

UTILIZACIÓN DE GEOCELDAS DE ALTO DESEMPEÑO EN ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES. ESTADO DEL ARTE PARA LA XXXIXº REUNION DEL ASFALTO – ENCUENTRO BINACIONAL

Schvartzer Fabián¹, Santiago Da Ponte²

¹ Proyectos y Estudios Especiales S.A, Buenos Aires, Argentina, fabians@peesa.com.ar

² Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, santiagodaponte@gmail.com

Resumen

Desde hace ya tiempo se han desarrollado diferentes tecnologías que permiten reforzar las características de los materiales que se utilizan tanto en las diferentes capas de un paquete estructural como en la subrasante. Entre las más difundidas se encuentran los Geotextiles, las Geogrillas y las Geoceldas, siendo estas últimas las que presentan un mayor impacto técnico. Las Geoceldas es un sistema mecánico de refuerzo y estabilización tridimensional de suelos que permiten optimizar los diseños de estructuras de pavimentos flexibles potenciando el uso de materiales locales y menores espesores. El uso de Geoceldas de Alto desempeño permiten i) una mejor distribución de los esfuerzos generados por las capas de tránsito, ii) desarrollar un soporte más rígido para las capas superiores, iii) mantener las características de cada capa a lo largo de la vida útil de pavimento. iv) el reforzamiento de la subrasante y su circulación en forma inmediata de altas cargas sobre todo en terrenos con suelos de muy bajo valor soporte. Este trabajo realizará un análisis del estado del arte de este tipo de tecnología ya sea en el ámbito del diseño estructural, de la implementación en diferentes obras de la región desde el punto de vista técnico, económico, de su performance en el tiempo y en los estándares de mantenimiento.

Palabras Clave: Pavimentos, Geoceldas, Refuerzo de base, mejoramiento de subrasante, carreteras sustentables, carreteras no pavimentadas.

1 Introducción

Con el incremento de la intensidad de las cargas que se producen en pavimentos a medida que las operaciones aumentan, los pavimentos flexibles tienen que presentarse estables sin sufrir excesivas deformaciones bajo cargas, y además de satisfacer un criterio tolerable en términos de fatiga por repetición de las mismas. Por otra parte, muchas veces nos encontramos con suelos problemáticos que requieren estabilización, y como sabemos, tanto la estabilización física, como química o bien físico química, requieren no solo de logística, sino que demandan considerables costos y están condicionadas por la disponibilidad de tiempo. Por otra

parte, hoy en día es un desafío administrar los recursos tanto financieros como naturales para tanto la construcción o la rehabilitación de carreteras. Una solución sustentable para superar estas adversidades es desarrollar una técnica de estabilización innovadora que sea un refuerzo alternativo adecuado y que mejore la resistencia estructural, reduzca costos totales, minimice el mantenimiento y permita usar materiales locales o reciclados.

Los pavimentos pueden cumplir los requerimientos mencionados previamente, de manera sustentable y con una durabilidad asegurada con el correcto uso de Geoceldas de altas prestaciones y aún ofrecer una solución que no solo disminuya el requerimiento de logística, si no de costos totales de obra.

La tecnología de Geoceldas es un sistema de confinamiento celular tridimensional, de material polimérico en cintas que se unen de manera tal, que desplegada in situ, forma un “colchón” que tiene un patrón similar al de un panal de abeja, como se muestra en la Figura 1. En los huecos que se generan entre las cintas se deposita material granular que luego es compactado para lograr la mejora de propiedades de dicho relleno. Dependiendo del tipo de aplicación, éstas se pueden rellenar con varios tipos de material como granulares, arena, tierra, material reciclado etc. En cuanto a este relleno, las exigencias para su efectividad, es que su tamaño máximo sea menor a 33% de la altura de la Geocelda.



Figura 1. Geoceldas desplegadas

El uso de esta tecnología data de los primeros años de la década de 1970, momento en el que el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos desarrolló en conjunto con una conocida empresa fabricante de plásticos, esta idea de proveer confinamiento lateral a arena pobremente graduada con el fin de incrementar la capacidad portante a caminos tácticos, y así transitar vehículos de elevados pesos sobre las costas, con la ventaja de no depender de las condiciones climáticas. Esta se utilizó bajo el nombre comercial de SandGrid.

En principio, las geoceldas estaban hechas de materiales tales como papel, cartón, aluminio y PEAD (polietileno de alta densidad), que rápidamente se volvió la más utilizada. En la actualidad, la Geoceldas hechas de NPA (Novel Polymeric Alloy) son el último descubrimiento en la industria, y serán el objetivo de análisis de este ensayo bajo el nombre de Geoceldas de Altas Prestaciones o Desempeño.

2 Funcionamiento de las geoceldas

El mecanismo clave de una Geocelda, se basa en el confinamiento tanto lateral como vertical del suelo contenido entre sus bandas. Este confinamiento proveerá de mayor trabazón y fricción entre las partículas contenidas, que luego de ser compactadas verán ampliamente disminuidas las probabilidades de reacomodarse bajo cargas.

En la siguiente Figura 2, podemos analizar el derrotero de una carga que es aplicada ortogonalmente al plano en el que se ubican las geoceldas. Bajo la carga vertical ocasionada por el paso de los vehículos y las cargas de las capas superiores, el suelo confinado dentro de la Geocelda intenta expandirse generando tensiones en todas las direcciones. Parte de esas tensiones serán radiales, y solicitarán a las paredes de las geoceldas a tracción y corte mediante un efecto "aro". Las tracciones de "aro" y la presión pasiva del suelo en las celdas adyacentes generarán una contrapresión y así evitarán la deformación lateral del agregado mineral.



Figura 2. Derrotero de cargas en la geoceldas

El mecanismo clave de refuerzo de las geoceldas que incrementa la resistencia del pavimento, además de ser el confinamiento previamente nombrado, es el efecto viga y su distribución de tensiones en una superficie de mayor magnitud por descender con mayor ángulo [2]. El confinamiento lateral de las partículas bajo carga vertical retiene sus movimientos y su desgaste. La rigidez del relleno aumenta por la combinación del efecto aro proporcionado por cada celda y el aporte de las celdas vecinas, creando un efecto "colchón" [3]. La resistencia al corte, tracción y el módulo de las capas reforzadas con geoceldas aumenta [4]. Este mecanismo se ilustra en la Figura 3.

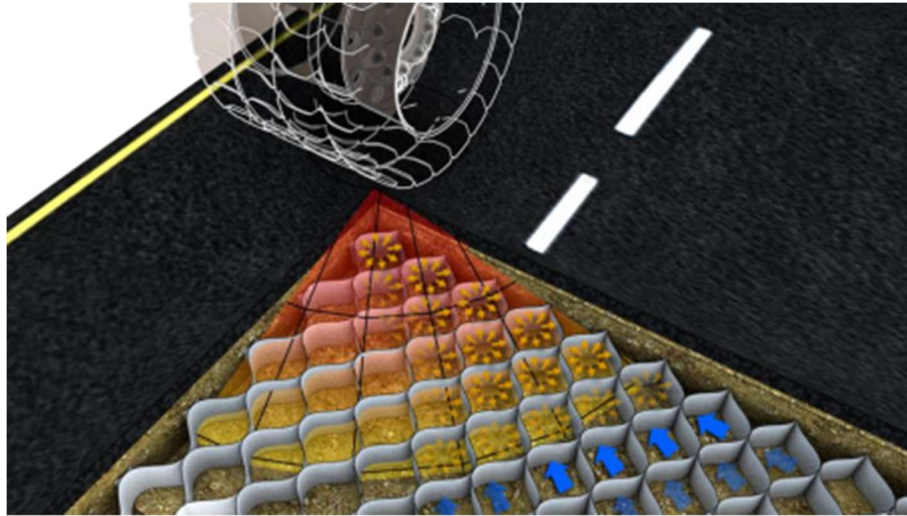


Figura 3. Distribución de tensiones bajo carga

2.1 Contribución en pavimentos

Las paredes de las Geoceldas de Altas Prestaciones poseen una alta rigidez a la tracción, y proveen gran rigidez la estructura de pavimentos, lo que reduce el asentamiento e incrementa la performance a largo plazo. El confinamiento 3D minimiza los cambios volumétricos del material de relleno. La contención lateral depende de la rigidez de las bandas y de la resistencia a la deformación a largo plazo. Limitar la deformación acumulada a largo plazo de las paredes de las celdas a un valor menor al 2% es crítico para mantener la integridad estructural, el confinamiento y la compactación asumidas a la hora del diseño de proyecto.

Mientras que las Geoceldas NPA incrementan el módulo del material de relleno por medio de la estabilización, la habilidad de usar suelo marginal o suelo de menores calidades granulares como relleno es un beneficio tanto económico como ambiental. Este material de relleno puede ser desde suelo pobremente graduado, asfalto reciclado, hormigón reciclado o bien los suelos utilizados generalmente para bases y subbases granulares.

2.2 Efecto viga

El colchón de geoceldas de NPA actúa como una viga semi rígida sobre suelo blando generando un “efecto viga” bajo carga. Esto es demostrado mediante mediciones de deformación en estudios experimentales [6,7]. Como la capa semirrígida de geoceldas es más rígida que el suelo que se encuentra por debajo, la superficie curva ejerce una reacción hacia arriba, por lo que se reduce la tensión en la subrasante como muestra la Figura 4. El efecto viga distribuye la carga efectivamente sobre un área mayor, reduciendo el impacto en profundidad y por consecuente, incrementado la capacidad portante y disminuyendo los asentamientos totales y diferenciales.

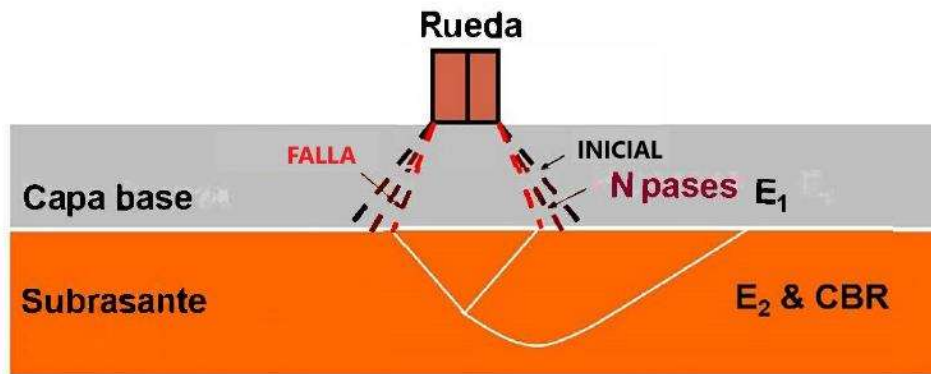


Figura 4. Distribución de tensiones (Fuente: Jie Han, University of Kansas, Development of Design Methods for Geocell-reinforce Bases, Presentation, 2010)

3 Propiedades claves de las geoceldas

Acorde a los nuevos desarrollos de los guías de diseño de las geoceldas [5], las propiedades clave para el refuerzo efectivo en pavimentos asfálticos son a) Resistencia y rigidez b) geometría y dimensiones. Estas propiedades definen la magnitud de la estabilización mecánica tridimensional en la vida útil de los proyectos.

4 Normativas

4.1 Normativa Holandesa para el uso de geosintéticos en pavimentos

Geosynthetics for Reinforcement of Unbound Base and Subbase Pavement Layers (Geokunststoffen als Funderingswapening in Ongebonden Funderingslagen) SBRCURnet (CROW), Netherlands [5], es una guía de aplicación recientemente publicada, es una guía de referencia para determinar el valor agregado de las geogrillas y geoceldas para el refuerzo de carreteras en construcción. El refuerzo se mide como un incremento del comportamiento estructural de las capas no ligadas base y subbase mientras que reduce el espesor del paquete estructural total y extiende la vida útil del mismo.

La normativa hace énfasis en los requerimientos de características de performance de las geoceldas para su uso como refuerzo de pavimentos asfálticos. “El grado de refuerzo o estabilización es determinado por el material del cual están hechas las geoceldas y su geometría. Las propiedades más importantes de los materiales son el módulo de elasticidad y la resistencia a la deformación permanente (Creep) empíricas. Las geoceldas también tienen que tener las correctas propiedades en todas las direcciones cuando se trata de rigidez dinámica, resistencia a la deformación plástica y resistencia a la tracción” – sección 2.2.4.

4.2 Normativas bajo desarrollo

ISO se encuentra autorizando una normativa de Diseño usando geosintéticos standard, con un capítulo dedicado a la estabilización para el uso y diseño de estabilización con geosintéticos (geogrillas y geoceldas) en estructuras de pavimentos [10]. La ASTM se the Standard Guide for Use of Geocells in Geotechnical and Road Projects (working draft status) [11]. Ambas guías citan la resistencia a la tracción, comportamiento elástico y resistencia al Creep como los parámetros clave para el uso de geoceldas como refuerzo estructural.

5 Evaluación de la performance de las geoceldas

Los parámetros clave para el uso de las geoceldas en pavimentos incluyen una alta resistencia a la tracción, un módulo de rigidez dinámica alto y durabilidad en la vida de diseño, además de las dimensiones y la geometría. Los polímeros, como el polietileno de alta densidad (PEAD) como el polipropileno (PP), tienden a perder el módulo de elasticidad en el tiempo, tanto bajo cargas estáticas como dinámicas, entrando en un período plástico. Una geocelda debe mantener una rigidez bajo cargas dinámicas sin deformación permanente significativa o pérdida de geometría, lo que puede resultar en pérdida del confinamiento comprometiendo lo asumido al momento del diseño, pudiendo causar la falla de la estructura. Por ello, una rigidez a la tracción (módulo) es importante tanto bajo cargas estáticas como dinámicas, y tanto a corto plazo como a largo plazo. Por estas razones, las normativas ISO y ASTM de diseño con geoceldas estipulan que las geoceldas deben resistir esfuerzos laterales a deformaciones menores al 2% para toda la vida útil de diseño.

5.1 Resistencia a la tracción y elasticidad a máxima carga

La resistencia a la tracción es la fuerza medida en KN/m que produce en los geosintéticos un cierto estiramiento que se mide de acuerdo con NEN – ISO 10319 [12]. La elasticidad a carga máxima es la distorsión del material bajo la carga de tracción máxima. Los detalles con respecto a la fuerza de tracción son particularmente útiles para la evaluación de la función de refuerzo en pavimentos.

La relación entre la fuerza aplicada y la deformación es llamada módulo (kN/m) en la tira. Cuanto más alto el módulo, mayor es la resistencia a las cargas por parte de la geocelda sin daños.

La guía de diseño holandesa cita como requerimiento para refuerzo de bases un módulo mínimo de 19 kN/m y para subbases lo determina en 16 kN/m.

La maquinaria del ensayo a tracción se utiliza para hacer dos tipos de ensayos: 1) Ensayo de resistencia a tracción en la banda de la Geocelda 2) Ensayo de resistencia a tracción sobre la costura entre bandas.

Para el ensayo a tracción sobre la banda, la muestra es colocada en la maquina universal mediante grapas como muestra la Figura 5, y se coloca un extensómetro para medir el cambio de longitud durante la prueba.

Para el ensayo a tracción sobre la costura de las geoceldas, la muestra es colocada en la maquina de tracción universal como muestra Figura 6, con la particularidad de que este método usa un dispositivo de dos rodillos y una muestra en forma de X enrollada alrededor de dichos rodillos, con el fin de simular lo ocurrido en campo.

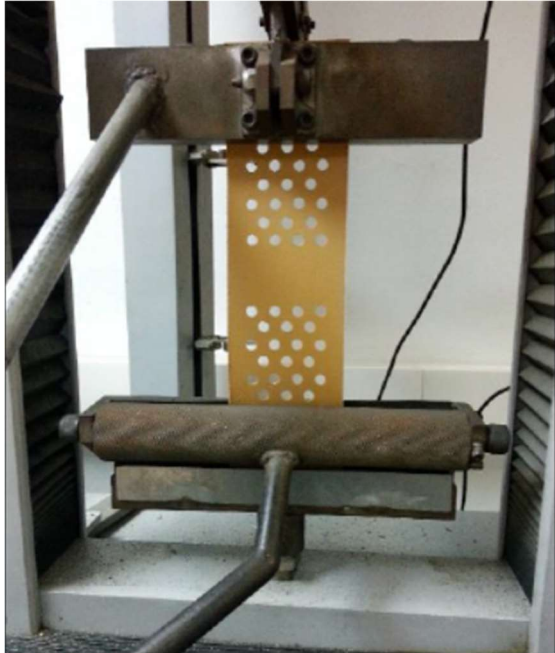


Figura 5. Máquina universal de testeo para ensayo a tracción de geoceldas



Figura 6. Sujeción de la geoceldas en ensayo de separación de costuras

5.2 Módulo de rigidez dinámica

La rigidez dinámica de un sistema es muy importante para cargas cíclicas en estructuras como caminos pavimentados. Está definida también por la rigidez dinámica de las geoceldas. A mayor rigidez dinámica, mayor es la restricción a los movimientos verticales y horizontales debidos al impacto dinámico. El comportamiento dinámico es de suma importancia en la respuesta de las geoceldas ya que un aumento de la rigidez dinámica permite aumentar esfuerzos sin evidenciar grandes deformaciones. Además, las bajas deformaciones elásticas dan por resultado un incremento del factor de incremento del módulo (MIF) que se explicará más adelante.

La rigidez del módulo dinámico se determinará usando el ensayo DMA (ASTM E2254, ISO 6721-1).

El testeo DMA (Dynamic Mechanical Analysis) es una técnica que mide las propiedades viscoelásticas de los polímeros en función de la temperatura, frecuencia y la deformación a través del tiempo.

- Muestra

La muestra será cortada de una Geocelda, en una sección que no presente perforaciones como muestra la siguiente Figura 7.

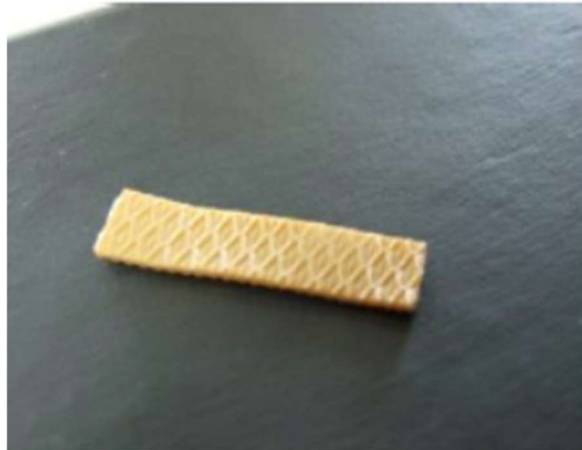


Figura 7. Muestra de geocelda para test dinámico

- Configuración de modo de tracción

La muestra debe ser colocada de forma vertical como muestra la Figura 8, tomada de ambos extremos de la maquinaria. La tensión se debe aplicar perpendicularmente a las costuras de las bandas.

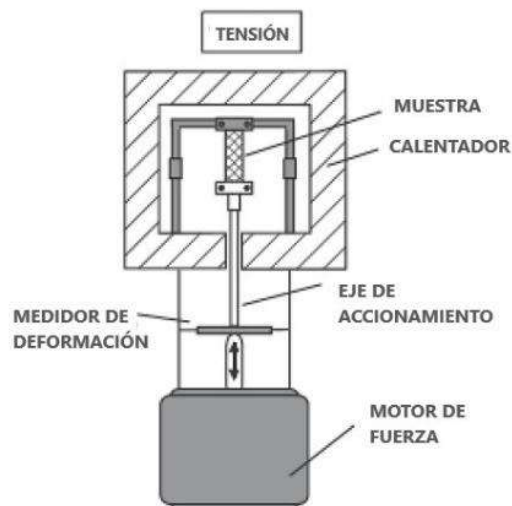


Figura 8. Esquema de maquinaria de ensayo dinámico

5.3 Resistencia a la deformación permanente (Creep)

El método de los pasos isotérmicos (SIM) [13] fue desarrollado para las industrias espacial, militar y automotriz con el fin de predecir la deformación acumulada de los polímeros plásticos bajo cargas de tracción a lo largo de su vida útil. El test mejorado para geoceldas descrito en este artículo, mide la deformación plástica acumulada de una banda representativa de una Geocelda a carga constante mediante el incremento de la temperatura (tiempo representativo) en escalones.

El procedimiento Tiempo-Temperatura (TTS) es usado en muchas pruebas sobre materiales, sobre todo en polímeros. Un ejemplo de su correlación es el siguiente: El paso número 2 (51°C) se realiza en 1 hora y representa 100 000 horas del material colocado in situ con resultados logarítmicos.

Los modelos de tiempo y temperatura pueden ser útiles para extrapolar los resultados de las pruebas de Creep para propósitos de diseño. En este caso, se deben tener en cuenta los cambios de temperatura mediante curvas maestras.

Para hacer esta prueba más corta y sencilla de realizar, como también simplificar los datos y sus resultados, la prueba SIM original se ajustó a las geoceldas con una carga fija constante para todo el procedimiento. De esta manera, se simula la tracción originada por el “efecto aro” en el diseño. El test modificado se divide en 2 grandes etapas:

- Prueba a temperatura ambiente (21°C) – simula la colocación y la compactación en el proyecto.
- Prueba dividida a 3 temperaturas elevadas: (44°C, 51°C, 58°C) – simulan de 20 a 30 años de vida útil de uso continuo del producto.

La prueba SIM da la posibilidad de medir y calcular como se comportará la Geocelda a lo largo de un periodo extendido en el tiempo. La deformación plástica permanente crea un incremento de volumen en la Geocelda, esto está directamente correlacionado con el asentamiento de la materia de relleno y el módulo de la capa conformada en la vida de diseño.

Cámara de temperatura

Esta cámara debe tener su puerta de acceso transparente, que permita el monitoreo de la prueba en todo momento como se puede ver en la siguiente Figura 9. La misma debe llegar a los intervalos de temperatura con la rapidez que el ensayo lo supone, con el fin de prevenir elongaciones que no sean tomadas en cuenta.

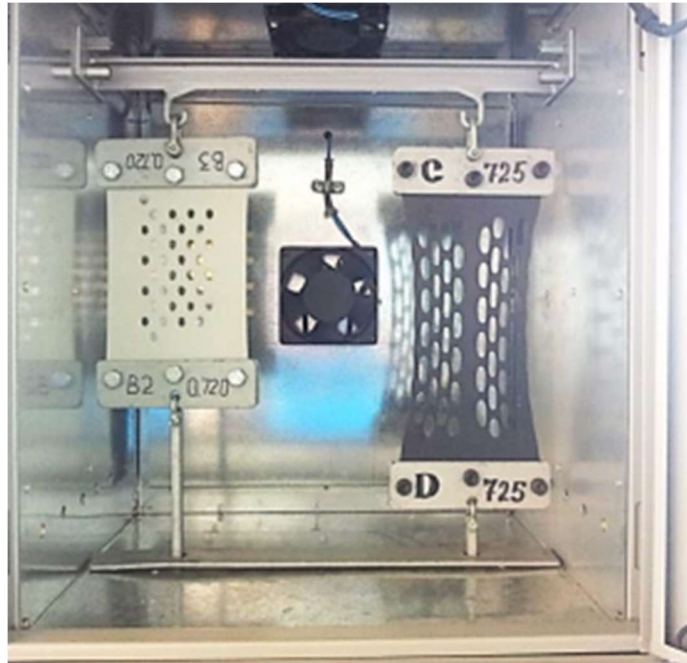


Figura 9. Ensayo SIM de deformación aplicado a Geocelda de NPA (izquierda) vs. Geocelda de HDPE (derecha).

Cargas de prueba

- Se pueden utilizar pistones hidráulicos o bien pesas para la carga (en cuanto a pesas, su peso será medido al gramo).
- La carga correspondiente a 6,1 kN/m será utilizada para geoceldas proyectadas como refuerzo de base.
- La carga correspondiente a 4,4 kN/m será utilizada para geoceldas proyectadas como refuerzo de subbase o subrasante.
- La siguiente **Error! Reference source not found.** muestra los pesos a utilizar según el ancho de la Geocelda:

Tabla 1. Pesos de carga según ancho de geocelda

Ancho de muestra	75 mm	100 mm	120 mm	150 mm	200 mm
6.1 kN/m	46.5 kg	62 kg	74.4 kg	93 kg	124 kg
4.4 kN/m	33.5 kg	44.7 kg	53.6 kg	67 kg	89.4 kg

6 Materiales de las geoceldas y su performance

La geoceldas que más se utilizan para la estabilización y el refuerzo de carreteras se pueden dividir en dos grandes tipos: Las de HDPE (High Density Polyethylene) y NPA (Novel Polymeric Alloy).

6.1 Geoceldas de HDPE

El HDPE o bien en español PEAD (polietileno de alta densidad) es usado en una gran variedad de productos plásticos, así también como en geoceldas. Es inerte, flexible, tiene bajo costo y es fácil de fabricar. Aunque este polímero fue ampliamente utilizado desde los años 1980s, “Los polímeros de alta densidad son menos adecuados para el refuerzo y la estabilización por su alta elongación hasta la rotura y su baja rigidez... por lo que el comportamiento a bajas deformaciones (2%) es decisivo para aplicaciones en bases de carreteras” [5]. Esto quizá haya contribuido a la falta de adopción de las geoceldas como base para el refuerzo de pavimentos flexibles, como también incentivó el desarrollo de geoceldas de mayores propiedades. Las geoceldas de este material no suelen mostrar sus aptitudes frente a los ensayos nombrados en la sección anterior.

6.2 Geoceldas de NPA

NPA es una aleación nano-polimérica de poliéster y nano-fibras de poliamida dispersas en una matriz de polietileno. Las propiedades de esta geocelda la especifican como relevante para el diseño de pavimentos: Alto módulo elástico y resistencia a la deformación permanente. Esto le permite a la geocelda de NPA mantener su estabilidad dimensional con bajas deformaciones bajo cargas cíclicas, de gran magnitud, como también bajo cargas de larga duración, típicas en los diseños de infraestructura.

De acuerdo con las especificaciones de fabricación, las geoceldas de NPA presentan un módulo elástico de entre 625-700 MPa a 45°C (ensayo DMA, ASTM E2254); una resistencia a la tracción de entre 21-25 kN/m para aquellas no perforadas y de entre 16-22 kN/m para aquellas perforadas (ensayo de resistencia a la tracción ISO 10319); alta durabilidad a la deformación acumulativa permanente inferior a 3% en 75 años (ensayo SIM, ASTM D6992). Estos valores concuerdan con lo requerido por las propiedades citadas en la guía de diseño holandesa como se muestra en la tabla.

Tabla 2. Propiedades globales de las geoceldas (Fuente: Dutch Standard, Vega, ET AL, 2018)

Propiedad	Unidad	Método de ensayo	Valor
Módulo de rigidez dinámico (DMA)	MPa	ISO 6721-1, ASTM E2254	**
Deformación plástica acumulada (Creep)(SIM)	%	ASTM D6992	<3
Resistencia a la tracción en celdas no perforadas	kN/m	ISO 10319	20-29
Resistencia a la tracción en celdas perforadas	kN/m	ISO10319	16-25
Resistencia UV y oxidación (HPOIT)	Minutes	ASTM D5885	>400
Resistencia de costuras soldadas	kN/m	ISO 13426-1(part 1, método C)	>17
Altura de la pared de celda	Mm	-	50-200
Distancia entre costuras	Mm	-	330-720

7 Métodos de diseño

7.1 Incorporación de las geoceldas en los métodos de diseño de pavimentos

El diseño con geoceldas para refuerzo de pavimentos o estabilización de subrasantes está basado en el módulo resiliente de las estructuras de pavimentos. Esto integra el modelado de las geoceldas dentro de los métodos mecanicistas y empíricos de diseño, como el método multicapa. Mientras que varios métodos de cálculo de capacidad han sido propuestos [1] [5], el módulo del sistema de las geoceldas y el factor de mejoramiento del módulo son los utilizados por la guía de diseño holandesa [5].

El Factor de mejoramiento del módulo (MIF)

El factor de mejoramiento del módulo se ha establecido tanto en laboratorio como en escala real, resultado en figuras validadas [8,9,10]. La magnitud de la mejora depende de la geometría, propiedades del material, módulo del relleno y profundidad, y soporte de la subrasante (SIF). La relación del incremento del módulo de la capa base gracias al refuerzo de la geocelda vs. la convencional no reforzada es definida como el “factor de mejoramiento de módulo” (MIF), expresado en la siguiente fórmula:

$$MIF = \left(\frac{E_{bc(\text{reforzada})}}{E_{bc(\text{no reforzada})}} \right) \quad (1)$$

Donde:

- E_{bc} (reforzada) es el módulo de la base reforzada
- E_{bc} (no reforzada) es el módulo de la base no reforzada

Métricas y calibraciones cuantificables del MIF derivaron de ensayos y habilitaron su integración a los métodos mecanicistas y empíricos. Los valores del MIF para geoceldas de NPA varían en un rango de 2.0 – 5.0

Por la combinación única de efecto compuesto, la siguiente relación entre el valor de Módulo de la subrasante y el valor MIF puede establecerse en la Figura 10.

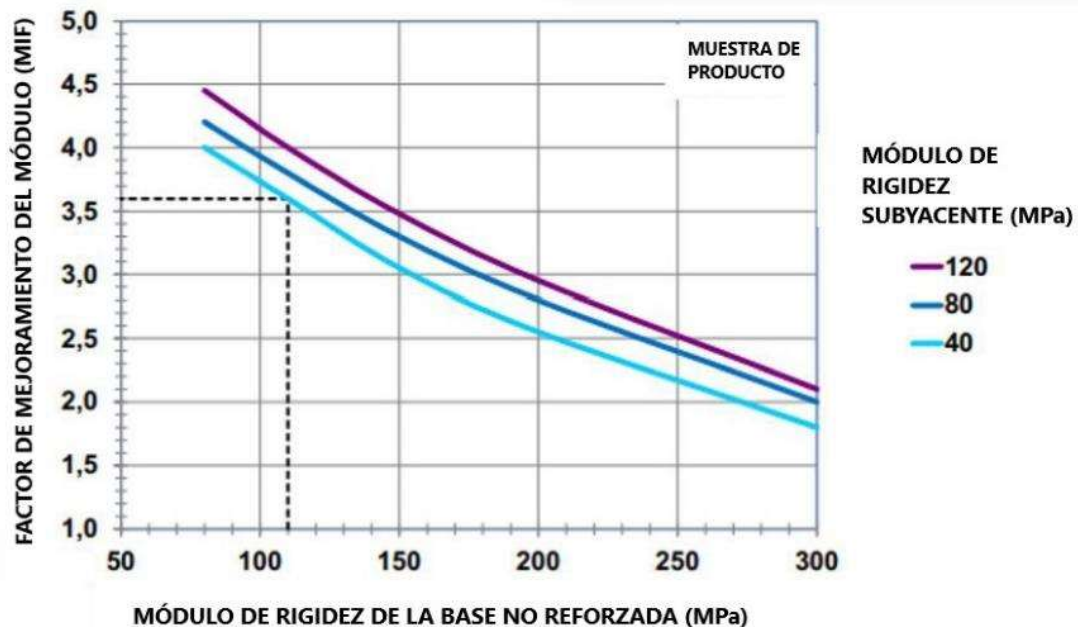


Figura 10. Factor de incremento del módulo (MIF) para geoceldas de NPA (fuente: Dutch Standard, Vega, et al, 2018)

Esta figura muestra como el valor de MIF se influencia con la contribución de las geoceldas de NPA.

En el ejemplo mostrado en la Figura 10, se puede observar que una subrasante cuyo módulo se encuentra en los 40 MPa debajo de una capa de grava no reforzada de un módulo de 110 MPa, el resultado de reforzar la capa de grava incrementa su valor en 3,6 veces (MIF obtenido) dando por resultado 396 MPa.

7.2 El uso del MIF en el método multicapa para carreteras pavimentadas

Este método evalúa tensiones, deformaciones y deflexiones en múltiples capas para configuraciones específicas. Primero, Un modelo mecanicista de capas

pavimentadas es creado en base a la teoría elástica. Luego, la típica configuración de cargas es aplicada, usando cualquiera de los programas disponibles para elasticidad de capas. El diseño de la metodología para las geoceldas de NPA está basado en reemplazar la capa no reforzada por una reforzada de mayor módulo afectada por el MIF correspondiente [14]. Este resultado reduce deformaciones bajo la misma carga, los mismos ciclos de carga, y similares condiciones bajo el paquete estructural.

7.3 SIF – Factor de incremento de la subrasante

Este concepto se concentra más en la capacidad portante del sistema más que en el comportamiento frente a la deformación. Es de gran interés cuando se instala una capa no ligada directamente sobre un suelo muy blando. Esta estabilización de la subrasante es considerada como una plataforma de trabajo y no como parte estructural del pavimento. El suelo de relleno confinado incrementa su capacidad portante, lo que resulta en un soporte de mayor rigidez debajo del pavimento.

El factor de incremento de la subrasante (SIF) se ha establecido con pruebas de laboratorio, y prácticas teórico analíticas como muestra la Figura 11. El SIF para geoceldas de NPA puede ser mayor a 7.6, dependiendo de las propiedades del material y las condiciones de sitio.

Factores de mejoramiento – Relación de módulo limitada (R_E)



Ensayo de carga de plato cíclica, Univ. de Kansas



Ensayo de carga de rueda acelerada, U. de Kansas

- Para agregados compactados hasta suelo de subrasante
- Factor de mejoramiento de la subrasante (SIF) = 7.6*

$$R_E = I_f \frac{E_{bc}}{E_{sg}} = \text{Max} \left\{ 7.6, I_f \left(\frac{3.48 CBR_{bc}^{0.3}}{CBR_{sg}} \right) \right\}$$

R_E = Módulo resiliente

E_{bc} = Módulo resiliente de la capa base (MPa)

E_{sg} = Módulo resiliente de la subrasante (MPa)

CBR_{bc} = Valor soporte relativo de la capa base

CBR_{sg} = Valor soporte relativo de la subrasante

* **Factor de mejoramiento de la subrasante (SIF)**

SIF de 7.6 es el máximo límite de módulo basado en el método de diseño de Giroud y HAN ajustado para geoceldas 3D y validado por el ensayo de carga cíclica en plato y el de carga de rueda acelerada, Universidad de Kansas (Pokharel 2010)

Figura 11. Factor de mejoramiento de la subrasante (SIF) para geoceldas de NPA (Fuente: Dutch Standard, Vega, et al, 2018)

8 Caso de estudio – Construcción de la carretera N°6 en Israel

8.1 Introducción

La carretera N°6 de Israel es una autovía nacional de 140 km de largo que cruza el país de norte a sur. Este proyecto fue operado por Aecon, una de las compañías de infraestructura más grandes de Canadá, con un costo de \$1,4 mil millones de dólares.

Construida bajo los más altos estándares, el proyecto inicial incluía 140 km de carretera nueva, 140 km de servicio agroalimentario, 13 intercambiadores, 150 puentes, 2 túneles mellizos, entre otras obras.

8.2 El objetivo

El desafío de esta obra era el de añadir un 3er carril de circulación en cada sentido en respuesta del incremento de demanda de tráfico de los últimos años.

El terreno de fundación es un suelo que posee un CBR que rondaba entre el 5% - 6% y un tráfico definido por ejes equivalentes (método ESAL) de $W_{18} = 38 * 10^6$ ejes

Se realizaron tramos de prueba, en cada sentido de la autovía. En un tramo de 1km, se dividió en 2 subtramos de extensión 0.5 km. de implemento de las geoceldas con la estructura que muestra la Figura 12 en su lado izquierdo y los 0.5 km restantes con la estructura que muestra el lado derecho.



Figura 12. Comparación de estructuras. Convencional (izquierda) vs Base reforzada con NPA (derecha)

La solución convencional:

La solución convencional para el pavimento asfáltico consistía en 200 mm de asfalto, 200 mm de una base granular y 270 mm de una subbase granular.

La solución alternativa:

La solución alternativa para el pavimento asfáltico consistía en colocar la misma subbase granular de 270 mm de espesor, seguido de una geocelda de NPA de 140 mm rellena del mismo material de la subbase y por sobre dicha capa la misma subbase granular de 100 mm del mismo suelo y 160 mm de asfalto.

La solución alternativa con geoceldas de NPA tenía 2 objetivos:

- Reemplazar la base de piedra partida por un agregado granular local, de baja calidad (conformar una subbase de tipo A). Este material se usaría tanto para la base (240 mm) como para la subbase (270 mm). Ahorrando costos por un 37%.
- El espesor de la capa asfáltica se reduciría en de 200 mm a 160 mm constituyendo un ahorro de 20%.

Se adoptaron las geoceldas NPA en la base de la estructura del pavimento rellenando con 140 mm de material granular de calidad apta para subbase como muestra la Figura 13, Figura 13. Relleno de geoceldas con material local y 100 mm de relleno superior. Luego estas fueron humedecidas y compactadas.

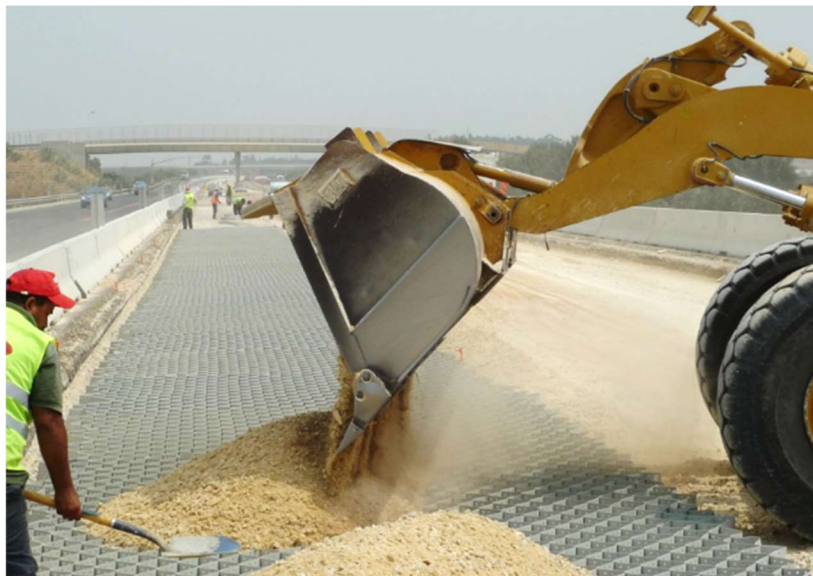


Figura 13. Relleno de geoceldas con material local

8.3 Resultados

El monitoreo se basó en celdas de presión ubicado en la capa base de la sección. Se realizó carga de placa de carga estática. Se aplicó presión vertical gradualmente sobre la capa base y las tensiones verticales fueron registradas.

Los resultados muestran (ver Figura 14) que la tensión vertical (~ 10 PSI) en las dos secciones que fueron reforzadas con Geoceldas NPA (líneas verde y roja) presentan ~ 50% menos tensión que la sección de control no reforzada (20 PSI - línea azul).

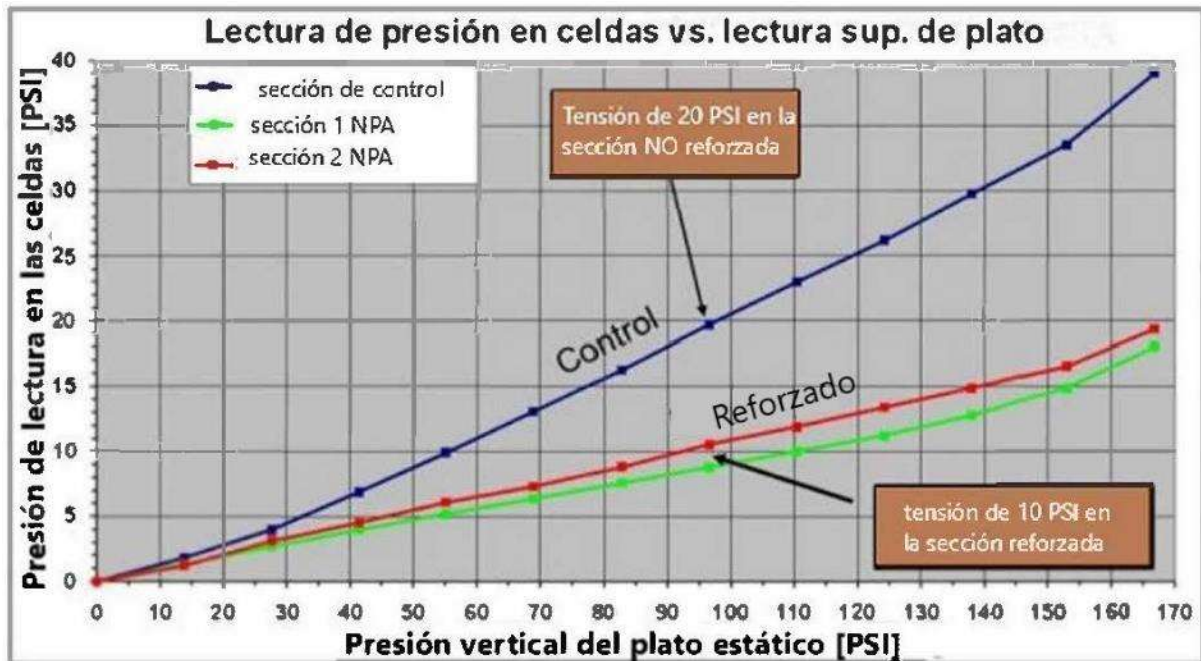


Figura 14. Resultados de ensayo de plato de carga

9 Conclusiones

- La geocelda de alto desempeño es una alternativa viable desde el punto de vista técnico frente a los diseños convencionales.
- La conveniencia técnico-económica de uso dependerá de la situación particular de cada proyecto: Material disponible, suelos locales, estado de la subrasante, condiciones de tráfico,
- Es crítica la elección correcta del tipo de Geocelda para que soporte las cargas y no se deforme durante todo el período de vida útil.
- La geocelda deberá tener una resistencia a tracción mayor al esfuerzo generado por el esfuerzo actuante
- El Módulo de rigidez disponible deberá garantizar un límite de deformación tal que garantice el valor del MIF = 4 para toda la vida útil del proyecto en términos de tráfico.
- La Geocelda debe mantener una deformación elástica compatible con la capa suprayacente
- La deformación total acumulada de la geocelda deberá mantenerse en un rango tal que el MIF calculado no pierda efectividad en el tiempo

10 Referencias

- [1] Hedge, A. (2017). Geocell reinforced foundation beds-past findings, present trends and future prospects: a state-of-the-art review. Construction and Building Materials 154: 658 – 74. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.230>.
- [2] Han, J., Pokharel, S.K., Yang, X. and Thakur, J. (2011). Tough cell: geosynthetic reinforcement shows promise, Roads and Bridges, 40-43.

- [3] Emersleben A., Meyer M. (2010). The influence of hoop stresses and earth resistance on the reinforcement mechanism of single and multiple geocells. 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil.
- [4] Pokharel, S.K., Han, J., Manandhar, C., Yang, X.M., Leshchinsky, D., Halahmi, I., and Parsons, R.L. (2011). Accelerated Pavement Testing of Geocell-Reinforced Unpaved Roads over Weak Subgrade. Journal of Transportation Research Board, the 10th International Conference on Low-Volume Roads, July 24-27, Lake Buena Vista, Florida, USA.
- [5] Vega, E., van Gurp, C., Kwast, E. (2018). Geosynthetics for Reinforcement of Unbound Base and Subbase Pavement Layers (Geokunststoffen als Funderingswapening in Ongebonden Funderingslagen), SBRCURnet (CROW), Netherlands. 12th Conference on Asphalt Pavements for southern Africa
- [6] Yuu, J., Han, J., Rosen, A., Parsons, R. L., Leshchinsky, D. (2008). Technical review of geocell-reinforced base courses over weak subgrade, The First Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition proceedings (GeoAmericas), Appendix VII, Cancun, Mexico.
- [7] Thakur, J.K., Han, J., Pokharel, S.K., and Parsons, R. L. (2012). Performance of geocell-reinforced RAP bases over weak subgrade under cyclic plate loading. Geotextiles and Geomembranes, 35 (14) 24.
- [8] Pokharel, S.K. (2010). Experimental study on geocell-reinforced bases under static and dynamic loading, PhD dissertation, Civil, Environmental, and Architectural Engineering Department, University of Kansas.
- [9] Rajagopal, K., Krishnaswamy, N.R., and Madhavi Latha, G. (1999). Behaviour of sand confined with single and multiple geocells. Geotextiles and Geomembranes, 17 (3), 171-184.
- [10] ISO Standard WD TR 18228-5. Design using geosynthetics – Part 5: Stabilization. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, www.iso.org. Unpublished document under development.
- [11] ASTM Standard WK61159. New guide for use of geocells in geotechnical and roadway projects. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org. Unpublished work item.
- [12] ISO 10319:2015, Geosynthetics -- Wide-width tensile test, ISO, Geneva, Switzerland, www.iso.org.
- [13] ASTM D6992-16, Standard test method for accelerated tensile creep and creep-rupture of geosynthetic materials based on time-temperature superposition using the stepped isothermal method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org.
- [14] Kief, O. (2015). Structural pavement design with geocells made of novel polymeric alloy. Geosynthetics 2015 Conference Proceedings. Portland, Oregon, February.