

# Análisis del creep y su afectación al factor de mejoramiento de módulos, en geoceldas poliolefinas utilizando el método isotérmico escalonado, norma ASTM D 6992

Julian Gonzalo Gomez, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia, jggomez56@ucatolica.edu.co

## RESUMEN

El trabajo de investigación muestra el análisis del comportamiento a la deformación a largo plazo de las Geoceldas, debido a su importancia en el factor de aumento de módulos MIF que se tiene en cuenta al momento de diseñar una estructura de pavimentos reforzada con Geoceldas. Al indagarse acerca del comportamiento estructural que se tiene en las Geoceldas, así como, la distribución de esfuerzos que esta genera sobre sus paredes, para poder determinar qué tan importante es la existencia de una deformación en la Geocelda. Para lograr revisar este comportamiento, se procedió con el muestreo y realización del ensayo "SIM modificado para Geoceldas". Este trabajo muestra un ensayo del material que compone un sistema relativamente nuevo como lo es las Geoceldas. Llevando los criterios de análisis, a la comparación de los materiales de la muestra, espesores de la misma y como esto influye en el comportamiento de una estructura de pavimento. Durante el ensayo se aplica una carga, vaticinando los esfuerzos generados por las cargas de tráfico y peso de los materiales a nivel de la capa de subbase granular de un pavimento.

Palabras clave: Creep, Ensayo SIM, Geoceldas, Método Isotérmico Escalonado

## 1. INTRODUCCIÓN

A través de la historia el ser humano ha desarrollado nuevas tecnologías en el campo de la construcción en busca de solucionar múltiples problemas que se presentan. Uno de estos inconvenientes más frecuentes en el diseño de una estructura de pavimento ha sido las sobrecavaciones y grandes espesores de materiales pétreos no renovables, con el fin de cumplir con los requerimientos de diseño. Al tener estas soluciones tradicionales, producen consecuencias al medio ambiente por la huella de carbono que generan, durante las actividades de excavaciones, movimiento de tierras y transporte de material granular, por esto una de las mejores soluciones ha sido la implementación de Geosintéticos en los casos en donde se desea obtener refuerzos de estructuras de pavimento.

Por esta razón y teniendo conocimiento que la tecnología de las Geoceldas fue visualizada a comienzos del siglo XX, cuando se tenía la necesidad de construir caminos rápidamente, sin buena visualidad física y temporales, solo con la finalidad de poder transportar todo lo necesario para la guerra, el US Army Corps of Engineers [cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos de América, USACE) fue el primero en utilizar y desarrollar el sistema de confinamiento celular a finales de 1970, como material de ayuda para construir caminos, pistas de aterrizajes, entre otros; todas estas soluciones se realizaron sobre suelos muy blandos y bajo condiciones de climas húmedos. (GEOCELDAS SA, 2015).

Ahora bien, con la llegada de estas nuevas tecnologías como lo fueron las Geoceldas, también surgieron los problemas que todo material posee, como lo es la degradación UV y los problemas de deformaciones producidas por los esfuerzos a los cuales se someten, a cuyo efecto, los resultados son tan negativos que este material no ha sido la excepción, por lo cual se hace necesario realizar una serie de ensayos y pruebas, tal que den la certeza del cumplimiento de los mecanismos de refuerzo bajo los cuales se han diseñado las estructuras, tal como lo dice el *Dr. Braja M. Das* en su entrevista (Das, 2015), "(...) *La pregunta ahora es si podremos realizar los diseños adecuados, que puedan durar cientos de años y ser inocuos para el medio ambiente*".

Entonces, la tecnología de las Geoceldas ha ido evolucionando desde esa primera implementación, llegando a lo que se conoce ahora, que son Geoceldas fabricadas a partir materiales polímeros compuestos en su mayoría por poliolefinas. Por lo cual, se hace necesario garantizar que los mecanismos de refuerzo con esta tecnología compuesta de estos materiales sean duraderos y cumplan con las características con que fueron diseñados, las Geoceldas son diseñadas con el fin de producir en el material granular que contiene un confinamiento, aumento con esto las propiedades de dicho material, por esta razón existe la importancia de realizar ensayos al material que compone la Geocelda, con el fin de evitar que se deforme tal que, el aumento de propiedades sea nulo, conllevando a un mal funcionamiento de la estructura. Es aquí donde el método isotérmico escalonado (SIM) tiene su importancia, ya que describe como este material se deformara bajo unos esfuerzos y un tiempo estimado, asimismo, este valor de deformación afectara directamente el valor del factor de incremento de módulos (MIF) ya que el aumento de propiedades se perderá.

## 2. METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló basándose en el ensayo del método isotérmico escalonado (SIM) el cual está normalizado por la ASTM D6992; se modificó con la finalidad de lograr probar la deformación a largo plazo de las Geoceldas, conociendo que al momento de calcular el factor de incremento de módulos MIF, se hace necesario contemplar una serie de variables de supervivencia, dentro de la cual se encuentra la deformación a largo plazo bajo carga aplicada del material que compone la Geocelda (ensayo SIM), esto es de suma importancia ya que si no se cumple con el confinamiento requerido a lo largo de los años proyectados el valor MIF será despreciable, esto tiene una explicación lógica debido al comportamiento estructural de las Geoceldas, el cual determina un confinamiento aparente del material granular aumentando sus propiedades.

Luego, la relación que existe entre el módulo de un material granular confinado con Geoceldas y el mismo material granular sin confinar se llama MIF (modulus Improvement Factor) o Factor de mejoramiento de Módulos determinándose a partir de la siguiente ecuación (PAVCO MEXICHEM, 2012):

$$MIF = \frac{E_{\text{Reforzado}}}{E_{\text{Sin-refuerzo}}} \quad (\text{Eq.1})$$

$$\text{MODULO NO REFORZADO} \times MIF = \text{MODULO REFORZADO} \quad (\text{Eq.2})$$

Para ello, el ensayo "SIM" determina la deformación a largo plazo de los polímeros mediante la superposición de tiempo-temperatura, a cuyo efecto, fue modificado para utilizarlo en Geoceldas poliolefinas. Dicho método de superposición conocido como "principio de superposición- temperatura (PSTT)" establece que el material al tener una propiedad viscoelástica (V) medida en un intervalo de tiempo, coincide con la misma medida en tiempos mayores a una temperatura menor, este método por ser netamente empírico se enuncia como principio por no desarrollarse aun conceptos teóricos para sustentarlo. (Herminda, 1991)

En cara con lo anterior, un incremento en la temperatura según Billmeyer (BILLMEYER, 2004), acelera el movimiento molecular y segmental, llevando al sistema más rápidamente al equilibrio o "equilibrio aparente" acelerando todos los procesos viscoelásticos.

En esa medida, la modificación de este ensayo fue propuesta basados en la metodología expuesta por PRS (PRS GEO-TECHNOLOGIES, 2016), donde determinan hacer el laboratorio en cinco pasos, en los cuales se aumentará la temperatura con un tiempo determinado para cada paso; además de aplicar una carga constante durante todo el ensayo, esta será de 4.4 kN/m. Las temperaturas que se alcanzan son en el primer paso, temperatura ambiente  $21 \pm 1^\circ\text{C}$ , luego se aumenta a  $44^\circ\text{C}$  después hasta  $51^\circ\text{C}$ , luego hasta  $58^\circ\text{C}$  y por último  $65^\circ\text{C}$ .

Para la primera parte del ensayo se pretende simular la carga que se le ejerce a la Geocelda al momento de la compactación del material de relleno, es posible encontrar que por medio del principio de superposición tiempo-temperatura según PRS (PRS Geo-Technologies, 2015) a una temperatura de  $51^\circ\text{C}$  1 hora de ensayo es equivalente a 100.000 horas de uso (4166 días u 11 años).

La carga de 4.4 kN/m a la cual está sometida la Geocelda a lo largo del ensayo simula los esfuerzos que soporta la Geocelda en la sub base granular de una estructura de pavimento; siendo de esta forma necesario implementar una serie de cargas las cuales se ejercerán a través de unas pesas que transmitirán estos esfuerzos a las Geoceldas.

Al contemplar Geoceldas de una altura de 15cm y mediante la ecuación de esfuerzo,

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Eq.3})$$

Donde,

F: Fuerza aplicada

A: Área de aplicación

$\sigma$ : Esfuerzo

Conociendo el esfuerzo que se le debe transmitir a la Geocelda (4,4kN/m) y la base donde se transmitirá dicho esfuerzo se puede despejar la fuerza de la Eq.3 que se le debe aplicar,

$$\frac{4.4\text{kN}}{\text{m}} = \frac{F}{0,15\text{m}}$$

$$F = 4.4\text{kN} * 0,15$$

$$F = 0,66\text{kN} = 660\text{N} = 67,28\text{kg}$$

Así mismo, para desarrollar los procesos a lo largo de la investigación se plantearon 4 etapas distintas de las cuales se componen la temática del proyecto, las etapas se dividieron en,

Fase I: Investigación y recolección de información referente al diseño de estructuras de pavimento, mejoramiento de suelos de subrasante, Geoceldas en la ingeniería y optimización de estructuras de pavimento con Geosintéticos. Basándose en la información recolectada se determinó los factores que afectan la modelación de los pavimentos y el incremento que genera el MIF en estos, entre los cuales se encuentra el módulo resiliente, la importancia del material y sus propiedades a la deformación a largo plazo.

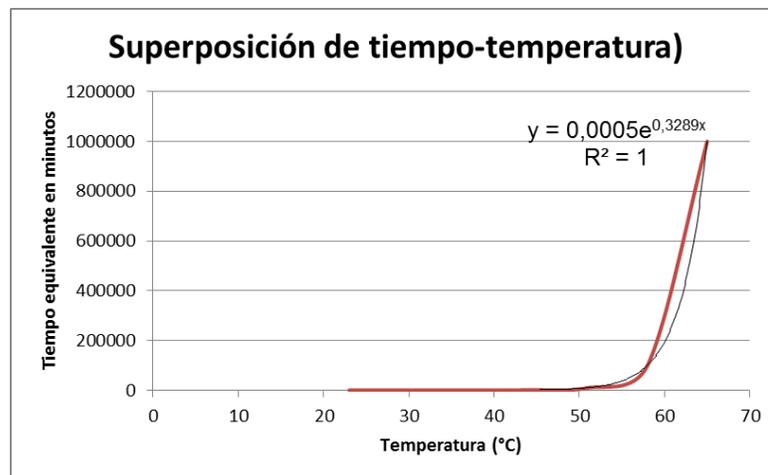
Fase II: Se realizó una recopilación de muestras procedentes de los diferentes materiales a evaluar en el proyecto y sus categorías, se obtuvieron ejemplares utilizados en la infraestructura de Colombia. Esto con el fin de proporcionar la información más cercana a la realidad posible, del funcionamiento de un proyecto con un tipo de material.

Fase III: Ejecución de ensayos mediante metodología ASTM D-6992, modificada para el estudio de Geoceldas, elaborando varias pruebas con el mismo tipo de material ensayado, logrando determinar un comportamiento similar entre las muestras con las mismas características; lo anterior, para los diferentes materiales de Geoceldas encontrados en Colombia. Se realizó un total de 16 ensayos en los cuales se analizaron, muestras de 5 diferentes características, pero únicamente de dos composiciones diferentes de materia prima, la primera un polipropileno de alta densidad HDPE y la segunda un nanopolímero conocido como Neoloy®.

Fase IV: Se ejecutó un comparativo entre los materiales ensayados, determinando la viabilidad en la incursión de estos, para las estructuras de pavimento y que tanta longevidad le dan a la misma; para ello se realizaron las gráficas pertinentes mostrando que aporte significativo le dan al incremento del MIF.

### 3. RESULTADOS

Se fue preciso obtener los datos de superposición de tiempo-temperatura mediante el desarrollo de una regresión exponencial en la cual se tuvieron en cuenta los datos suministrados durante la conferencia dictada por el Msc. Guy Tsorani (Tsorani, 2017), generando el siguiente grafico



Grafica 1 Superposición tiempo-temperatura

Se obtiene entonces la siguiente ecuación,

$$T = 0,0005 * e^{0,3289 * t^{\circ}} \quad (\text{Eq.4})$$

Donde,

T: Tiempo equivalente en minutos por minuto transcurrido en la temperatura  $t^{\circ}$ .

$t^{\circ}$ : Temperatura (°C)

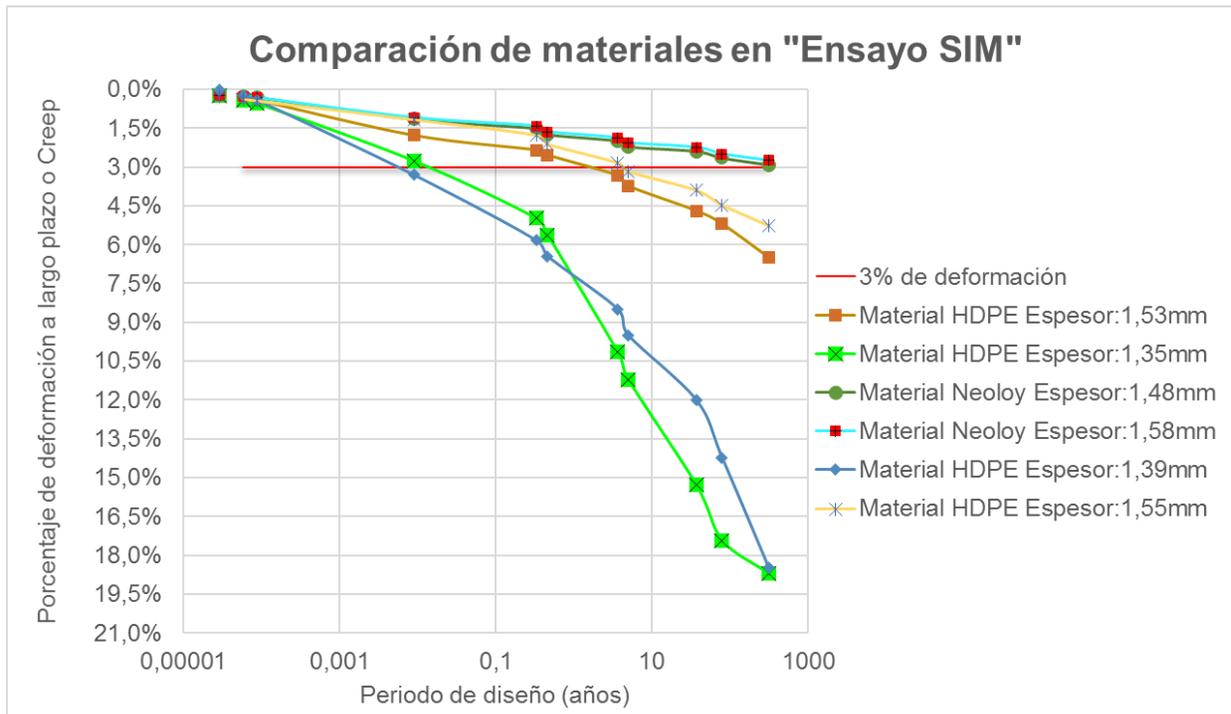
Basándose en la Eq. 4, se obtienen los datos para los tiempos equivalentes a la temperatura durante el transcurso de los diferentes pasos isotérmicos del ensayo, estos tiempos equivalentes se muestran en la siguiente tabla,

Tabla 1 Tiempos equivalentes para el ensayo sim

Paso	Tiempo (minutos)	Acumulación de tiempo (años)
<b>Ambiente</b>	0	0
	30	2,96E-05
	60	5,91E-05
	90	8,87E-05
<b>Incrementar a 44°C</b>		
<b>44°C</b>	30	8,94E-03
	167	0,33
<b>Incrementar a 51°C</b>		
<b>51°C</b>	30	0,46
	167	3,63
<b>Incrementar a 58°C</b>		
<b>58°C</b>	15	4,94
	167	36,72
<b>Incrementar a 65°C</b>		
<b>65°C</b>	60	78,78
	122	310,89

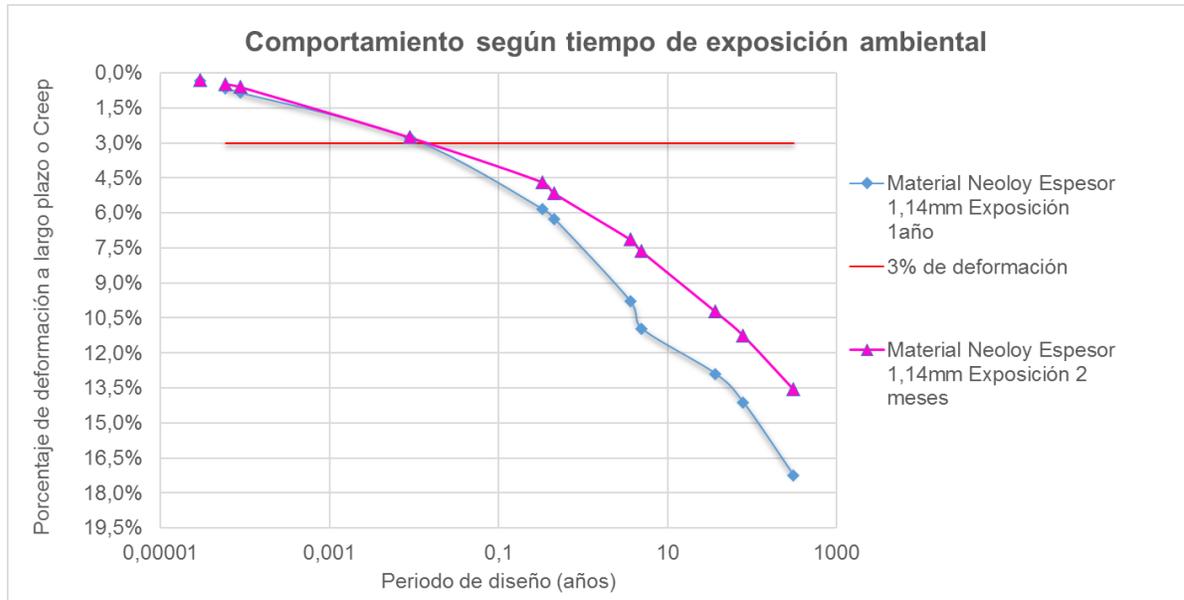
Posterior al desarrollo de las diferentes graficas realizadas a partir de los ensayos, se logró sustraer y efectuar una comparación entre los materiales que se utilizaron en cada uno de los ensayos, esto para poder determinar cuál se comportó mejor a la deformación a largo plazo. En la gráfica comparativa de materiales (véase Grafica 2) se observa nuevamente una línea roja la cual indica el 3% de la deformación, con lo cual se hace una comparación entre las muestras.

Para la gráfica comparativa de materiales no se tuvo en cuenta las muestras que llevaban un tiempo expuestas, en vista que, los otros materiales no tenían esta pre-exposición llevando a una posible errónea comparación.



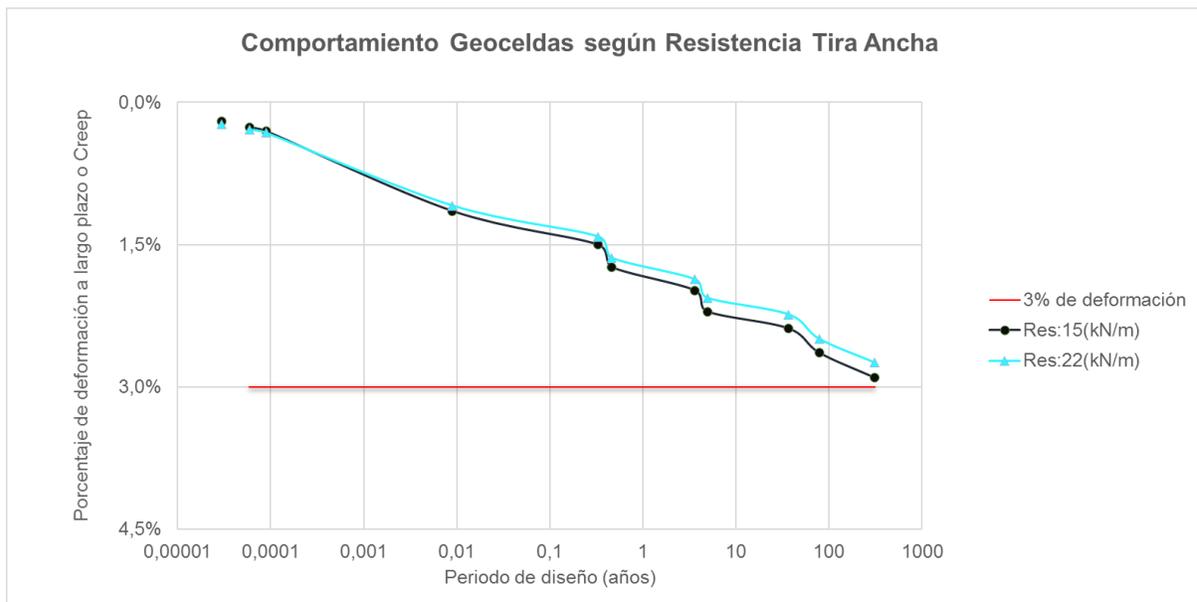
Grafica 2 Comparativo de materiales ensayados y espesores

Ahora bien, es importante conocer como es el efecto que se produce en las Geoceldas de Neoloy® al estar expuestas al medio ambiente (véase Grafica 3), puesto que estas son las que mejor comportamiento tienen ante la deformación a largo plazo.



Grafica 3 Comportamiento según tiempo de exposición natural

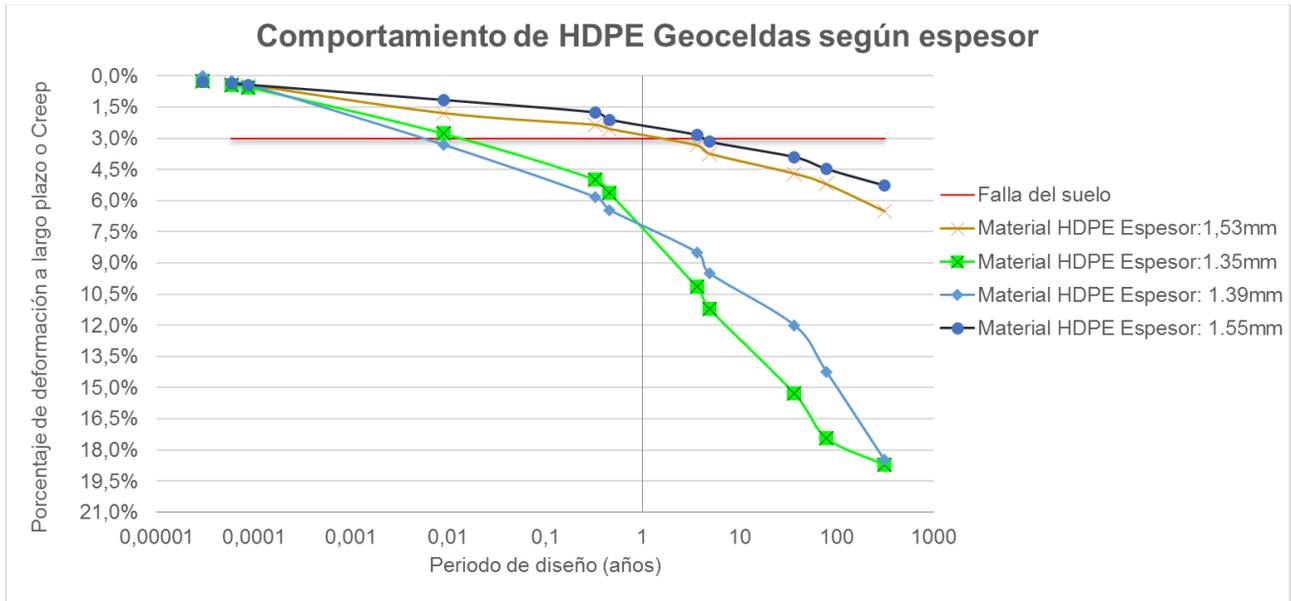
Conociendo los resultados anteriores es importante realizar una nueva comparación en las Geoceldas de Neoloy®, por su resistencia ultima al ensayo de tira ancha norma ISO 103192, la gráfica (véase Grafica 4) mostrara qué tanto incide esta propiedad en el comportamiento a la deformación a largo plazo, y qué tanto se ve afectado el factor de incremento de módulos MIF, ya que esta propiedades de deformación es vital en cuanto a la supervivencia de la estructura.



Grafica 4 Comportamiento de las Geoceldas según resistencia a tira ancha norma ISO 103192

Continuando con el análisis del comportamiento de las Geoceldas poliolefinas a la deformación a largo plazo, se observó un comportamiento distinto entre los materiales de las muestras de HDPE, donde el espesor determinó un poco el comportamiento que se tuvo a lo largo de los ensayos; por lo anterior, se quiere mostrar los espesores de las

Geoceldas de HDPE comparando como fue el comportamiento, y que tan importante es una propiedad como lo es el espesor (véase Grafica 5).



Grafica 5 Comportamiento Geoceldas HDPE según espesor

Como se logra extraer de las diferentes graficas con los mayores espesores en la pared de la Geocelda, compuestas de Neoloy®, se observó un comportamiento muy bueno frente a la deformación a largo plazo siendo este el material que mejor se comportó a lo largo de los ensayos sin llegar a la deformación del 3%, en ninguno de los dos espesores mencionados (véase Grafica 2), por esta razón las Geoceldas tendrían un factor MIF de incidencia congruente con su comportamiento a largo plazo, ya que el criterio de supervivencia es óptimo, aumentado sin restricción alguna el módulo del material a confinar, pues como se muestra en el círculo de Mohr (ver Fig. 1) Según Han (Han, 2008-2012), el confinamiento crea una cohesión aparente teniendo en cuenta la modificación en los esfuerzos normales al material granular, que únicamente se tiene si el material de la Geocelda a lo largo de la vida útil del proyecto resiste las deformaciones producidas por los esfuerzos,

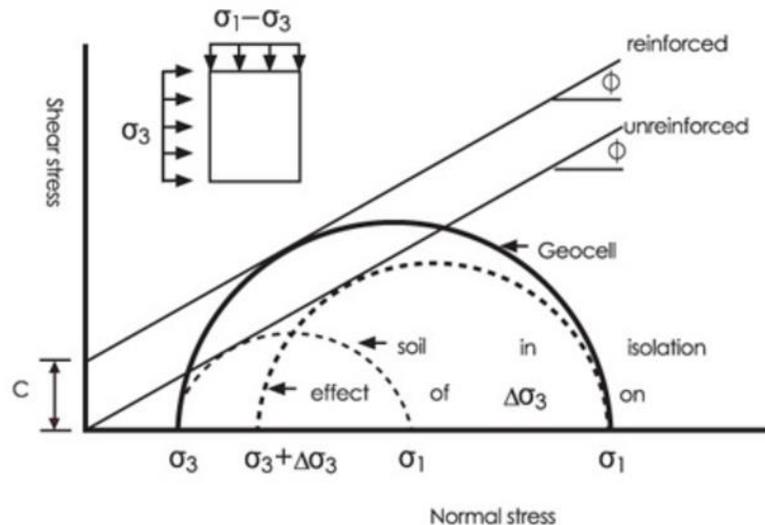


Fig. 1 Círculo de Mohr de material granular con y sin refuerzo (PAVCO MEXICHEM, 2012)

Ahora bien, al finalizar los ensayos se determinó un tiempo racional para hacer la descarga del peso en las muestras, en ese tiempo se observó un comportamiento importante, para el cual, las muestras se comenzaron a regenerar disminuyendo las deformaciones que se tenían al final, este efecto se estableció para las Geoceldas que no fallaron,

mostrando un comportamiento “elástico” pero al igual manteniendo un grado de deformación plástica, por lo que se determina un comportamiento viscoelástico lineal, en el cual existe una deformación elástica inicial causada por los esfuerzos generados sobre ella, seguida por una deformación retardada que depende del tiempo, conocida como fluencia del material. Puede existir algo de flujo permanente en el material en especial cuando se le aplican altas cargas.

En el comportamiento viscoelástico lineal, cuando se le dejan de aplicar esfuerzos al material, este comienza con un proceso inverso existiendo una cierta recuperación al instante, continuada por una recuperación a lo largo del tiempo recobrando fluencia dependiente del tiempo, el material puede llegar o no a las dimensiones originales. Si en el proceso de carga se produce flujo permanente existirá una deformación residual aun cuando ya se le deje de aplicar la carga. (Álvarez, 2013)

#### 4. CONCLUSIONES

- Las Geoceldas poliolefinas se pueden considerar un excelente refuerzo en las estructuras de las vías siempre y cuando cumplan con algunas especificaciones, como lo es la resistencia a la deformación a largo plazo, ya que es un factor de alta incidencia para los criterios de supervivencia del factor MIF.
- Las geoceldas que son fabricadas en polietileno de alta densidad (HDPE) tienen un comportamiento diferenciado en los ensayos realizados, como se observó en los resultados, este comportamiento está ligado al espesor de la muestra.
- Teniendo en cuenta los resultados de los laboratorios el factor de incremento de módulos MIF, está conectado directamente con la resistencia al Creep pues si se pierde el confinamiento por grandes deformaciones en las Geoceldas, el aumento será nulo y el comportamiento del material granular perteneciente a la estructura de pavimento será el mismo que si no se considerara reforzado.
- Todo material polimérico que este expuesto a la intemperie sufre una pérdida importante de propiedades, ya que la Geocelda que se ensayó del mismo material y espesor, pero con diferente tiempo de exposición al intemperismo (rayos UV, aire, agua, entre otros), mostró una deformación menor a la que llevaba 1 año bajo estas condiciones, asimismo, en resultados alternos a este proyecto se encontraron comportamientos similares en las Geoceldas de polietileno de alta densidad.
- El comportamiento observado durante los ensayos a las Geoceldas de polietileno de alta densidad, son comportamientos diferentes a los observados en los ensayos de las Geoceldas de neoloy®, esto debido en medida a su composición química, la cual obtiene menores puntos de fusión que los componentes bases de las Geoceldas de neoloy®, por esta razón, los enlaces por fuerzas hacen que el material se comporte con una menor viscosidad y fluya de forma más rápida que el material que tiene un mayor punto de fusión.
- Para determinar el factor de aumento de módulo es necesario conocer la resistencia del material de la Geocelda a la deformación a largo plazo, toda vez que es una parte vital para lograr cumplir con un alto desempeño durante toda la vida útil de la estructura de pavimento reforzada con Geoceldas, siendo un criterio de supervivencia que pueden llegar a afectar tanto, que el aporte de este material sea nulo.

#### 4.1 REFERENCIAS

Álvarez, F. B. (2013). LECCION 2.- COMPORTAMIENTO REOLOGICO DE LOS POLÍMEROS. VISCOELASTICIDAD. Oviedo: Universidad de Oviedo - Escuela de Minas de Oviedo.

ASTM International. (2003). Standard Test Method for Accelerated Tensile Creep and Creep-Rupture of Geosynthetic Materials Based on Time-Temperature Superposition Using the Stepped Isothermal Method. Conshohocken: ASTM .

BILLMEYER, F. J. (2004). Ciencia de los Polímeros. Barcelona: EDITORIAL REVERTÉ, S.A.,1975.

Das, D. B. (05 de 03 de 2015). El Especialista. (J. A. Agama, G. M. Gallegos, & M. T. Salinas, Entrevistadores)  
Frey Reyes Lizcano, P. (1998). Dimensionamiento de calzadas de pavimentos con base en métodos racionales y leyes de fatiga. Bogotá: Universidad de los Andes.

Geo Globe Polska . (2008). Hecho a medida Geoceldas GEOMAXX. Mikolów: Geo Globe Polska .

GEOELDAS SA. (2015). Historia. Recuperado el 12 de 04 de 2017, de Historia: <http://www.geoceldas.com/historia>

Gómez, J. (2017). Análisis del Creep y su afectación al factor de mejoramiento de módulos, en Geoceldas poliolefinas utilizando el método Isotérmico escalonado, norma ASTM D6992. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.

Han, J. (2008-2012). Geocell Reinforced Research . Kansas city: University of Kansas.

Herminda, E. B. (1991). Análisis de la superposición Tiempo-Temperatura :Determinación e interconversión de espectros de relajación y retardo. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

INVIAS. (13 de 04 de 2013). Atención al ciudadano. Obtenido de Glosario: <http://www.invias.gov.co/index.php/servicios-al-ciudadano/glosario/130-glosario-manual-diseno-geometrico-carreteras>

Montejo, A. F. (2006). Ingeniería de PAVIMENTOS. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia.

PAVCO MEXICHEM. (2012). MANUAL DE DISEÑO CON GEOSINTETICOS. BOGOTÁ D.C.: PAVCO MEXICHEM SOLUCIONES INTEGRALES.

PRS Geo-Technologies. (2015). The Effect of Creep on Geocell Design Life. PRS.

PRS GEO-TECHNOLOGIES. (2017). PRS-NEOWEB GEOCELLS (TOUGH CELLS) TEST SPECIFICATION. PRS Geo-Technologies.

PRS STABILIZING AN UNSTABLE WORLD. (2016). SIM Test Procedures ASTM D-6992. PRS Technical Description.

Tsorani, G. (2017). Geoceldas en la ingeniería. Bogotá: PRS GEO-TECHNOLOGIES.

Vergara, H. (2006). DISEÑO DIRECTI DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.