del modelo actual se revisó con la ayuda de investigaciones experimentales sobre zapatas corridas en bases de arena reforzados con Geoceldas que fueron realizadas por Moghaddas & Dawson (2010). A partir de los datos experimentales se determinaron el módulo de reacción de la subrasante, la capacidad portante última, el módulo de corte estático de la capa reforzada con Geoceldas (obtenido del módulo elástico) y los valores de la inversa del módulo de corte del suelo reforzado con Geoceldas ( $\alpha$ ) y la inversa de la  $S_e$  calculó la capacidad portante última del subsuelo ( $\mu$ ).

---

<sup>34</sup> MOLE, Faby, 2013.

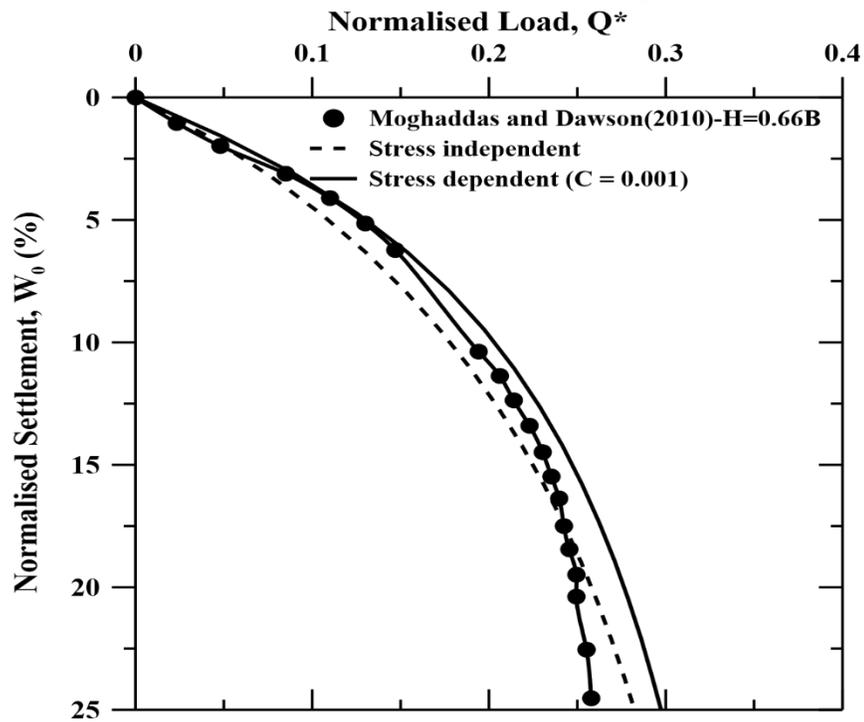
Ilustración 19. Curva de asentamiento de carga normalizada ( $H=0.33B$ ).



Fuente. (Mole, 2013).

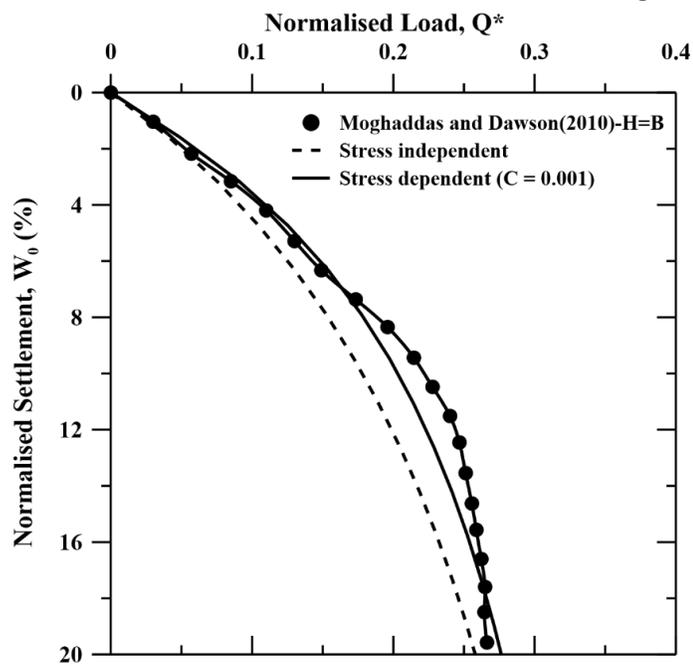
Las ilustraciones 19 hasta 21, muestran la curva de asentamiento de la carga del modelo no lineal, el modelo dependiente de la tensión y los datos experimentales para varios espesores de la capa reforzada con Geoceldas. La predicción del modelo no lineal fue válida para asentamientos normalizados bajos del orden del 5% y para asentamientos normalizados más altos, el modelo dependiente de la tensión predice mejor. Se analizaron tres casos de la prueba experimental y sobre el rango completo de 0-20% los resultados concuerdan bien cualitativa y cuantitativamente.

Ilustración 20. Curva de asentamiento de carga normalizada ( $H=0.66B$ )



Fuente. (Mole, 2013).

Ilustración 21. Curva de asentamiento de carga normalizada ( $H=B$ ).

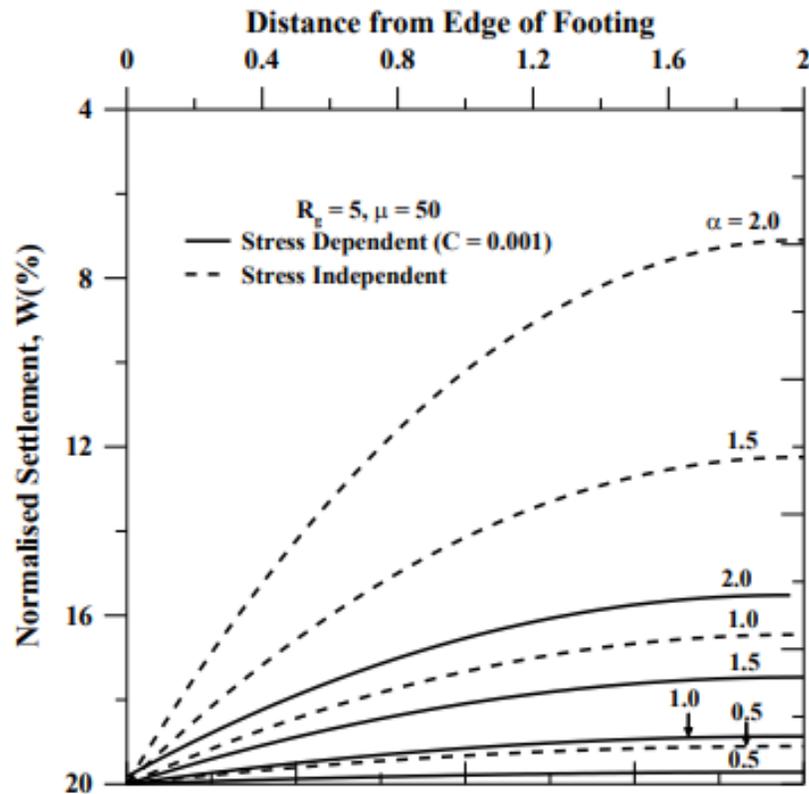


Fuente. (Mole, 2013).

El perfil de deflexión desde el borde de la zapata hasta el borde de la capa de Geoceldas como lo describe el modelo de Pasternak que incorpora la respuesta no lineal y el comportamiento dependiente de la tensión, como se muestra en la Ilustración 22. La ecuación que representa el patrón de deflexión en función de  $\alpha$  y  $\mu$  se representa como una línea discontinua. Queda claro que el modelo no lineal sin dependencia de la tensión no distribuye la carga de manera uniforme y para las Geoceldas con alta rigidez al corte, el comportamiento varía significativamente. El patrón de asentamiento de carga correspondiente se muestra en la

Ilustración 23. El patrón de asentamiento de la carga muestra una variación mínima con el aumento de la rigidez de la capa de Geocelda cuando también se tiene en cuenta el efecto de confinamiento de la Geocelda. Pero aquí se observa una tendencia de variación similar a la del modelo no lineal. La carga que soportan las Geoceldas de alta rigidez al corte es alta pero la variación es comparable con la de las Geoceldas de baja rigidez al corte, según lo menciona Mole Faby (2013)<sup>35</sup>.

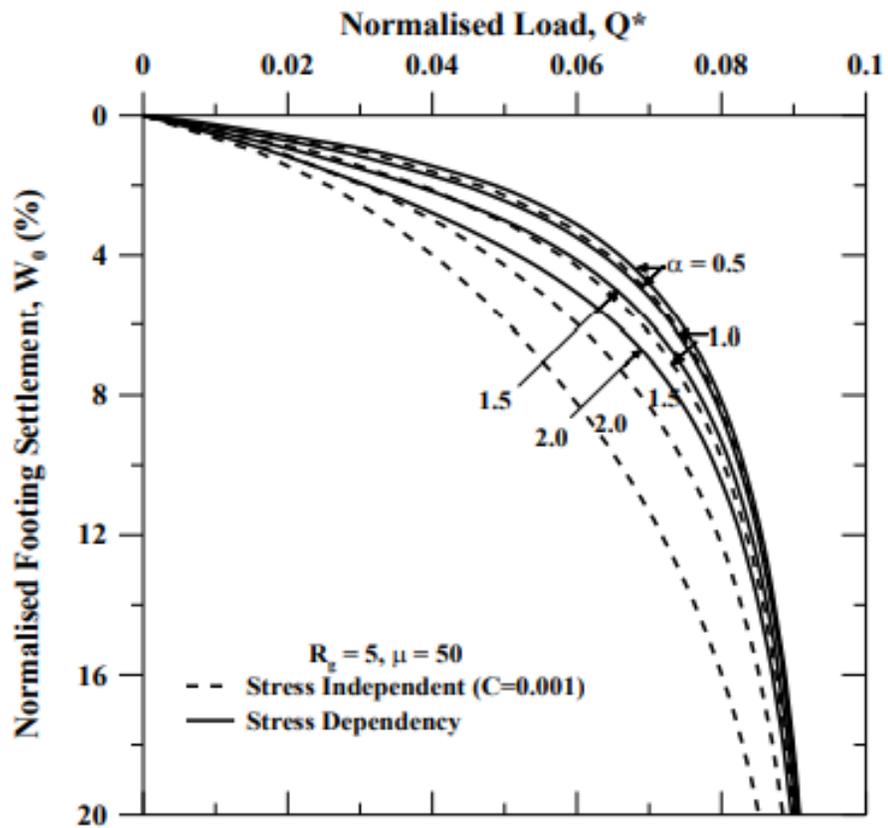
Ilustración 22. Perfil deflexión desde el borde zapata hasta el borde Geocelda.



Fuente. (Mole, 2013).

<sup>35</sup> MOLE, Faby, 2013

Ilustración 23. Curva de asentamiento de carga normalizada (Variación en  $\alpha$ ).

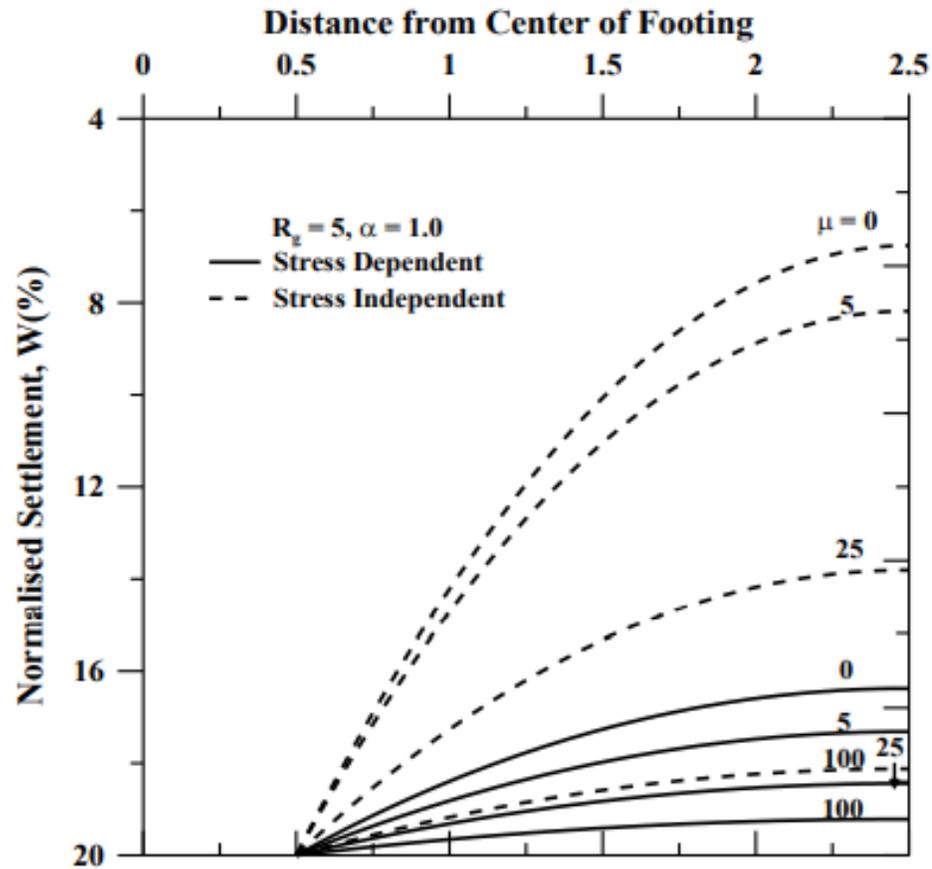


Fuente: (Mole, 2013).

El perfil de deflexión desde el borde de la zapata hasta el borde de la Geocelda con variación en las condiciones del subsuelo, como se muestra en la

Ilustración 24. Hay un efecto mínimo en el patrón de asentamiento con variación en la condición del subsuelo para el modelo con incorporación del efecto de confinamiento, mientras que el modelo no lineal anterior muestra una variación significativa en el patrón de asentamiento con variación en las condiciones del subsuelo. También se observó a partir de la Ilustración que existe una distribución uniforme de carga para suelos con baja capacidad de carga última que para suelos más rígidos.

Ilustración 24. Perfil de deflexión borde de la zapata hasta borde Geocelda

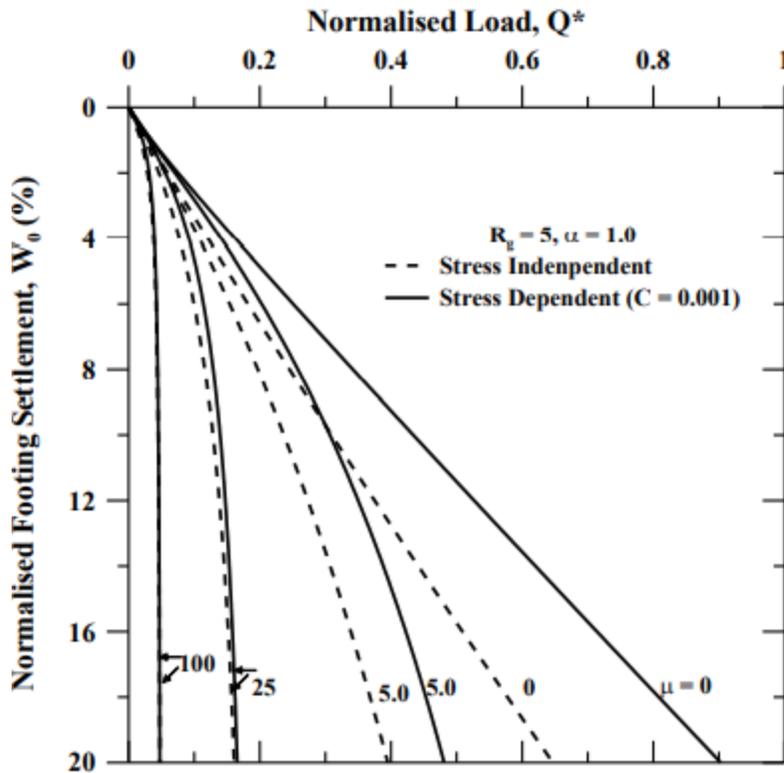


Fuente. (Mole, 2013).

La correspondiente curva de asentamiento de carga normalizada se representa en la

Ilustración 25. La variación de carga que toma el suelo reforzado con Geoceldas es alta, especialmente cuando el subsuelo es de alta resistencia. Debido al confinamiento completo que ofrece la Geocelda, el suelo es capaz de soportar mayores tensiones.

Ilustración 25. Curva de asentamiento de carga normalizada (Variación en  $\mu$ ).



Fuente. (Mole, 2013).

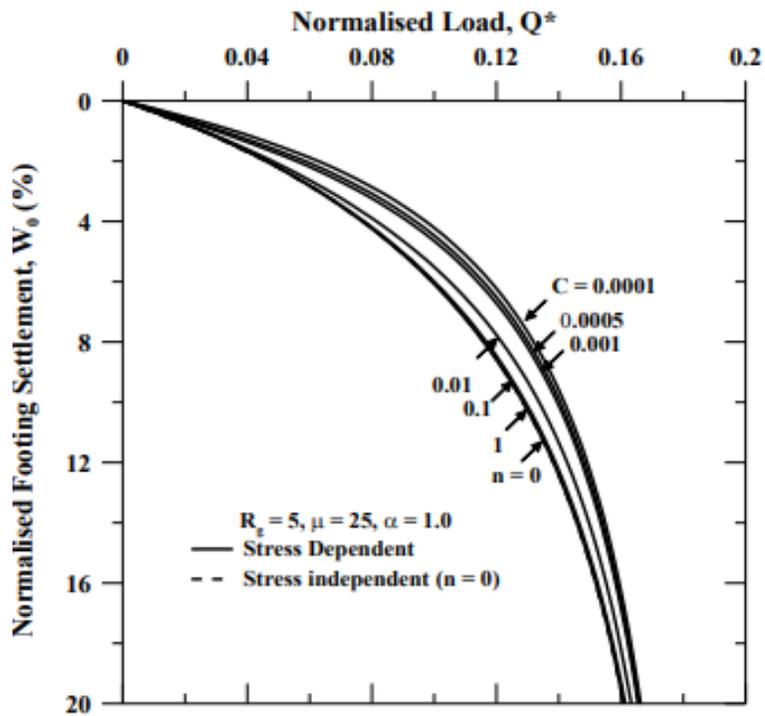
Según Mole Faby (2013), en la Ilustración 26 se evidencia la curva de asentamiento de carga normalizada para varios coeficientes de compactación en el rango de 0-20%. La variación en el patrón de la curva de asentamiento de la carga con la dependencia de la tensión es significativa en el rango de 0-20% y además converge a un valor constante, por lo que, se encontró que la variación en la curva de asentamiento de la carga era máxima para el rango más bajo de valores  $\mu$ .

La variación en el factor de mejora ( $I_f$ ) con la inversa de la rigidez a cortante normalizada ( $\alpha$ ) se representa en la Ilustración 27. La

Ilustración 28 muestra la variación de  $I_f$  con la rigidez del subsuelo y una observación interesante que se infirió del gráfico es que para suelos de alta rigidez ( $\mu = 0$ ) los factores de mejora que se reportan son bajos debido a que la capacidad de carga del suelo con la rigidez alta es muy alta y la mejora adicional con la inclusión de Geocelda es marginal.

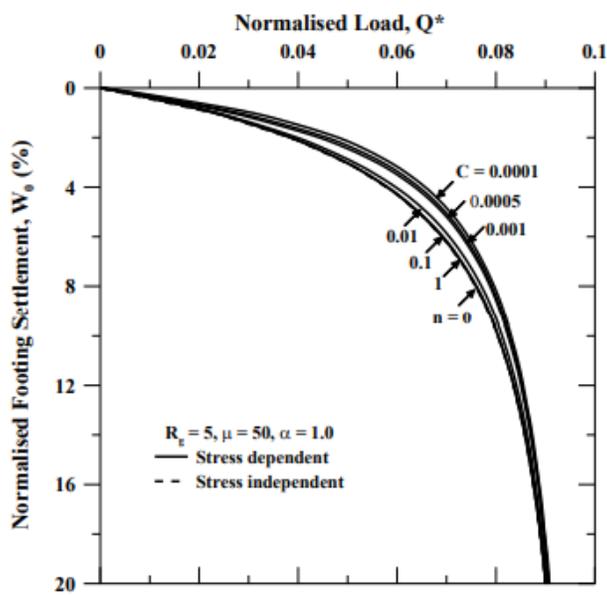
### Carga Normalizada, $Q^*$

Ilustración 26. Curva asentamiento carga normalizada - C variable ( $\mu = 25, \alpha = 1$ )



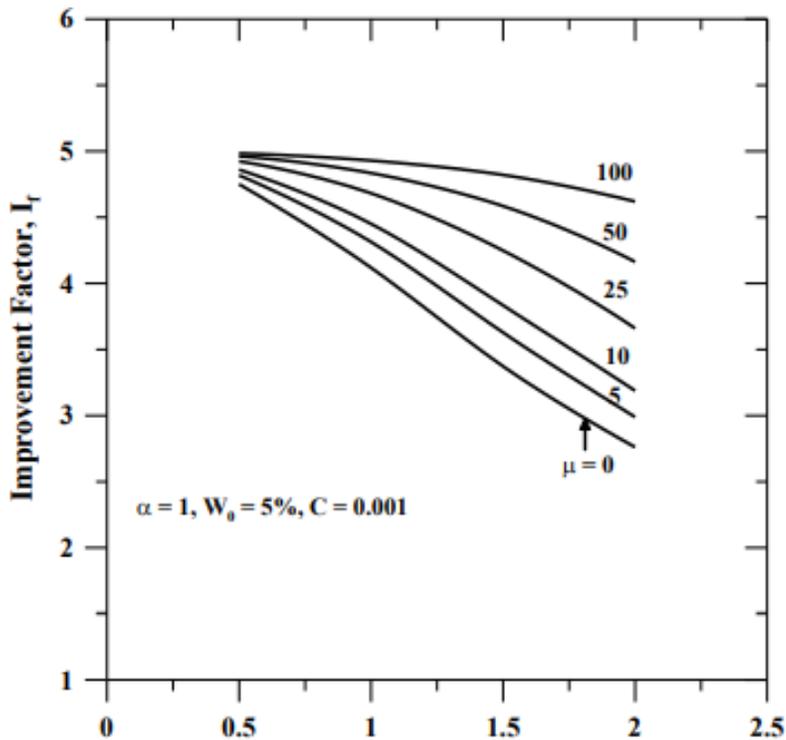
Fuente. (Mole, 2013).

Ilustración 27. Curva asentamiento carga normalizada variable C ( $\mu = 50, \alpha = 1$ ).



Fuente. (Mole, 2013).

Ilustración 28. Variación de  $I_f$  con  $\alpha$  (Variando  $W_0$ )



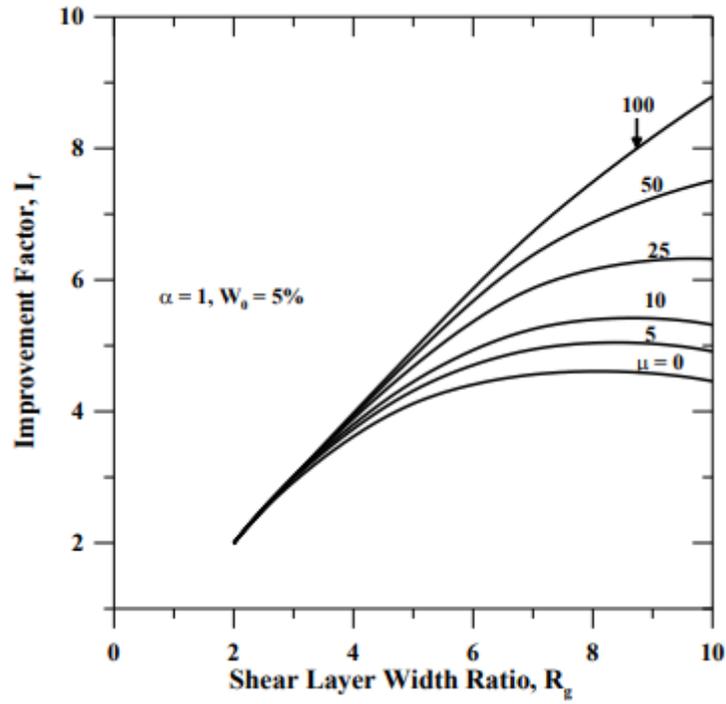
Fuente. (Mole, 2013).

En la

Ilustración 29, se muestra la variación del factor de mejora ( $I_f$ ) con la relación de ancho de la capa de corte ( $R_g$ ) al variar varios parámetros ( $\mu, C, \alpha, W_0$ ). Hay una clara tendencia de mejora con el aumento del ancho de la capa de Geoceldas, pero la mejora permanece estancada más allá de  $R_g$  5 en los casos habituales. Para subsuelos de baja rigidez, proporcionar  $R_g$  más allá de 5 también brinda una mejora significativa. De manera similar, hay una mejora convincente después de  $R_g$  5 para la capa de Geoceldas de alta rigidez, sin embargo, la mejora es insignificante para las capas de Geoceldas de baja rigidez ( $\alpha = 2$ , ver Ilustración 30). El factor de compactación,  $C$  que determina la tensión de confinamiento en las Geoceldas, se varió para propiedades suelo-Geoceldas constantes y asentamiento normalizado y hubo una clara tendencia de mejora con un aumento en la relación de ancho de la capa de Geoceldas incluso hasta 10.

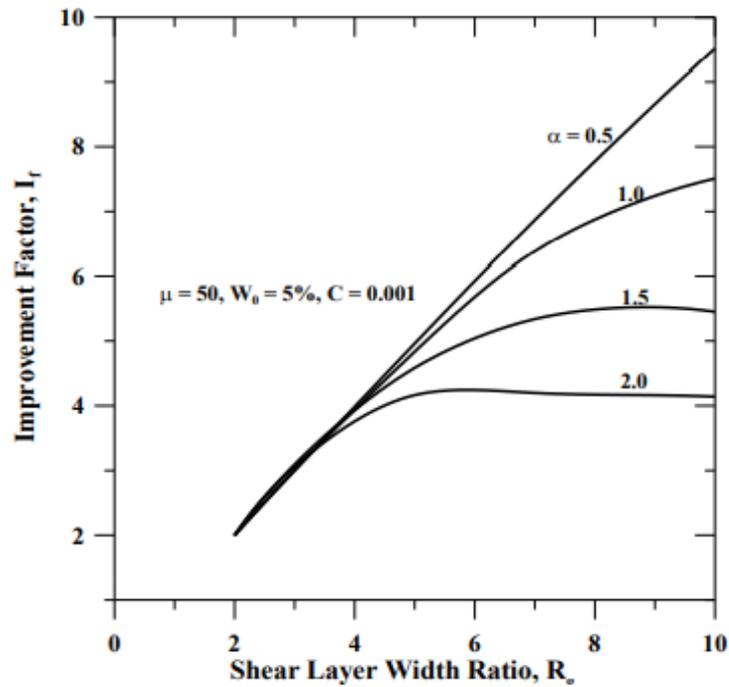
El factor de mejora que se informa es muy alto incorporando el impacto de las tensiones de confinamiento. La mejora del suelo aumenta a una tasa constante en asentamientos del orden del 15%, pero para asentamientos inferiores del orden del 5% no hay una mejora adicional para la relación de ancho de la capa de corte más allá de 5.

Ilustración 29. Variación de  $I_f$  con  $R_g$  (Variando  $\mu$ )



Fuente. (Mole, 2013).

Ilustración 30. Variación de  $I_f$  con  $R_g$  (Variando  $\alpha$ )



Fuente: (Mole, 2013).

Mole Faby (2013) menciona que ha hecho un esfuerzo para simular numéricamente el comportamiento elastoplástico de una zapata continua rígida sobre lechos reforzados con Geoceldas que incorporan la dependencia de la tensión de la capa de Geoceldas<sup>36</sup>. Las respuestas lineales y no lineales se estudiaron en asentamientos bajos y altos respectivamente. Con la ayuda de modelos de base a saber. Modelo Pasternak se obtuvieron numéricamente los perfiles de deflexión (esquema de diferencias finitas) y se calcularon las cargas. Algunas de las observaciones importantes que se extrajeron del estudio se enumeran a continuación:

- El modelo de respuesta lineal, que es el enfoque más simple, debe usarse para asentamientos bajos ( $W_0 \approx 1\%$ ) y la respuesta no lineal debe tenerse en cuenta para asentamientos más altos.
- El modelo independiente de tensión no lineal funciona bien para asentamientos más bajos, pero para asentamientos más altos se debe usar el modelo que incorpora la dependencia de la tensión.
- Los parámetros que se analizaron en el presente estudio son el inverso de la rigidez al corte normalizada ( $\alpha$ ), el inverso de la capacidad portante última normalizada ( $\mu$ ), el coeficiente de compactación (C) y el asentamiento normalizado ( $W_0$ ).
- Para verificar la consistencia y precisión del código, se validó comparando el modelo con el modelo independiente de tensión no lineal reduciéndolo a un modelo independiente de tensión. El modelo también se comparó con los resultados experimentales. También se comprobó numéricamente si converge a un valor constante en asentamientos más altos. Se encontró que el modelo actual funciona bien para los casos mencionados anteriormente.
- El modelo actual es una mejora del modelo independiente de tensión no lineal anterior, ya que incorpora el comportamiento real de la Geocelda que deriva su fuerza del efecto de confinamiento general. El modelo anterior predice la capacidad de carga del suelo reforzado con Geoceldas.
- Hay una clara tendencia de mejora con el aumento de la rigidez al corte del suelo reforzado con Geoceldas en asentamientos bajos y alta rigidez del subsuelo, mientras que no hay una mejora considerable en asentamientos más altos y baja rigidez del subsuelo.

---

<sup>36</sup> MOLE, Faby, 2013

- También se informó que hay un aumento en la capacidad de carga con valores más altos del ancho de la capa de Geoceldas, pero para estar en el lado económico, siempre es bueno restringir el ancho de la capa de Geoceldas a 5.
- Los diagramas de diseño que se proponen podrían usarse para diseñar cimientos reforzados con Geoceldas de zapatas continuas.
- Un valor más bajo de  $C$  induce el efecto de confinamiento o el comportamiento dependiente del estrés  $y$ , a medida que aumenta o tiende al infinito, se comporta de manera similar al modelo no lineal independiente del estrés. El valor apropiado de  $C$  debe elegirse en función de las tensiones iniciales.
- La mejora que se trae al subsuelo blando es significativa con la introducción del refuerzo de Geoceldas y el suelo blando es capaz de soportar cargas más altas.

En resumen, el enfoque actual de calcular los factores de mejora o las cargas es un mejor enfoque, ya que tiene en cuenta las tensiones de confinamiento en la Geocelda de la que deriva su resistencia el subsuelo reforzado con Geocelda. Para comprobar la precisión y consistencia de los resultados, el modelo actual ha sido validado de varias formas. El modelo no lineal se comparó inicialmente con la solución lineal, se aplicó el teorema del límite para verificar la solución en asentamientos muy altos y el presente modelo también se comparó con datos experimentales.

La solución completa de la ecuación dependiente de la tensión no lineal se reduce a la ecuación no lineal cuando  $n = 0$ , que representa el perfil de deflexión para la independencia de la tensión y explica la relación tensión-deformación no lineal según Kondner (1963)<sup>37</sup>. Se realizó un análisis para la misma relación de ancho de capa de Geoceldas,  $R_g$  y se encontró que los resultados se superponen para varios valores de  $\alpha$  ya que se empleó el método de diferencias finitas para obtener la solución en ambos casos.

Se intentó mejorar el modelo de Pasternak incorporando el comportamiento dependiente de la tensión del suelo reforzado con Geoceldas. Se realizó un estudio paramétrico para varios parámetros, a saber. coeficiente de compactación, y parámetro de Janbu,  $n$ , que juegan un papel fundamental en la predicción del comportamiento dependiente del estrés. Se realizó un análisis lineal y no lineal para obtener las curvas de asentamiento de carga y los factores de mejora correspondientes para asentamientos altos y bajos, respectivamente. Las siguientes conclusiones principales extraídas del estudio se señalan a continuación:

---

<sup>37</sup> KONDNER, 1963

- Se empleó el método de diferencias finitas para obtener la solución numérica de las ecuaciones diferenciales lineales y no lineales y el análisis actual involucró la incorporación de parámetros adicionales, coeficiente de compactación, y parámetro de Janbu, además de los parámetros del modelo  $\alpha$  y  $\mu$  que indican el inverso del normalizado. rigidez al corte del suelo reforzado con Geoceldas e inversa de la capacidad portante última normalizada, respectivamente.
- El modelo actual se validó de varias maneras para comprobar la precisión de las predicciones. Inicialmente, los datos no lineales se compararon con datos de análisis lineal; el modelo dependiente del estrés se comparó con el modelo independiente del estrés (reduciendo el modelo a un modelo independiente del estrés); se obtiene el valor límite de  $Q^*$  en asentamientos altos y se compara el resultado con los datos del análisis numérico (MATLAB) que muestra buena concordancia.
- El modelo también se verificó con resultados experimentales para comprender la aplicabilidad del modelo actual en aplicaciones prácticas. A partir de la comparación, quedó muy claro que se encontró que el modelo dependiente del estrés funciona mejor que el modelo independiente del estrés, lo que indica que el modelo dependiente del estrés predice el comportamiento del sistema reforzado con Geoceldas cerca del comportamiento exacto.
- Se observó a partir del estudio que los parámetros del modelo son inversos a la rigidez de corte normalizada,  $\alpha$ ; inversa de la capacidad portante última normalizada,  $\mu$ ; coeficiente de compactación; La relación de ancho de la capa de corte,  $R_g$  juega un papel importante en la predicción de la mejora provocada por el suelo reforzado con Geoceldas.
- El modelo independiente de tensión subestima las predicciones reales y la incorporación de la dependencia de la tensión ayuda a comprender el comportamiento real del sistema reforzado con Geoceldas, ya que tiene en cuenta las tensiones de confinamiento que actúan sobre el sistema.
- Los perfiles de deflexión y los patrones de deflexión de carga obtenidos para valores variables de la inversa de la rigidez de corte normalizada del suelo reforzado con Geoceldas ( $\alpha$ ) muestran una distribución uniforme de cargas para Geoceldas de alta rigidez ( $\alpha = 0.5$ ) y cargas más altas soportadas por el sistema reforzado con Geoceldas y viceversa ocurre para Geoceldas de baja rigidez ( $\alpha = 2.0$ ).
- De manera similar, también se trazaron el perfil de asentamiento y la curva de asentamiento de carga para condiciones variables del subsuelo. Se infirió del estudio que se observó una deflexión uniforme de la capa de Geoceldas

cuando el subsuelo es de baja rigidez ya que un subsuelo de alta rigidez resistiría el libre movimiento de la capa de Geoceldas. Pero las cargas que puede soportar el sistema con fuertes condiciones de subsuelo son muy altas ( $\mu = 0$ , lo que indica una rigidez infinitamente alta para el subsuelo).

- Para cuantificar el rendimiento del sistema reforzado con Geoceldas, se utilizaron factores de mejora. La variación de los factores de mejora ( $I_f$ ) con la variación de la inversa de la rigidez al corte normalizada ( $\alpha$ ) y la relación de ancho de la capa de corte/Geocelda ( $R_g$ ) se analizó mediante la variación de los parámetros del modelo,  $\mu$ ,  $W_0$ ,  $C$ .
- Los factores de mejora que se informaron con la incorporación del comportamiento dependiente del estrés son muy altos. Como era de esperar, se encontró que  $I_f$  disminuía con el aumento en el valor de  $\alpha$ , lo que indica una mayor mejora para el refuerzo de Geoceldas con alta rigidez. Se estudió la influencia de los parámetros del modelo  $\mu$ ,  $C$  y  $W_0$ . El subsuelo con alta rigidez reportó factores de mejora menores, lo que indica que la mejora adicional del sistema con la inclusión de Geoceldas es insignificante y no es una opción económica.
- Como era de esperar, con el aumento en el asentamiento ( $W_0$ ), el  $I_f$  informado también es alto. Se demostró que el factor principal que gobierna el comportamiento dependiente de la tensión, el coeficiente de compactación,  $C$  tiene un claro aumento en la mejora con valores más bajos de  $C$ . Para valores más bajos de  $C$ , incluso el sistema con baja rigidez de Geocelda muestra una mayor mejora del sistema reforzado con Geocelda.

## 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Según lo mencionado por Mole Faby (2013), se analiza una mejora del modelo anterior que explica las propiedades materiales del sistema de suelo reforzado con Geoceldas. Se ha hecho un intento de simular numéricamente el comportamiento elastoplástico de una zapata continua rígida sobre lechos de arena reforzados con Geoceldas sobre lechos de arcilla blanda. Se analizó el perfil de deflexión de la capa de cortante de Pasternak para obtener los perfiles de carga-asentamiento. De este estudio se extraen las siguientes hipótesis importantes<sup>38</sup>:

- Se obtiene una relación no lineal entre la carga normalizada ( $Q^*$ ) y el asentamiento normalizado ( $W_0$ ) en términos de los parámetros del modelo adimensional con base en el perfil de deflexión de la capa de corte de Pasternak. Las ecuaciones diferenciales no lineales de segundo orden se resolvieron utilizando un esquema de diferencias finitas. Se observó una buena concordancia entre los resultados numéricos y los datos experimentales independientes.
- Se observó que los perfiles de deflexión de carga normalizados tienen una influencia significativa en los parámetros del modelo, a saber. la relación de ancho de la capa de corte,  $R_g$ ; inversa de la rigidez normalizada al corte de la capa granular reforzada, inversa de la capacidad portante última normalizada del lecho de arcilla blanda.
- Se ve que una capa de Geocelda granular más rígida ( $\alpha = 0.5$ ) soporta una carga más alta para  $W_0$  de 5% y distribuye la carga uniformemente sobre el suelo de cimentación blanda. Mayor aumento en el valor de  $\alpha$ , la carga soportada por la capa granular de Geocelda disminuye debido a su menor rigidez a la flexión.
- Para un valor dado de la inversa de la rigidez a la corte normalizada de la capa granular reforzada ( $\alpha = 1.0$ ), el perfil de asentamiento es uniforme para la capa de corte más corta ( $R_g = 5$ ) que para la capa de corte más ancha ( $R_g = 10$ ). Esta observación concuerda con el hecho de que las cimentaciones muy rígidas sufren asentamientos uniformes. Además, hay una reducción en el asentamiento con el aumento del ancho de la capa de corte,  $R_g$  para un valor dado de  $\alpha$ , incluso para condiciones de subsuelo más débiles (es decir, con aumento en  $\mu$ ).
- Con la disminución del valor de la inversa de la rigidez de corte normalizada ( $\alpha$ ), aumenta la capacidad de carga del suelo compuesto. Sin embargo, la

---

<sup>38</sup> MOLE Faby, 2013

influencia de  $\alpha$  por encima de 1,0 parece insignificante en la respuesta carga-asentamiento, aunque hay un aumento en la relación de ancho de la capa de corte.

- La capacidad de carga del suelo compuesto disminuye con el aumento del valor de  $\mu$ . Se encuentra que esta influencia de  $\mu \leq 10$  es insignificante en la respuesta de carga-asentamiento ya que se espera que los suelos de cimentación sean muy rígidos en estos valores.
- Se presentan gráficos de diseño en términos de factores de mejora con respecto a varios parámetros del modelo. Para valores más bajos de  $\mu$  (0-25), se observa que no hay mejora después de aumentar la relación de ancho de la capa de corte ( $R_g$ ) más allá de 5. Pero los suelos con baja capacidad de carga última aportan una mejora significativa ( $\mu= 25$ ).
- La inclusión de Geoceldas con mayor rigidez al corte ( $\alpha=0.5$ ) genera un aumento de 8 veces en la mejora del suelo.

Los factores de mejora con diferentes parámetros del modelo muestran una clara tendencia de mejora en la capacidad portante del suelo reforzado. Se ha analizado el comportamiento elastoplástico de zapatas circulares rígidas sobre lechos de arena reforzados con Geoceldas sobre suelos blandos. Se utilizó el modelo elástico de Pasternak para idealizar la zapata circular que descansa sobre suelos blandos reforzados con Geoceldas<sup>39</sup>. La siguiente información importante se extrae del estudio.

- El análisis lineal para obtener el patrón de asentamiento de la carga se usa cuando la zapata sufre asentamientos muy bajos del orden del 1% donde el patrón de asentamiento de la carga real es lineal.
- Para asentamientos más altos, se utilizó en el análisis la respuesta no lineal.
- Para comprobar la validez de los resultados, se validó el modelo no lineal tanto numérica como teóricamente.
- Los parámetros del modelo adimensional,  $\alpha$  (inversa de la rigidez de corte normalizada del suelo reforzado con Geoceldas) y  $\mu$  (inversa de la capacidad de carga última normalizada) desempeñaron un papel fundamental en el modelado del comportamiento circular que descansa sobre suelos reforzados con Geoceldas.

---

<sup>39</sup> MOLE, 2013

- Hay una mejora significativa en el suelo con la introducción del refuerzo de Geoceldas.
- El refuerzo de Geoceldas de alta rigidez (baja  $\alpha$ ) es capaz de soportar cargas muy elevadas con una distribución uniforme de las mismas lo que permite una meritoria mejora de suelos muy blandos.
- Un valor bajo de  $\mu$  ( $\mu = 0$ ) representa suelos de rigidez infinita que no requieren mayor refuerzo y se refleja en los factores de mejora que se reportaron.
- Siempre es económico limitar la relación de ancho de la capa de corte (ancho de la capa de Geocelda) a 5, más allá de lo cual proporciona una mejora insignificante.

En resumen, el modelo propuesto ayudó a comprender el comportamiento de las zapatas circulares rígidas que descansan sobre suelos reforzados con Geoceldas. El refuerzo con Geoceldas de suelos blandos muestra una clara tendencia de mejora.

El modelo anterior de Pasternak no tiene en cuenta las tensiones de confinamiento que actúan sobre el sistema reforzado con Geoceldas del que obtiene su máxima resistencia. Se ha hecho un intento de simular numéricamente el comportamiento elastoplástico de una zapata continua rígida sobre lechos reforzados con Geoceldas que incorporan la dependencia de la tensión de la capa de Geoceldas. Con la ayuda de modelos de base a saber. Modelo Pasternak se obtuvieron numéricamente los perfiles de deflexión (esquema de diferencias finitas) y se calcularon las cargas. Algunas de las observaciones importantes que se extrajeron del estudio se enumeran a continuación:

- El modelo independiente de tensión no lineal funciona bien para asentamientos más bajos, pero para asentamientos más altos se debe usar el modelo que incorpora la dependencia de la tensión.
- Los parámetros que se analizaron en el presente estudio son el inverso de la rigidez al corte normalizada ( $\alpha$ ), el inverso de la capacidad portante última normalizada ( $\mu$ ), el coeficiente de compactación (C) y el asentamiento normalizado ( $W_0$ ).
- Para verificar la consistencia y precisión del código, se validó comparando el modelo con el modelo independiente de tensión no lineal reduciéndolo a un modelo independiente de tensión. El modelo también se comparó con resultados experimentales independientes. En todos los casos, los resultados del nuevo modelo fueron buenos en comparación con los otros modelos.

- Hay una clara tendencia de mejora con el aumento de la rigidez al corte del suelo reforzado con Geoceldas en asentamientos bajos y alta rigidez del subsuelo, mientras que no hay una mejora considerable en asentamientos más altos y baja rigidez del subsuelo.
- También se informó que hay un aumento en la capacidad de carga con valores más altos del ancho de la capa de Geoceldas, pero para estar en el lado económico, siempre es bueno restringir el ancho de la capa de Geoceldas a 5.
- Los diagramas de diseño que se proponen podrían usarse para diseñar cimientos reforzados con Geoceldas de zapatas continuas.
- Un valor más bajo de C induce el efecto de confinamiento o el comportamiento dependiente del estrés y, a medida que aumenta o tiende al infinito, se comporta de manera similar al modelo no lineal independiente del estrés. El valor apropiado de C debe elegirse en función de las tensiones iniciales.
- La mejora que se aporta al subsuelo blando es significativa (alrededor de 20 pliegues) con la introducción del refuerzo de Geoceldas y el suelo blando es capaz de soportar cargas más altas.

El enfoque actual de calcular los factores de mejora o las cargas es un mejor enfoque, ya que tiene en cuenta las tensiones de confinamiento en la Geocelda de la que deriva su resistencia el subsuelo reforzado con Geocelda. El modelo dependiente de la tensión anterior se ha ampliado para comprender el comportamiento circular. La siguiente información como principales, son extraídas del estudio que se señalan a continuación:

- La validación del modelo actual se ha realizado con resultados experimentales para comprender la aplicabilidad del modelo actual en aplicaciones prácticas. Quedó muy claro a partir de la comparación que se encontró que el modelo dependiente del estrés funciona mejor que el modelo independiente del estrés.
- Se observó a partir del estudio que los parámetros del modelo, incluido el inverso de la rigidez de corte normalizada,  $\alpha$ ; inversa de la capacidad portante última normalizada,  $\mu$ ; coeficiente de compactación, C; La relación de ancho de la capa de corte,  $R_g$  tiene un papel importante en la predicción de la mejora provocada por el suelo reforzado con Geoceldas.
- Un valor más bajo del coeficiente de compactación, C (un valor bajo de C indica esfuerzos iniciales bajos y un valor más alto de esfuerzos que puede soportar el sistema reforzado con Geoceldas) muestra una distribución uniforme de las cargas en el patrón de asentamiento ( $C = .0001$ ) y cargas altas que puede perforar el sistema reforzado.

- El modelo independiente de tensión subestima las predicciones reales y la incorporación de la dependencia de la tensión ayuda a comprender el comportamiento real del sistema reforzado con Geoceldas, ya que tiene en cuenta las tensiones de confinamiento que actúan sobre el sistema.
- Los perfiles de deflexión y los patrones de deflexión de carga obtenidos para valores variables de la inversa de la rigidez de corte normalizada del suelo reforzado con Geoceldas ( $\alpha$ ) muestran una distribución uniforme de cargas para Geoceldas de alta rigidez ( $\alpha = 0.5$ ) y cargas más altas soportadas por el sistema reforzado con Geoceldas y viceversa ocurre para Geoceldas de baja rigidez ( $\alpha = 2.0$ ).
- De manera similar, también se trazaron el perfil de asentamiento y la curva de asentamiento de carga para condiciones variables del subsuelo. Se infirió del estudio que se observó una deflexión uniforme de la capa de Geoceldas cuando el subsuelo es de baja rigidez ya que un subsuelo de alta rigidez resistiría el libre movimiento de la capa de Geoceldas. Pero las cargas que puede perforarse y el sistema con condiciones de subsuelo fuertes son muy altas ( $\mu = 0$ , lo que indica una rigidez infinitamente alta para el subsuelo).
- Para cuantificar el rendimiento del sistema reforzado con Geoceldas, se utilizaron factores de mejora. La variación de los factores de mejora ( $I_f$ ) con la variación de la inversa de la rigidez al corte normalizada ( $\alpha$ ) y la relación de ancho de la capa de corte/Geocelda ( $R_g$ ) se analizó mediante la variación de los parámetros del modelo,  $\mu$ ,  $W_0$ ,  $C$ .
- Los factores de mejora que se informaron con la incorporación del comportamiento dependiente del estrés son muy altos. Como era de esperar, se encontró que  $I_f$  disminuía con el aumento en el valor de  $\alpha$ , lo que indica una mayor mejora para el refuerzo de Geoceldas con alta rigidez. Se estudió la influencia de los parámetros del modelo  $\mu$ ,  $C$  y  $W_0$ . El subsuelo con alta rigidez reportó factores de mejora menores, lo que indica que la mejora adicional del sistema con la inclusión de Geoceldas es insignificante y no es una opción económica.

Se demostró que el factor principal que rige el comportamiento dependiente de la tensión, el coeficiente de compactación,  $C$  tiene un claro aumento en la mejora del rendimiento con valores más bajos de  $C$ . Para valores más bajos de  $C$ , incluso el sistema con baja rigidez de Geocelda muestra una mayor mejora de la Geocelda reforzada<sup>40</sup>.

---

<sup>40</sup> MOLE, 2013

- La variación del factor de mejora,  $I_f$  con el ancho de la capa de Geoceldas,  $R_g$ . Se variaron varios parámetros  $C$ ,  $\mu$ ,  $\alpha$  para estudiar la influencia de los mismos en la mejora. En la mayoría de los casos, se encontró que la mejora era constante más allá de  $R_g = 5$ , pero en casos extremos donde la Geocelda y la rigidez del subsuelo son muy débiles y las tensiones iniciales son muy bajas, se encontró que la mejora es apreciable.

Seguidamente, el modelo que incorpora el comportamiento dependiente del estrés del sistema reforzado con Geoceldas ayuda a predecir el comportamiento del sistema reforzado con Geoceldas cerca del comportamiento real. Los factores de mejora informados en el estudio podrían usarse para el diseño del sistema reforzado con Geoceldas, ya que se acercan al comportamiento real.

## 7. CONCLUSIONES

En el presente estudio se presentaron varios modelos para comprobar su aplicabilidad apoyadas sobre suelos reforzados con Geoceldas, de acuerdo a los diferentes estudios por investigadores. Las respuestas lineales y no lineales se estudiaron en asentamientos bajos y altos respectivamente. Se consideró la variación de la presión de contacto en función del ancho de la Geocelda para obtener la mejora aproximada de la capacidad portante. Se utilizó Pasternak y se reportaron factores de mejora basados en perfiles de deflexión y curvas de asentamiento de carga. Para comprender el comportamiento exacto de la Geocelda, se deben tener en cuenta las tensiones de confinamiento que actúan sobre el sistema de Geocelda. Se mejoró el modelo de Pasternak considerando el efecto de los esfuerzos de confinamiento y se reportaron los factores de mejora que se aproximan al valor exacto.

Los métodos discutidos han demostrado ser exitosos al indicar la mejora potencial en la capacidad de carga que la capa de arena reforzada con Geoceldas aporta a las zapatas circulares y corridas. Se informó la capacidad portante límite de las zapatas (circulares y corridas) sobre lechos reforzados con Geoceldas. Este análisis da una idea de los valores límite superior e inferior de las capacidades de carga del sistema reforzado con Geoceldas. Este modelo no tiene en cuenta las propiedades de las Geoceldas ni las condiciones del subsuelo y, por lo tanto, da una idea aproximada del orden de mejora. El modelo de Pasternak se utilizó más en el estudio, ya que es una mejora del modelo analítico basado en la variación de la presión de contacto, ya que considera las propiedades del sistema Geocelda-subsuelo. El principal inconveniente de evaluar el comportamiento del sistema reforzado con Geoceldas con la ayuda del modelo de Pasternak es que no considera el efecto del confinamiento general, que es un factor importante que contribuye a la solidez del sistema reforzado con Geoceldas. Las principales conclusiones que se obtuvieron de varios estudios se discuten a continuación:

- El modelo de respuesta lineal, que es el enfoque más simple, debe usarse para asentamientos bajos ( $W_0 \approx 1\%$ ) y la respuesta no lineal debe tenerse en cuenta para asentamientos más altos.
- El modelo independiente de tensión no lineal funciona bien para asentamientos más bajos, pero para asentamientos más altos se debe usar el modelo que incorpora la dependencia de la tensión.
- Los parámetros que se analizaron en el presente estudio son los inversos de la rigidez a cortante normalizada ( $\alpha$ ), los inversos de la capacidad portante última normalizada ( $\mu$ ), el coeficiente de compactación ( $C$ ) y el asentamiento normalizado ( $W_0$ ).

- Hay una clara tendencia de mejora con el aumento de la rigidez al corte del suelo reforzado con Geoceldas en asentamientos bajos y alta rigidez del subsuelo, mientras que no hay una mejora considerable en asentamientos más altos y baja rigidez del subsuelo.
- También se informó que hay un aumento en la capacidad de carga con valores más altos del ancho de la capa de Geoceldas, pero para estar en el lado económico, siempre es bueno restringir el ancho de la capa de Geoceldas a 5.
- La mejora que se trae al subsuelo blando es significativa con la introducción del refuerzo de Geoceldas y el suelo blando es capaz de soportar cargas más altas.
- Los diagramas de diseño que se proponen podrían usarse para diseñar cimientos reforzados con Geoceldas de zapatas continuas.

Cabe resaltar que, las Geoceldas HDPE ya no son un material recomendado por bajo comportamiento a lo largo del tiempo como se ha demostrado anteriormente y mencionado por Moghaddas<sup>41</sup>; Lo que se recomienda son las nuevas Geoceldas Neoloy y las de Bambú, ya que, demuestran una gran capacidad de soportar gigantescas cargas en cualquier aplicación de la ingeniería, su uso y amigable con el medio ambiente, las vuelve un material apto y económicamente viable para cualquier tipo de proyecto, en especial, para el reforzamiento de cimientos y demás obras<sup>42</sup>.

---

<sup>41</sup> TAFRESHI & DAWSON, 2010

<sup>42</sup> HEDGE & SHITARAM, 2015

## BIBLIOGRAFIA

AN EXPERIMENTAL STUDY ON SUBBASE COURSE REINFORCEMENT USING GEOTEXTILE GRID CELLS ORIENTED VERTICALLY. Hiroshi, Yoshida y Hiroharu, Saji. 1995. Japón: Doboku Gakkai Ronbunshu - Japan Society of Civil Engineers, 1995.

ASTM. 2016. Standard Test Method for Accelerated Tensile Creep and Creep-Rupture of Geosynthetic Materials Based on Time-Temperature Superposition Using the Stepped Isothermal Method. EE UU: American Society for Testing and Materials, 2016.

AXIATECH. 2022. PRS Neoloy. [En línea] 2022. [Citado el: 1 de Noviembre de 2022.] <https://axiatech.com.co/prs-neoloy/>.

Bases de cimentación reforzadas con geoceldas. Amarnath, Hedge. 2017. India : Construction and Building Materials - Department of Civil and Environmental Engineering, Noviembre de 2017, Vol. 1. ISBN.

Behaviour of footings on reinforced sand subjected to repeated loading - Comparing use of 3D and planar geotextile. Moghaddas, Tafreshi y Dawson, AR. 2010. Reino Unido : Geotextiles and Geomembranes - Department of Civil Engineering, 2010. ISSN.

Behaviour of sand confined with single and multiple geocells. Karpurapu, Rajagopal, N., Krishnaswamy y Madhavi, Latha. 1999. Chennai, India : Geotextiles and Geomembranes, 1999, Vol. 17.

CAÑÓN, Sandra. 2018. BENEFICIOS TÉCNICOS Y ECONÓMICOS EN EL USO DE GEOCELAS EN ESTRUCTURA DE PAVIMENTOS FRENTE A LOS SISTEMAS TRADICIONALES. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2018.

Effect of infill materials on the performance of geocell reinforced soft clay beds. Amarnath, Hedge y Sitharam, T. 2014. 3, Bangalore, India : Geomechanics and Geoengineering, 2014, Vol. 10. ISSN.

Geopolímeros. 2018. Catálogo Geoceldas - Sistema de Confinamiento Celular. Cota, Cundinamarca : Geopolímeros, 2018.

GÓMEZ G., Julián G. 2017. Análisis del creep y su afectación al factor de mejoramiento de módulos en Geoceldas poliolefinas utilizando el ensayo SIM - Norma ASTM D6992. Bogotá : Universidad Católica de Colombia, 2017.

GÓMEZ. G, Julián. 2017. Análisis del creep y su afectación al factor de mejoramiento de módulos en Geoceldas poliolefinas utilizando el método isotérmico escalonado, norma ASTM D6992. s.l.: Universidad Católica de Colombia, 2017.

GREENFIX. 2018. The History of Geocells. USA : Greenfix - Soil Stabilisation and Erosion Control Specialists, 2018.

KOERNER, Robert. 2012. Designing with Geosynthetics. United States of America : Drexler University, 2012.

Laboratory model tests for a strip footing supported on geocell reinforced sand bed. Moghaddas, Tafreshi y Dawson, A. 2010. Shanghai : Geotechnical Special Publication, 2010. ISSN.

Large-Scale Triaxial Compression Testing of Geocell-Reinforced Granular Soils. Bathurst, Richard y Karpurapu, Rajagopal. 1993. 3, Canadá : Geotechnical Testing Journal, 1993, Vol. 16.

ML. 2016. ML Ingeniería. Procedimiento de Instalación Geoceldas. [En línea] Abril de 2016. [Citado el: 10 de Noviembre de 2022.] <https://mlingenieria.com/wp-content/uploads/2016/04/PROCEDIMIENTO-DE-INSTALACION%CC%81N-GEOCELDAS.pdf>.

Mole, Faby. 2013. Modelling and Analysis of Geocell Reinforced Foundations. India: Indian Institute of Technology Hyderabad, 2013.

Performance of Geocell-Reinforced RAP Bases over Weak Subgrade under Full-Scale Moving Wheel Loads. Han, Jie, y otros. 2011. United States: JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING, 2011, Vol. 23. ISSN.

PRESTO. 1990. Geocells: The early days with the Army Corps. EE UU: s.n., 1990.

PRS. 2008. PRS Geo-Technologies. Evolución de las Geoceldas. [En línea] 2008. [Citado el: 3 de Noviembre de 2022.] <https://www.prs-med.com/co/quienes-somos/evolucion-de-las-geoceldas/>.

—. 2015. PRS Geo-Technologies. Quiénes Somos. [En línea] 2015. [Citado el: 10 de Noviembre de 2022.] <https://www.prs-med.com/co/quienes-somos/>.

SYNTEX. 2022. Syntex Geosynthetics. Geoceldas. [En línea] 2022. [Citado el: 15 de Mayo de 2022.] <https://syntex.com.co/productos/geocelda/>.

TEXDELTA. 2022. TexDelta. Control de Erosión. [En línea] 2022. [Citado el: 17 de Septiembre de 2022.] <https://texdelta.com/control-de-erosion/>.

TORRES. P, Miguel Á. 2021. Evaluación Experimental del Efecto de Disipación de Esfuerzos producidos por Geoceldas sobre Suelos Blandos. Bogotá : Universidad Nacional de Colombia, 2021.

Triaxial tests of sand reinforced with 3D inclusions. MX, Zhang, AA, Javadi y X., Min. 2006. Shanghai : Geotextiles and Geomembranes, 2006.

Use of Bamboo in Soft-Ground Engineering and Its Performance Comparison with Geosynthetics: Experimental Studies. Sitharam, T. y Hedge, Amarnath. 2015. Bangalore, India: Journal of Materials in Civil Engineering, 2015. ISSN.

SEPULVEDA, Viana A. M. 2018. EVALUACIÓN DEL USO DE GEOCELDAS SOBRE SUELOS ARCILLOSOS MEDIANTE MODELACIÓN EN CENTRÍFUGA GEOTÉCNICA. Bogotá : Universidad de los Andes, 2018.

WAVIN, PAVCO y Marín, Ana María. 2011. Soluciones para la Infraestructura Vial NEOWEB. s.l.: Mexichem PAVCO, 2011