

2016

PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
JAVERIANA

Ing. Freddy Montejo  
Ing. Diego Otero

**[EVALUACIÓN DEL  
COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE  
UNA ESTRUCTURA BICAPA,  
REFORZADA CON GEOMALLA  
BIAXIAL, COMPUESTA POR  
AFIRMADO INVIAS SOBRE  
SUBRASANTE BLANDA, APLICABLE  
A VÍAS NO PAVIMENTADAS]**

Director: Ing. Hermes Ariel Vacca

---

*Agradecemos a nuestras familias, quienes nos brindaron su apoyo, ánimo y consejos durante esta investigación, donde a pesar de las dificultades, inconvenientes y problemas, su compañía nos permitió continuar día a día con la energía de ir tras nuestros objetivos sin desfallecer.*

---

*También queremos agradecer a Geosistemas Pavco, por su colaboración con la consecución de materiales, préstamo de laboratorio y guía durante el proceso de avance de la investigación. Y al Laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana, y su equipo, por su colaboración, disposición y guía durante la realización de cada uno de las pruebas.*

---

|  |    |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN.....  | 6  |
| RESUMEN.....   | 8  |
| JUSTIFICACIÓN.....   | 9  |
| OBJETIVOS .....  | 11 |
| Objetivo General .....                                       | 11 |
| Objetivos Específicos .....                                  | 11 |
| 1.  MARCOS.....  | 12 |
| 1.1.  Marco Teórico.....                                     | 12 |
| 1.1.1.  Vías no Pavimentadas.....                            | 12 |
| 1.1.2.  Deformaciones permanentes .....                      | 12 |
| 1.1.3.  Resiliencia de los materiales .....                  | 13 |
| 1.1.4.  Materiales parcialmente saturados .....              | 14 |
| 1.1.5.  Materiales finos saturados .....                     | 15 |
| 1.1.6.  Comportamiento de las Geomallas.....                 | 15 |
| 1.2.  Marco de Antecedentes.....                             | 16 |
| 2.  METODOLOGÍA .....  | 19 |
| 2.1.  Materiales a utilizar .....                            | 19 |
| 2.2.  Afirmado .....   | 20 |
| 2.3.  Subrasante .....                                       | 21 |
| 2.4.  Geomalla biaxial coextruida.....                       | 22 |
| 2.5.  Celdas de carga .....                                  | 23 |
| 2.6.  Verificación de efecto de borde.....                   | 23 |
| 2.7.  Modelos de ensayo.....                                 | 24 |
| 3.  RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ..... | 28 |
| 3.1.  Clasificación de la Subrasante.....                    | 28 |
| 3.2.  Clasificación del Afirmado.....                        | 32 |
| 3.3.  Caracterización de Geomallas .....                     | 35 |
| 4.  RESULTADOS DE MODELOS DE ESTRUCTURA.....                 | 37 |
| 4.1.  Repetitividad de las pruebas.....                      | 37 |
| 4.2.  Variación del ángulo de dispersión. ....               | 37 |
| 4.3.  Cálculo de Módulo Resiliente. ....                     | 39 |
| 5.  ANÁLISIS DE RESULTADOS.....                              | 44 |

|   |    |
|---|----|
| 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....         | 51 |
| 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..... | 56 |
| BIBLIOGRAFIA.....                       | 57 |

## ÍNDICE DE IMAGENES

|   |    |
|---|----|
| Imagen 1 Ubicación fuentes de materiales .....  | 19 |
| Imagen 2 Molde de prueba .....  | 20 |
| Imagen 3 Muestras de Geomalla probadas a tensión .....  | 22 |
| Imagen 4 Modelo condiciones de borde.....   | 24 |
| Imagen 5 Plan y configuración de ensayos.....   | 24 |
| Imagen 6 Configuración de ubicación de celdas de carga. ....  | 25 |
| Imagen 7 Molde sobre marco de MTS .....   | 25 |
| Imagen 8 Fases del procedimiento de carga. ....   | 26 |
| Imagen 9 Lecturas de las celdas durante el inicio de las pruebas.....                                   | 27 |
| Imagen 10 Datos de deformación obtenidos de la MTS.....   | 27 |
| Imagen 11 Representación ángulos de dispersión para los diferentes montajes<br>(dimensiones en m) ..... | 39 |
| Imagen 12 Resultados obtenidos en Geosoft Pavco® V3.0.....  | 54 |

## ÍNDICE DE ECUACIONES

|   |    |
|---|----|
| Ecuación 1 Cálculo de módulo resiliente.....                                      | 13 |
| Ecuación 2 Giroud y Bonaparte estructura no reforzada.....                        | 51 |
| Ecuación 3 Giroud y Bonaparte estructura reforzada para bajos ahuellamientos..... | 52 |
| Ecuación 4 Giroud y Bonaparte estructura reforzada para altos ahuellamientos..... | 52 |
| Ecuación 5 Cálculo de espesor sin refuerzo propuesta por Hausmann .....           | 52 |
| Ecuación 6 Giroud y Han .....   | 53 |

## ÍNDICE DE GRAFICOS

|   |    |
|---|----|
| Gráfico 1 Calibración celda 2.....  | 23 |
| Gráfico 2 Curva de granulometría por hidrometría para material de subrasante.....   | 28 |
| Gráfico 3 Actividad del material a partir de la prueba de azul de metileno.....   | 29 |
| Gráfico 4 Curva de compactación Proctor para el material de Subrasante.....   | 30 |
| Gráfico 5 Ensayo de CBR de la Subrasante.....   | 31 |
| Gráfico 6 Granulometría promedio del material de Afirmado.....  | 32 |
| Gráfico 7 Curva de compactación para el afirmado A-38.....  | 33 |
| Gráfico 8 Ensayo de CBR para el afirmado A-38.....  | 33 |
| Gráfico 9 Tensión deformación Geomalla tipo 1.....  | 35 |
| Gráfico 10 Tensión deformación Geomalla tipo 2.....   | 36 |
| Gráfico 11 Comparación de resultado de las pruebas realizadas a 2 montajes de 15cm de material tipo Afirmado.....         | 37 |
| Gráfico 12 Mediciones de presión realizadas en los diferentes montajes.....   | 38 |
| Gráfico 13 Ciclos de aplicación de carga y sus deformaciones en superficie, estructura de 0,15m sin refuerzo.....         | 40 |
| Gráfico 14 Módulo resiliente calculado.....   | 40 |
| Gráfico 15 Comparativo de valores de módulo resiliente calculado para diferentes espesores de afirmado, sin refuerzo..... | 41 |
| Gráfico 16 Valores de módulo resiliente en los primeros ciclos de carga.....  | 41 |
| Gráfico 17 Evolución del módulo resiliente por cambio de espesor de Afirmado sin refuerzo.....                            | 42 |
| Gráfico 18 Variación del Módulo resiliente para las diferentes condiciones ensayadas ..                                   | 43 |
| Gráfico 19 Comparativo de Módulo resiliente para los diferentes modelos de 0,1m de afirmado.....                          | 44 |
| Gráfico 20 Comparativo de Módulo resiliente para los diferentes modelos de 0,15m de afirmado.....                         | 45 |

|  |    |
|--|----|
| Gráfico 21 Humedades medidas durante el montaje de los modelos.....                              | 45 |
| Gráfico 22 Comparativo de Módulo resiliente para los diferentes modelos de 0,2m de afirmado..... | 46 |
| Gráfico 23 Comparativo de ahuellamientos para estructuras con 0,1m de espesor de afirmado.....   | 49 |
| Gráfico 24 Comparativo de ahuellamientos para estructuras con 0,1m de espesor de afirmado.....   | 50 |
| Gráfico 25 Comparativo de ahuellamientos para estructuras con 0,1m de espesor de afirmado.....   | 50 |

### ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Distribución de la red nacional de carreteras.....                                      | 12 |
| Tabla 2 Tabla 310 Requisitos de los agregados para afirmados.....                                | 21 |
| Tabla 3 Tabla 311-2 Franjas granulométricas del material de afirmado .....                       | 21 |
| Tabla 4 Evolución de Nf con la velocidad de circulación del vehículo V para $\sigma=662$ kPa. 26 |    |
| Tabla 5 Valores límites de Atterberg subrasante.....   | 28 |
| Tabla 6 Resultados de Limite de contracción.....   | 30 |
| Tabla 7 Resumen de resultados de caracterización de la Subrasante .....                          | 31 |
| Tabla 8 Valores límites de Atterberg afirmado .....  | 33 |
| Tabla 9 Calculo de partículas deleznales.....  | 34 |
| Tabla 10 Resumen de resultados de caracterización del afirmado A-38.....                         | 35 |
| Tabla 11 Variación de las áreas de aplicación de carga .....                                     | 39 |
| Tabla 12 Resumen de variaciones de módulo resiliente para diferentes espesores y refuerzos.....  | 47 |

## INTRODUCCIÓN

En Colombia, cerca del 85% de las vías nacionales, son no pavimentadas, conformadas por un material granular tipo Afirmado, apoyado sobre subrasantes blandas. Debido a que la inversión que se realiza para construcción y mantenimiento de estas vías es baja, poder encontrar sistemas de refuerzo y mejoramiento, para aumentar su vida útil y condiciones mecánicas resulta de gran importancia.

La ingeniería de pavimentos ha realizado múltiples estudios sobre los efectos de diferentes elementos de refuerzo y diferentes condiciones de subrasante, buscando encontrar los aportes estructurales de cada elemento y sus mecanismos de funcionamiento.

El presente trabajo es una investigación experimental que tuvo como objetivo evaluar las diferencias que se presentan en el comportamiento de estructuras de pavimento bi-capa, compuesta por una subrasante blanda y un material granular, en condición sin refuerzo y con la inclusión de una capa de Geomalla biaxial como elemento de refuerzo en la capa granular, variando los espesores y las resistencias de la Geomalla de refuerzo, para poder determinar el efecto que tienen estas variaciones sobre la distribución de los esfuerzos sobre la subrasante blanda.

Las respuestas de las estructuras bicapa presentan diferentes causas, entre las que se encuentran, bajas capacidades de soporte de la subrasante, saturación de las subrasantes por deficientes sistemas de subdrenaje y capacidades mecánicas deficientes de los materiales granulares. Dentro del presente trabajo, se quiere ver el efecto estructuras con diferentes espesores y resistencia de refuerzo, apoyado sobre una subrasante con baja capacidad portante, donde los materiales granulares presentan baja capacidad mecánica, como son valores de CBR inferiores a 20% y desgastes superiores al 30%; por lo cual no se tuvieron en cuenta los efectos de saturación de los materiales que conforman la estructura.

Dentro de la investigación, se realizaron una serie de pruebas de laboratorio y ensayos, los cuales permitieron caracterizar los materiales y poder entender su comportamiento individual e interacciones ante cargas cíclicas. Dichas cargas, aplicadas a los modelos realizados en laboratorio simulaban las condiciones de funcionamiento, a pequeña escala, a las que normalmente son sometidas las estructuras de pavimento. Con esta investigación, se busca comprender el comportamiento de estructuras sin refuerzo y reforzadas con Geomallas biaxiales, buscando variaciones del Módulo Resiliente (Mr).

Para el desarrollo de la investigación, se inició con la consecución de materiales que permitieran representar las condiciones de subrasante blanda y una capa de material granular tipo Afirmado; continuando con pruebas de caracterización de cada uno de los materiales, para determinar los valores y condiciones necesarios para realizar la simulación de la subrasante blanda y la capa de afirmado como elemento de rodadura.

Posterior a la caracterización de los materiales, se inició el proceso de montaje de los modelos sobre los cuales se realizó la aplicación de cargas. En cada uno de los modelos, entre la subrasante y el material tipo Afirmado, se colocaron celdas de presión, con las

cuales se tomaron datos de las diferencias de presión ante las aplicaciones de carga en superficie. Los datos capturados fueron utilizados para determinar variaciones del módulo resiliente de las estructuras y el ángulo de dispersión de los esfuerzos.



## RESUMEN

El diseño de estructuras de vías no pavimentadas, con condición bi-capa, es un tema de estudio que ha ganado importancia, debido a la amplia utilización de este tipo de vías a nivel nacional, asociado a las bajas inversiones para su construcción, mantenimiento y en innumerables ocasiones, estas vías son construidas sin ningún tipo de diseño o tratamiento especial, por lo cual, su comportamiento a largo plazo presenta deficiencias.

En este trabajo, se realiza la evaluación de diferentes configuraciones de estructuras bi-capa, conformadas por una subrasante de características blandas y un material clasificado como Afirmado en el manual de materiales para carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVIAS 2013), en las cuales se varían los espesores de material granular y se incluyen capas de Geomalla biaxial. Estas diferentes configuraciones se sometieron a la aplicación de cargas cíclicas, para simular el efecto del paso de vehículos, y poder establecer las condiciones de funcionamiento e interacción de los diferentes elementos utilizados en la estructura.

Para comprender el aporte de la inclusión de la Geomalla como elemento de refuerzo, se realizaron mediciones de presiones en la interface entre la subrasante y el material de afirmado, que comparado con la magnitud de la carga aplicada en la superficie, permitió determinar el efecto de disminución de las deformaciones en superficie y ángulo de disipación de la carga.

Las cargas, fueron aplicadas de manera cíclica, realizando mediciones de las deformaciones acumuladas, y poder determinar la disminución de las deformaciones plásticas de la estructura y poder calcular el módulo resiliente de cada uno de las diferentes configuraciones de la estructura.

Dentro del presente trabajo, los montajes realizados se hicieron bajo la consideración de vías construidas en zonas de precipitaciones bajas a nulas, donde los efectos causados por el ingreso del agua a la estructura, lavado de finos al material granular y saturaciones tanto de la subrasante como del afirmado no se presentan. Estas condiciones se presentan en vías construidas en zonas desérticas, o en zonas donde la estructura de la vía presenta en la superficie una capa funcional, mas no estructural, como pueden llegar a ser espesores de microaglomerado, capas de arena- asfalto y lechadas asfálticas de bajo espesor; que generan un efecto impermeabilizante a la estructura, más no un aporte estructural o de distribución de esfuerzos, por lo que su comportamiento y respuesta a las cargas vehiculares, son de comportamiento similar a las respuestas obtenidas dentro de las modelaciones realizadas.

## JUSTIFICACIÓN

Colombia es un país donde gran parte de sus productos agrícolas e industriales son transportados por vía terrestre, y más de 220 millones de toneladas de productos se transportaron por carretera durante el año 2013 (Minstransporte 2014), y gran parte de ellos recorre vías terciarias, las cuales presentan generalmente condiciones inadecuadas de funcionamiento expresadas en bajos niveles de servicio. El 82.15% de la red vial nacional no pavimentada, se encuentra en estado “regular” a “muy malo”, lo que implica que las velocidades de tránsito son bastante bajas y en temporadas invernales la transitabilidad es casi nula (INVIAS, Instituto Nacional de Vías 2015). Esta condición se debe principalmente a las bajas inversiones estatales en el mantenimiento de estas vías y a los prolongados periodos que transcurren entre cada mantenimiento. Según cifras de INVIAS, en el año 2014 los recursos asignados al mantenimiento de la red terciaria fueron de cerca de 2.8 billones de pesos, y para el 2015 se invertirán cerca de 2.5 billones más, cifras que contrastan con los 50 billones asignados para los proyectos 4G.

Las vías terciarias, regularmente se encuentran ubicadas en zonas donde la consecución de materiales granulares que cumplan con las especificaciones nacionales es limitada y puede aumentar los costos si se considera transportarla desde fuentes lejanas; por lo que consumen grandes cantidades de recursos en el momento de su intervención.

Durante los períodos en los cuales estas vías no son intervenidas, sufren deterioros importantes, expresados en deformaciones en superficie, afectando la transitabilidad, y en ocasiones llegan a quedar inutilizables, afectando así la comunicación y transporte de productos de diferente índole. Por lo tanto, la economía de las regiones generadoras de productos agrícolas o ganaderas se ve afectada de manera importante.

Durante la última gran ola invernal, entre los años 2010 y 2011, se vieron afectadas 48 vías; que afectaron 150 mil hectáreas de cultivos, y se produjo un aumento en los costos de transporte terrestre de cerca de 2,5 millones de toneladas de alimentos. También se vio afectada la producción de huevos, con pérdidas que superaron los 30 mil millones de pesos (Congreso de la Republica 2012). En términos generales, el sector de transporte tuvo pérdidas por cerca de 3.4 billones de pesos por cierre, deterioro y pérdida en las vías de Colombia, según datos de INCO, INVÍAS, Ministerio de Transporte y cálculos de la Misión BID-Cepal.

Dentro de las alternativas de mejoramiento que se suelen utilizar en la construcción de vías, se conocen diferentes formas de mejoramiento mecánico, como son el reemplazo de material de subrasante; en estos reemplazos se colocan materiales como rajón o crudo de río, dependiendo de la disponibilidad de canteras cercanas o permisos ambientales para la extracción de material granular de ríos cercanos al sitio de obra; esta última alternativa presenta cada vez más dificultad para ser desarrollada, debido a los controles ambientales que se realizan en la actualidad en busca de disminuir la erosión y socavación de los lechos de los ríos.

Otra de las alternativas que se utilizan como mejoramiento es la colocación de madera rolliza como elemento rigidizador entre la subrasante y el material granular; pero su

principal inconveniente es su funcionamiento en periodos reducidos, debido a que la madera, al ser un material natural, y estar sometida a procesos frecuentes de humedad y secado, presenta biodegradación, perdiendo sus propiedades mecánicas y dejando vacíos bajo el material granular, aumentando así los inconvenientes de la vía. Adicionalmente, los problemas ambientales que se presentan por el uso de esta técnica, al tener que ser talados un importante número de árboles para poder realizar la extracción de madera necesaria para la conformación de una capa de mejoramiento, lo hacen un sistema en desuso. Por lo anterior, es necesario contemplar nuevas medidas de diseño, construcción y mantenimiento, que permitan reducir los costos de construcción, aumenten la vida útil y los niveles de servicios en el área de transportes.

En ese sentido, es necesario reevaluar las alternativas tecnológicas que existen para el tratamiento de vías. Por lo tanto resulta fundamental conocer el aporte de diferentes Geomallas que se consiguen dentro del mercado nacional y analizar su comportamiento e interacción con los materiales que generalmente son utilizados para la construcción y mantenimiento de las vías terciarias en nuestro país. El conocimiento de esta interacción permitirá plantear soluciones estructurales adecuadas para las condiciones nacionales, y por lo tanto establecer estructuras capaces de soportar un mayor número de repeticiones de carga sin llegar a deterioros últimos.

Dentro del mercado colombiano, se disponen diferentes clase de Geomallas, como son: biaxiales tejidas en poliéster, Geomallas biaxiales en polipropileno, Geomallas biaxiales coextruidas rectangulares y cuadradas y Geomallas triaxiales, las cuales no han sido incluidas dentro de los análisis como elemento de refuerzo en modelos bicapa, y se utilizan a partir de los parámetros obtenidos de las mallas probadas y utilizadas dentro de los ensayos.

Dadas las bajas inversiones en estas vías, la dificultad general de consecución de materiales granulares y los diferentes productos que se encuentran en el mercado, se hace necesaria la búsqueda de alternativas que permitan aumentar la vida útil de las vías no pavimentadas tras cada mantenimiento, por medio de la construcción de capas granulares con características mecánicas y físicas normalizadas, con un reforzamiento por medio de la inclusión de Geomallas biaxiales, orientada a reducir los espesores granulares y aumentar su vida útil y conservar sus condiciones el mayor tiempo posible, para así mejorar el alcance de los recursos asignados a estas vías, en términos de limitar deformaciones superficiales.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

1. Evaluar el comportamiento mecánico en laboratorio de vías no pavimentadas conformadas en afirmado y reforzado con Geomallas, sobre subrasantes de baja capacidad portante.

### **Objetivos Específicos**

1. Evaluar la influencia del espesor de la capa granular en el comportamiento mecánico de la estructura bicapa en términos del módulo resiliente.
2. Establecer el efecto mecánico que produce la inclusión de una Geomalla biaxial de refuerzo, en el módulo resiliente de la estructura bicapa.
3. Comparar el comportamiento mecánico de los modelos con y sin Geomalla biaxial, en términos del ahuellamiento para diferentes espesores de la capa granular.

## 1. MARCOS

### 1.1. Marco Teórico

#### 1.1.1. Vías no Pavimentadas

Las carreteras no pavimentadas, son aquellas que corresponden a estructuras con superficie de rodadura de material granular, generalmente con bajo volumen de tránsito, TPD<50 (Tránsito Promedio Diario), de localización rural y que corresponde a la mayor longitud de vías en Colombia. Por lo tanto, estas vías deben tener criterios técnicos y coherentes con la demanda y uso, en su diseño.

En Colombia, el Ministerio de Transporte (1997), ha definido las vías no pavimentadas como aquellas con superficie en material granular que son carreteables y que carecen de estructura de pavimento. Por lo tanto, su calzada y las obras de drenaje son insuficientes para su conservación en el tiempo. Se describe también que además no son susceptibles de soportar un tránsito relativamente importante; y que son susceptibles a ser mejoradas en su alineamiento. Dentro de las características definidas por el Ministerio las describe como; “poseen terraplenes bien conformados, destinados a salvaguardar la calzada del agua en zonas bajas. Sus obras de arte son sólidas y capaces de resistir las crecientes, además poseen una capa de rodadura que refuerza la calzada”, definición que no refleja la condición de la malla vial de la red terciaria en Colombia.

Las características geométricas de las vías terciarias varían debido a que en su mayoría están localizadas en zonas de terrenos y climas diferentes, lo que ha obligado a ajustar cada vía a las condiciones locales. Los anchos de calzada varían entre 4 y 8 metros, la composición vehicular es predominantemente de vehículos pesados. Se estima que más del 70% de la red nacional la componen las vías terciarias, según datos del Departamento Nacional de Planeación (véase Tabla 1), aunque las cifras pueden variar según la fuente.

| Red Nacional de Carreteras (km)   |         |
|-----------------------------------|---------|
| Red vial nacional en concesión    | 5.980   |
| Red vial nacional no concesionada | 11.503  |
| Red vial secundaria               | 35.040  |
| Red vial terciaria                | 135.679 |
| Total                             | 188.202 |

**Tabla 1. Distribución de la red nacional de carreteras**  
Fuente: DNP y Mintransporte, 2012.

#### 1.1.2. Deformaciones permanentes

Según (Rondon y Reyes 2008), las deformaciones permanentes se generan por la aplicación cíclica de cargas, ya que una parte de la deformación total se recupera, (deformación resiliente) pero otra se va acumulando, causando hundimientos y deformaciones que se reflejan en la superficie.

Cuando el esfuerzo desviador es alto, las deformaciones permanentes son más altas y pueden causar la falla del material. Sin embargo, cuando el esfuerzo desviador es bajo, el material puede llegar a un estado de equilibrio de deformaciones, punto en el cual las deformaciones permanentes se estabilizan, y se tiene únicamente deformación elástica.

En vías, las deformaciones permanentes se muestran como ahuellamiento, que son hundimientos en las franjas de rodamiento de los vehículos sobre la vía, lo que hace que esta pierda nivel de servicio.

### 1.1.3. Resiliencia de los materiales

Los materiales que son utilizados para la construcción de vías, sean estas, pavimentadas o no pavimentadas; y los materiales con los que se conforman terraplenes para vías, están sometidos a procesos de cargas dinámicas, con diferentes magnitudes, causadas por los vehículos que las transitan, causan deformaciones resilientes o elásticas, que son de recuperación inmediata. En ocasiones, también se originan deformaciones permanentes o plásticas. Estas deformaciones permanentes, se van acumulando; cabe aclarar que estas deformaciones permanentes van disminuyendo con el paso de los ciclos, hasta llegar a desaparecer en los ciclos finales. Es en este punto del estado del material donde toda la deformación se recupera, y se tiene un comportamiento resiliente. El módulo de resiliencia es entonces, el esfuerzo desviador repetido que se le aplica en compresión triaxial, entre la deformación axial recuperable.

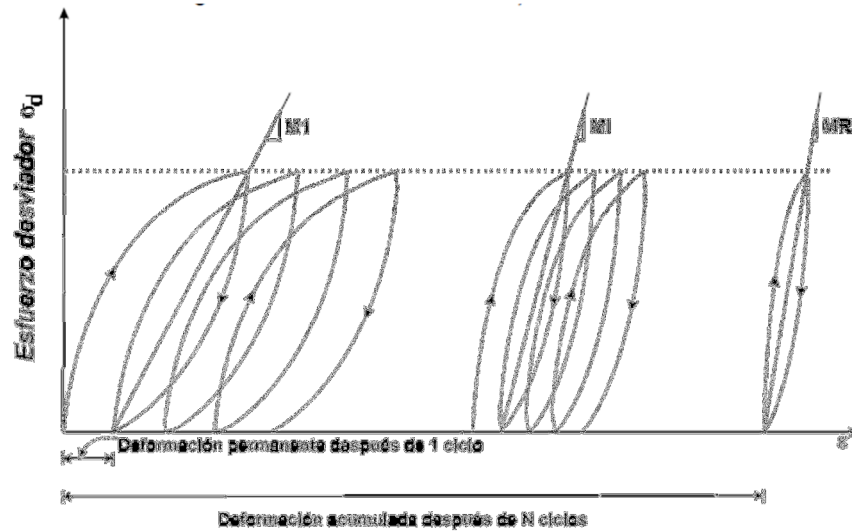
El concepto de resiliencia en vías, inicio en 1948, con la investigación de Hveem y Carmany, en la cual observaron que el módulo dinámico de elasticidad era un parámetro importante dentro del diseño de pavimentos, ya que de esta forma se podía explicar el agrietamiento por fatiga que sufrían los pavimentos y que una carga monotónica podía no ser una manera representativa de determinar la fatiga.

Posteriormente, varias investigaciones siguieron este camino, hasta que en 1962 Seed et al, definieron el módulo resiliente de la siguiente manera:

$$M_r = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\epsilon_{axial}} = \frac{\sigma_d}{\epsilon_{axial}}$$

**Ecuación 1 Cálculo de módulo resiliente**

Fue durante las pruebas de repeticiones de carga, donde se observó que después de un número determinado de repeticiones de carga, el módulo se vuelve constante y que la respuesta del suelo ante la aplicación de carga, se vuelve elástica. A este módulo que aparece cuando el comportamiento es elástico es el que se conoce como módulo resiliente, ver Figura 1.



**Figura 1 Módulo resiliente**  
Fuente: Seed et al., 1962

El módulo resiliente, es un parámetro que nos indica que tan rígido es un material, ante la aplicación de cargas cíclicas, mostrando su resistencia a sufrir deformaciones permanentes, ahuellamientos o efectos de las cargas aplicadas.

#### 1.1.4. Materiales parcialmente saturados

Los suelos saturados y los suelos secos, constituyen un sistema de 2 fases: partículas sólidas-agua y partículas sólidas-aire, respectivamente. Pero en el caso intermedio, cuando el suelo está parcialmente saturado, se involucran tres fases en el suelo que interactúan entre sí, partículas sólidas, agua y aire.

Los suelos que se encuentran por debajo del nivel freático se consideran en estado saturado, es decir, que los espacios vacíos están ocupados completamente por agua. De acuerdo con los principios de la hidráulica, bajo esta condición, el agua en los poros se encuentra a una presión positiva, es decir que ejerce una fuerza positiva, de igual magnitud y en todas las direcciones y se le conoce como presión de poros debida al agua.

Los suelos que se encuentran por encima del nivel freático, pueden estar en estado seco o parcialmente saturado, teniendo respuestas diferentes ante las aplicaciones de carga. La zona de suelo seco es la que se encuentra más cerca de la superficie del terreno, la mayor parte de los vacíos se encuentran llenos de aire, pudiendo existir una fase líquida pero en estado discontinuo, es decir, como pequeñas gotas de agua aisladas. La franja más cercana al nivel freático, es la franja capilar, donde la mayor parte de los vacíos se encuentran llenos de agua de manera continua, pero puede existir una fase gaseosa discontinua, es decir, se presentan burbujas de aire (Meza 2012).

Esta diferencia presenta una gran importancia dentro del comportamiento de los materiales granulares, puesto que en varias investigaciones, se ha observado los efectos de las variaciones de humedad en granulares, ante la aplicación de cargas.

### **1.1.5. Materiales finos saturados**

Los materiales saturados, indican la condición en la cual los vacíos del suelo están completamente llenos de agua, siendo una condición de dos estados (sólido y líquido). Esta condición puede ser permanente o temporal, dependiendo de las condiciones de drenaje que se tengan.

Los suelos finos, presentan una condición adicional y es la baja permeabilidad, debido al tamaño de sus partículas, que causan una menor cantidad de vacíos por las que el agua puede transitar, haciendo que la velocidad de desplazamiento sea baja. Por otra parte, la composición de estos materiales causa que la interacción eléctrica entre las moléculas de agua y moléculas de material de suelo, retenga el agua entre sus vacíos.

Los materiales saturados, presentan características diferentes en su comportamiento mecánico, respecto a los suelos parcialmente saturados, puesto que ante la aplicación de cargas, los suelos saturados no generan un reacomodamiento de las partículas, debido a la presión positiva que genera el agua continuidad en los vacíos del suelo.

### **1.1.6. Comportamiento de las Geomallas**

Las Geomallas biaxiales, son estructuras planas bi-dimensionales fabricadas de polipropileno, poliéster u otros polímeros sintéticos, químicamente inertes y con características uniformes y homogéneas, producidas mediante un proceso de extrusión, tejido o soldado y luego estiradas longitudinal y transversalmente. Estos procesos producen una estructura de una sola pieza con distribución uniforme de espacios rectangulares, cuadrados o triangulares, de alta resistencia a la tensión en ambas direcciones y un alto módulo de elasticidad. Así mismo, la estructura de las Geomallas permite una óptima trabazón de la fracción gruesa del suelo. Este tipo de Geomallas se compone de elementos y nudos rígidos que proveen confinamiento. Han sido en la práctica particularmente efectivas en el reforzamiento de capas granulares, en diferentes proyectos tanto a nivel nacional como internacional (Koerner 2012).

Las Geomallas presentan su función de mejoramiento basado en diferentes sistemas de refuerzo; el primer sistema es el confinamiento lateral, efecto que se consigue gracias a la trabazón de agregados, que evita que el material granular reforzado con Geomalla deba ser colocado con una inclinación lateral igual o inferior al ángulo de reposo del material o que ante la aplicación de cargas el material presente movimiento lateral, perdiéndose espesor y desconfinándose, lo que genera pérdida de resistencia. El confinamiento lateral se presenta en la zona donde se encuentra colocada la Geomalla, y se transfiere por la fricción entre las partículas del material granular.

El segundo sistema de refuerzo es el mejoramiento de la capacidad portante, que se da debido al confinamiento por la trabazón de agregados, con lo cual las deformaciones se disminuyen, aumentando el módulo de elasticidad, causando un aumento de la capacidad portante del material. El efecto causado por la trabazón de agregados con la Geomalla biaxial, genera un efecto de elemento semirrígido, que transfiera parte de las cargas a la



Geomalla, por lo cual la resistencia de esta juega un papel fundamental en la respuesta del sistema.

Por último se tiene el efecto de membrana tensionada, el cual se origina debido a la configuración de la Geomalla, que al estar confinada en material granular genera un efecto de distribución de esfuerzo sobre un área mayor. Este efecto se presenta cuando se aplica una carga en algún punto, y para presentarse una deformación en el punto de aplicación, es necesario que la Geomalla se tense en toda el área instalada, pero que al estar confinada entre el material granular la deformación se ve disminuida y los esfuerzos son menores, debido a una distribución en un área mayor; este efecto no se presenta en los modelos analizados dentro de la presente investigación, debido al tamaño de los montajes realizados.

## **1.2. Marco de Antecedentes**

Los geosintéticos han sido utilizados en vías no pavimentadas como solución y/o reforzamiento de subrasantes blandas en los últimos 40 años, los geosintéticos cumplen teóricamente varias funciones como: separación, control de drenaje y reforzamiento mecánico. Varios procedimientos de diseño estructural han sido desarrollados como control del mecanismo de falla de la sub rasante a través de la inclusión del geosintético, aumentando la superficie de distribución de carga. Cada uno de los procedimientos de diseño propuestos, han sido desarrollados para tipos de suelos y geosintéticos específicos, que corresponden a la base para la presentación de algunas cartas de diseño. Los conceptos básicos de cada uno de los procedimientos, se describen de modo sumario como lo vemos a continuación:

El departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Illinois, presentó en el año 1975, los resultados de una serie de análisis experimentales realizados a partir de modelos de agregados granulares reforzados con geotextiles no tejidos de la marca Mirafi, disponible comercialmente en Estados Unidos en la época (Barenberg, Hales y Dowland 1975). Los resultados concluyeron que a partir de la observación de las mediciones, el geotextil aumenta ligeramente la capacidad de soporte de la subrasante y reduce los niveles de esfuerzo en ella.

En el año 1977, el Departamento de Servicios de Bosques de Estados Unidos (US forest Services), presentó los resultados de un estudio desarrollado de modo experimental en el que se evaluó el desempeño de los geotextiles como elemento de refuerzo en pavimentos flexibles, y como resultado concluyó que aumenta la capacidad de soporte y reduce los ahuellamientos, medidos como la deformación expresada en superficie (Steward, Williamson y and Mohny 1977). Continuando con los estudios sobre el uso de geosintéticos en pavimentos, en el año 1977 se publican los resultados de la investigación desarrollada por el US Army Corps of Engineers, que preparó modelos a escala real, de capas de agregados gruesos reforzados con geotextiles tejidos y no tejidos, sobre subrasantes blandas. Como resultado se concluyó que los geotextiles tejidos proporcionan mayor módulo de rigidez del sistema que los no tejidos. Las conclusiones se basaron en las mediciones del ahuellamiento superficial (Webster y Watkins 1977). Estos hallazgos fueron verificados con modelos experimentales reproducidos en laboratorio, y

con análisis teóricos (Kinney & Barenberg, 1978), que permitieron la inclusión de un efecto de membrana tensionada en los procedimientos de diseño.

A principios de la década de los 80's, se incorporó a los modelos analíticos el concepto de geometría del geotextil deformado, con el fin de analizar y predecir de los ahuellamientos en vías no pavimentadas reforzadas con geosintéticos. Los estudios realizados por Barenberg (1980), Raumann (1982) y Giroud & Bonaperte (1984), consistieron en asumir la curvatura de los geosintéticos de refuerzo deformados por las cargas en superficie, considerando el refuerzo en el valor del ángulo de decremento del esfuerzo en profundidad. La limitación de los estudios está en que cada uno de estos incorpora datos empíricos para materiales particulares.

Estudios similares orientados a valorar el comportamiento de modelos de pavimentos reforzados con geosintéticos (Sellmeijer et al. 1982), derivaron un análisis basado en la teoría de la membrana estructural, solución que satisface el equilibrio tanto de la membrana como el de la subrasante. Consideró que la deformación del geosintético no debería asumirse arbitrariamente, y que estaba relacionado con el equilibrio del refuerzo con el suelo subyacente.

Haliburton & Barron (1983) proponen un método de diseño que ignora la resistencia de la malla y se enfoca en deducir la localización más adecuada que proporciona la máxima restricción lateral. La deducción fue desarrollada a partir de ensayos de placa de carga sobre materiales granulares reforzados con Geomallas, evaluados sobre dos tipos de subrasantes, una compuesta de materiales friccionantes y otra por materiales cohesivos.

Años después, se reconoce la necesidad de continuar las investigaciones en el diseño de refuerzos con geosintéticos para las vías no pavimentadas. Tingle & Webster (2002), presentan a través del US Corps of Engineers, un método de diseño de pavimento para vías pavimentadas y no pavimentadas, como parte de la continuación del estudio realizado por US Forest Service. El método propuesto está basado en los resultados de datos empíricos producto de modelos de campo, combinado con la metodología de diseño presentada por Steward et al (1977).

Giroud & Han (2004) presentaron una teoría que combina la capacidad de soporte teórica con datos experimentales de modelos a escala de bases granulares reforzadas con Geomallas específicas, Tensar BX1100 y BX1200. Posteriormente presentaron una calibración del diseño en la que incluyeron factores de ajuste propios de los modelos particulares utilizados para deducir las ecuaciones de diseño.

Con la amplia oferta de geosintéticos en el mercado mundial durante las últimas décadas, se han desarrollado numerosos estudios experimentales, orientados a profundizar en el conocimiento del comportamiento de los geosintéticos como elemento de refuerzo en subrasantes para vías no pavimentadas. Las investigaciones adelantadas en los últimos años, pueden clasificarse según el fenómeno estudiado (Rudolf et al., 2005), a saber: a) los estudios tendientes a evaluar la facilidad de compactación de las capas granulares (Blaise y Ucciardo, 2000), b) los que evalúan el aumento en la capacidad de soporte de pavimentos reforzados (Floss & Gold, 1994; Huntington & Ksaibati, 2000; Meyer & Elias, 1999), c) los que tienden a demostrar el aumento en la vida útil en la estructura reforzada

(Cancelli & Montanelli, 1999; Collin et al., 1996; Jenner & Paul, 2000; Watts et al., 2004), d) los estudios que evalúan la reducción del espesor de la capa granular (Bloise & Ucciardo, 2000; Cancelli & Montanelli, 1999; Huntington & Ksaibati, 2000; Jenner & Paul, 2000; Martin, 1988; Miura et al., 1990), e) aquellos que determinan la reducción de las deformaciones permanentes (Chan et al., 1989; Jenner & Paul, 2000), y estudios orientados a medir la reducción en el ahuellamiento en superficie (Cancelli & Montanelli, 1999; Knapton & Austin, 1996; Meyer & Elias, 1999).

## 2. METODOLOGÍA

Para la investigación se inició, con la caracterización de los diferentes materiales a utilizar dentro del montaje de los modelos a ensayar; para esto se realizaron pruebas a los diferentes materiales, buscando encontrar los valores de densidad, humedad y CBR necesarios para la subrasante y material tipo Afirmado, para así tener las mismas características de material en cada uno de los modelos realizados. Se realizaron pruebas de tensión, medición de aberturas y costillas de las Geomallas a utilizar como elementos de refuerzo. También se realizó el proceso de calibración de las diferentes celdas de presión, con el fin de poder realizar la conversión de las unidades con las que dichas celdas entregan los datos, a valores de variación de presión, cuyo dato será el utilizado dentro de los análisis de los resultados de las diferentes pruebas.

### 2.1. Materiales a utilizar

El material utilizado como Afirmado para la presente investigación, fue obtenido de la cantera Fanny Tequia & CIA S.A.S, ubicada en la zona rural de Soacha cuya ubicación se muestra en la Imagen 1. (Identificado como A-38), aprobada por el IDU (Instituto de Desarrollo Urbano), donde el material de excavación pertenece a una formación de areniscas jóvenes del anticlinal de Soacha, de la formación Chipaque.

Por otra parte el material de subrasante fue conseguido en la zona de Mosquera, cuya ubicación se muestra en la Imagen 1. (Identificado como MH), donde se estaban realizando trabajos de excavación para la construcción de una cimentación. De esta zona se seleccionó el material que no presentaba contaminación con desperdicios o desechos de construcción.

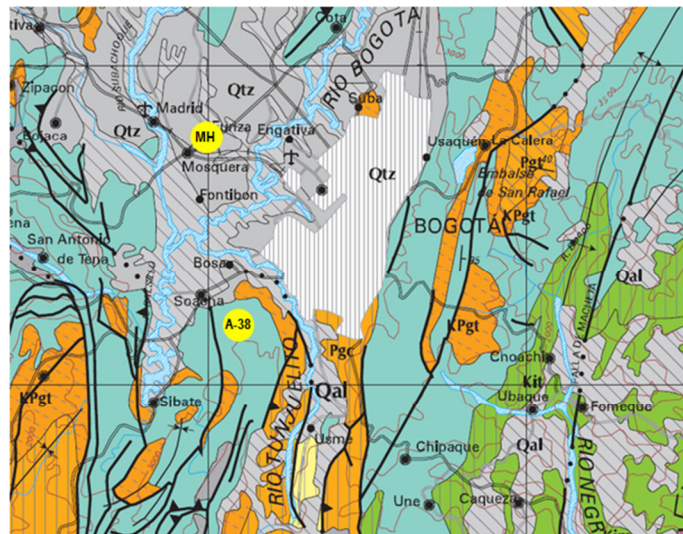


Imagen 1 Ubicación fuentes de materiales

Fuente: Servicio Geológico Colombiano

Las Geomallas utilizadas como elemento de refuerzo, fueron suministradas como apoyo al trabajo investigativo, por la empresa Mexichem Colombia S.A.S. por medio de su

división de Geosistemas Pavco. Estas Geomallas a utilizar son biaxiales, de configuración cuadrada, con fabricación coextruida en Polipropileno.

Las celdas a utilizar como elementos de medición, ubicadas entre la subrasante y el Afirmado, fueron suministradas por el laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana, al igual que la caja de adquisición de datos y el computador con el software de interpretación.

Las estructuras a ensayar fueron montadas en el molde metálico disponible en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil; el cual tiene una altura de 0,8m y un diámetro de 0,5m



Imagen 2 Molde de prueba

## 2.2. Afirmado

Se seleccionó, como material granular, Afirmado tipo INVIAS (INVIAS 2013), el cual es un material de condiciones de comportamiento mecánico bajo debido a que sus solicitaciones no presentan grandes parámetros de resistencia y tiene un desgaste alto, adicionalmente, es un material predominante dentro de la conformación de estructuras de vías en condición no pavimentada.

Al material granular tipo afirmado se le realizaron pruebas de granulometría, desgaste en máquina de los ángeles, CBR y límites de Atterberg y dichos resultados fueron comparados con la especificación (INVIAS 2013), buscando que se ajusten a los valores entregados como referencia por la norma.

Los materiales a utilizar deberán cumplir con los parámetros entregados por la norma en la Tabla 2 y Tabla 3, que se muestran a continuación

| CARACTERÍSTICA  | NORMA DE ENSAYO INV | REQUISITO |
|---|---------------------|-----------|
| Dureza (O)  |                     |           |
| Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A) máximo (%)<br>-500 revoluciones | E-218-13            | 50        |
| Durabilidad (O)   |                     |           |
| Perdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%)<br>- Sulfato de sodio         | E-220-13            | 12        |

|   |                    |             |
|---|--------------------|-------------|
| - Sulfato de Magnesio   |                    | 18          |
| <b>Limpieza (F)</b>   |                    |             |
| Limite líquido, máximo (%)  | E-125-13           | 40          |
| Índice de plasticidad (%)   | E-125-13; E-126-13 | 4 - 9       |
| Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%)  | E.211              | 2           |
| Contracción lineal  | E-127 o E-129      | Tabla 311-3 |
| <b>Resistencia del material (F)</b>   |                    |             |
| CBR (%): porcentaje asociado al grado de compactación mínimo especificado (numeral 311.5.2.2.2); el CBR se medirá sobre muestras sometidas previamente a cuatro días en inmersión | E-148              | ≥15         |

**Tabla 2 Tabla 311-1 Requisitos de los agregados para afirmados**

| TIPO DE GRADACIÓN   | TAMIZ (mm / U.S. Estándar) |            |              |             |              |              |                |                 |
|---|----------------------------|------------|--------------|-------------|--------------|--------------|----------------|-----------------|
|   | 37,5<br>1 1/2"             | 25,0<br>1" | 19,0<br>3/4" | 9,5<br>3/8" | 4,75<br>No.4 | 2,0<br>No.10 | 0,425<br>No.40 | 0,075<br>No.200 |
|   | %PASA                      |            |              |             |              |              |                |                 |
| A-38  | 100                        | -          | 80-100       | 60-85       | 40-65        | 30-50        | 13-30          | 9-18            |
| A-25  | -                          | 100        | 90-100       | 65-90       | 45-70        | 35-55        | 15-35          | 10-20           |
| Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±) | 0%                         | 7%         |              | 6%          |              |              | 3%             |                 |

**Tabla 3 Tabla 311-2 Franjas granulométricas del material de Afirmado**

Posterior a la realización de los diferentes ensayos y cálculo de las relaciones entre sus granulometrías, se procedió a la realización de ensayos proctor modificado bajo la norma INV E142-13, con lo cual se buscó encontrar humedad y densidad óptima. Para esto se realizaron diferentes montes con diferentes energías de compactación y diferentes humedades buscando crear la curva que permitiera obtener el valor óptimo del material tipo Afirmado. Una vez obtenido este valor se realizaron pruebas para determinar el CBR del material, y poder determinar las características que se estaban teniendo en la condición óptima de densidad. Este valor obtenido el CBR fue utilizado como parámetro inicial y de referencia para los modelos bicapa utilizados durante la fase experimental.

### 2.3. Subrasante

Dentro del programa de caracterización, se contempló evaluar ciertas características esenciales para considerar dentro del modelo, algunas de tipo físico y otras de tipo mecánico. A continuación se listan los ensayos proyectados para la caracterización:

- Límites de Atterberg, según las normas INVIAS E-125-13 y E-126-13.
- Humedad natural, según la norma INVIAS E-122-13
- Clasificación SUCS, según la norma INVIAS E-181-13
- Relación de soporte de California CBR., según la norma INVIAS E-148

En el ensayo de CBR, se determinó la energía de compactación necesaria para obtener un valor inferior a 3% de CBR. Condición que se replicó en los modelos bicapa evaluados.

Los anteriores ensayos de caracterización corresponden a los parámetros esenciales y básicos que relacionan con los fenómenos de interés en la investigación. Se han

marginado los ensayos de caracterización de propiedades que no son considerados dentro de los fenómenos a evaluar, como consolidación, ángulo de fricción interna, resistencia cohesiva, entre otros.

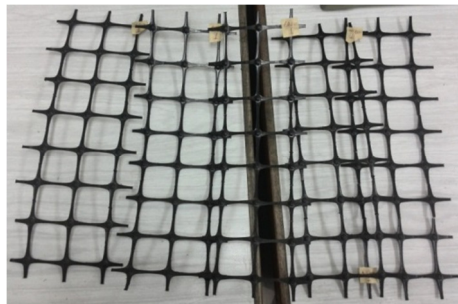
Dado que la presente investigación pretende evaluar el mejoramiento de una capa de Afirmado reforzada con Geomalla biaxial coextruida sobre una subrasante blanda, no se tuvo en cuenta el efecto de saturación del material de subrasante puesto que los efectos de saturación de este material deberán ser parte de otro análisis e investigación que podrá ser continuación del presente trabajo.

Para realizar un análisis de los efectos de saturación en los materiales de las subrasantes presentes en las vías conformadas por estructura bicapa, se hace necesario un estudio adicional de las condiciones de subdrenaje de las vías, efectos de las lluvias de alta intensidad y corta duración, que se considera la condición más desfavorable para este tipo de estructuras debido a las dificultades de infiltración y efectos de la saturación de este tipo de materiales sobre la distribución de cargas.

#### **2.4. Geomalla biaxial coextruida**

Resulta fundamental, dentro del desarrollo de la presente investigación, realizar una caracterización de las propiedades de las Geomallas que fueron utilizadas como elementos de reforzamiento del material tipo Afirmado. Por lo tanto se procederá a medir la resistencia de cada una de las mallas a diferentes niveles de deformación, 2%, 5% y falla. Estas pruebas se deberán realizar en diferentes sentidos de la malla; por esto las pruebas se realizaran en los dos sentidos ortogonales de las mallas. Las pruebas de ensayos se realizaran basadas en los procedimientos establecidos en la norma ASTM D 6637 (Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Geogrids by the Single or Multi-Rib Tensile Method). Dentro de las propiedades físicas de las Geomallas a utilizar,

Adicionalmente se determinó la geometría de la malla mediante la medición del ancho y altura de las costillas además del tamaño de la apertura, como se muestra en la Imagen 3.



**Imagen 3 Muestras de Geomalla probadas a tensión**

## 2.5. Celdas de carga

Se utilizaron celdas de presión, las cuales se debieron verificar de acuerdo a una metodología: que consistió en la creación de curvas de carga y descarga, para así obtener las ecuaciones de correlación entre la presión medida por la celda y la respuesta entregada al computador, este proceso se realizó debido a que estas fueron fabricadas por el departamento de Ingeniería Electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana, por lo que no existía información de calibración.

A cada celda se le realizó el mismo procedimiento aplicando incrementos de carga cada 100 kPa, en un rango entre 0 y 400 kPa. Este procedimiento se hizo en dos ocasiones consecutivas para obtener una correcta correlación entre las presiones de las mediciones entregadas.

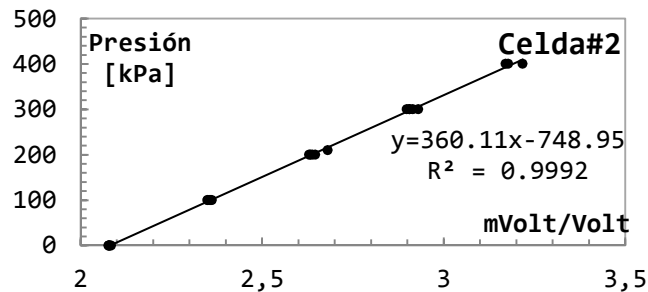


Gráfico 1 Calibración celda 2

## 2.6. Verificación de efecto de borde

Con el objetivo de verificar el efecto que tiene la dimensión de la cámara o molde de ensayo con respecto al comportamiento del modelo frente a las cargas aplicadas, se procedió a realizar un montaje de un modelo compuesto por 0,60 m de material de subrasante y 0,20 m de material de afirmado, dentro del molde de 0,50 m de diámetro y 0,80 m de altura, sometidos a una carga estática por medio del actuador marca MTS, que permitió someter el modelo a una presión de 0,56 MPa, valor correspondiente a la presión de contacto entre una llanta de un eje equivalente a 8.2 toneladas. El modelo se instrumentó con celdas de presión distribuidas según la Imagen 4.



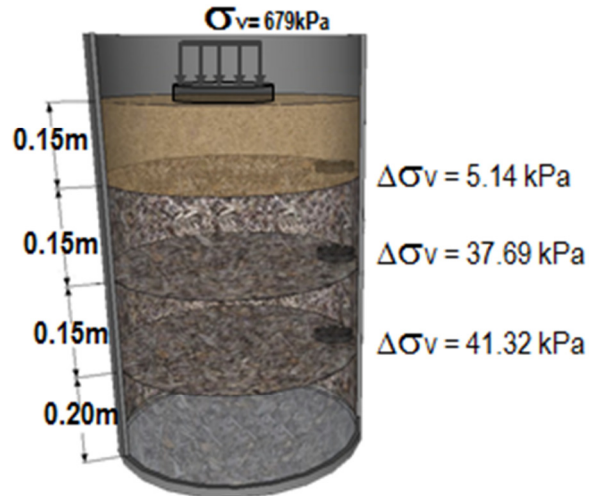


Imagen 4 Modelo condiciones de borde

## 2.7. Modelos de ensayo

Para realizar la parte experimental, se realizaron nueve (9) modelos diferentes, los cuales tendrían una configuración igual de espesor de subrasante, conformada por 0,50 m cada una. Sobre esta subrasante, se colocaron tres (3) diferentes espesores de material tipo Afirmado. Los espesores utilizados en los modelos correspondieron a 0,10 m, 0,15 m y 0,20 m. Para cada uno de estos espesores se utilizaron sistema sin refuerzo con Geomalla, refuerzo con Geomalla tipo uno y refuerzo con Geomalla tipo dos, tal como se muestra en la Imagen 5. Adicionalmente se muestra el código utilizado para la identificación de los resultados de cada uno de los modelos.



Imagen 5 Plan y configuración de ensayos

La conformación del espesor de capa de subrasante, fue construida con capas de un espesor promedio de 0,05 m cada una, en la cual, el control de la densidad fue realizado en la masa y volumen compactado dentro del molde de ensayo; este procedimiento fue realizado hasta completar el espesor requerido de 0,50 m de altura.

Posterior a la conformación de la subrasante, se realizó la colocación de las celdas de carga, las cuales fueron instaladas realizando una pequeña excavación y llenando la base con arena, buscando una superficie firme que permitiera tener lecturas correctas durante todo el ensayo. Las celdas fueron colocadas en el centro y a diferentes distancias desde el centro del molde, tal y como se muestra en la Imagen 6.



**Imagen 6 Configuración de ubicación de celdas de carga.**

Posterior a la colocación de las celdas, se realizó el mismo procedimiento para la subrasante, con el material tipo Afirmado, conformando esta capa en espesores de 0,05 m hasta completar el espesor total.

Después de conforma la estructura bicapa, se procedió a colocar el molde sobre el marco que sostiene la MTS, como se muestra en la Imagen 7.



**Imagen 7 Molde sobre marco de MTS**

A cada estructura, se le realizó un procedimiento de carga que consistió en un aumento de la carga desde 0kN hasta un valor de 12kN, este proceso se realizó durante un (1) minuto, posteriormente se sostuvo la carga estática de 12 kN, durante un minuto, concluido este tiempo se desmontaba todo el modelo, y se conformaba de la misma manera que el procedimiento anteriormente explicado; posterior al montaje de las capas de material se iniciaba la etapa 2, consistente en aplicar 150.000 ciclos, con una carga de 12 kN, con una frecuencia de 2,5 Hz. En la Imagen 8 se muestran las cargas aplicadas en las diferentes etapas de las pruebas.

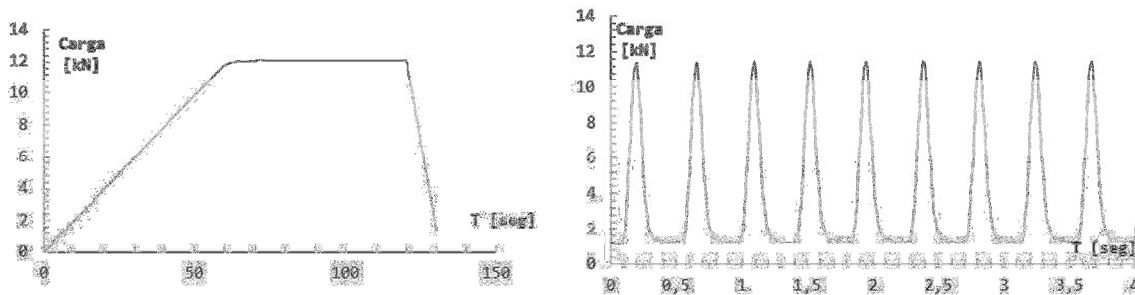


Imagen 8 Fases del procedimiento de carga.

Esta velocidad y frecuencia de carga, fue seleccionada debido al tipo de vías sobre el cual se están realizando las modelaciones, donde las velocidades de flujo son bajas, variables entre 20km/h y 40km/h. Para la selección de la frecuencia, se utilizó el artículo (Rondon, Reyes y Urazan, Efecto de la disminución de la velocidad vehicular en la durabilidad de una capa asfáltica 2013), donde se muestra la Tabla 10, donde se muestra la velocidad de transito de un vehículo en km/h y se relaciona con frecuencias de aplicación de carga, del cual se definió que la carga seria aplicada con la frecuencia mencionada anteriormente.

| V [km/h] | $t_c$ [s] | F [Hz]  | E [Mpa]  | $e_{max}$ [-] | $N_f$ [-] |
|----------|-----------|---------|----------|---------------|-----------|
| 0,001    | 1.184,2   | 0,00013 | 3.611,9  | 0,000212      | 1.052     |
| 5        | 0,237     | 0,67    | 4.058,51 | 0,000187      | 1.485     |
| 10       | 0,118     | 1,34    | 4.301,51 | 0,000174      | 1.764     |
| 15       | 0,079     | 2,02    | 4.510,19 | 0,000165      | 2.030     |
| 20       | 0,059     | 2,69    | 4.701,10 | 0,000157      | 2.295     |
| 25       | 0,047     | 3,36    | 4.880,65 | 0,000151      | 2.564     |
| 30       | 0,039     | 4,03    | 5.052,14 | 0,000145      | 2.840     |
| 50       | 0,024     | 6,72    | 5.687,91 | 0,000127      | 4.034     |
| 60       | 0,020     | 8,06    | 5.986,36 | 0,000121      | 4.693     |
| 70       | 0,017     | 9,41    | 6.276,17 | 0,000114      | 5.398     |

Tabla 4 Evolución de  $N_f$  con la velocidad de circulación del vehículo V para  $\sigma=662$  kPa

Este procedimiento de carga se realizó, buscando reproducir el paso de vehículos a baja velocidad, representando la condición general de tráfico sobre vías terciarias. De estas pruebas, se tomaron los datos de deformación entregados por la MTS (Imagen 10), que

nos permite conocer el ahuellamiento de la estructura con el paso del número de repeticiones y los valores de carga en cada una de las celdas (Imagen 9), para poder determinar la variación que se presenta para el modelo sin refuerzo y los modelos reforzados, buscando encontrar diferencias entre los valores, para inferir las diferencias de dispersión de los esfuerzos dentro de la estructura.

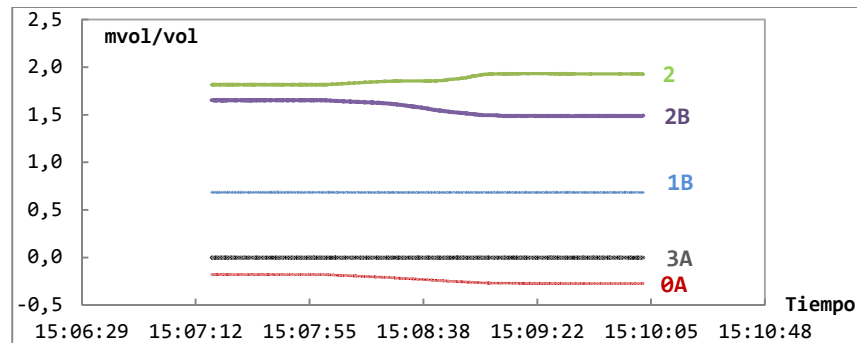


Imagen 9 Lecturas de las celdas durante el inicio de las pruebas.

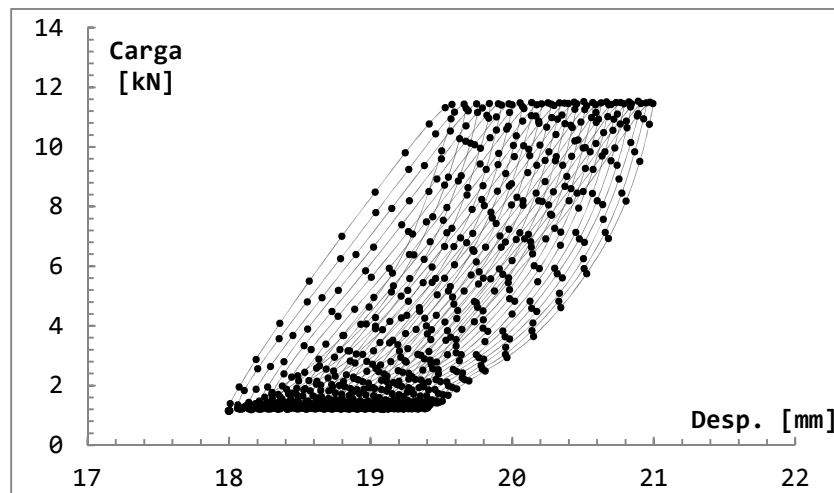


Imagen 10 Datos de deformación obtenidos de la MTS

Estos datos fueron analizados, buscando obtener relaciones entre el número de repeticiones, espesores de la capa de Afirmado y condición de refuerzo, para establecer valores de módulo y predicciones de comportamiento para las diferentes configuraciones estudiadas.

Es importante mencionar que después de la aplicación de los ciclos de carga de cada estructura, se realizaba el desmonte de todo el espesor de Afirmado y de subrasante, con el fin de evitar la consolidación de la subrasante y variación del valor de CBR de la misma al inicio de los ciclos de carga; puesto que esta variación no permitiría realizar la comparación entre los diferentes modelos realizados.

### 3. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Posterior a la recopilación de datos realizados en la fase experimental a los materiales de subrasante y de Afirmado, se obtuvieron los siguientes resultados.

#### 3.1. Clasificación de la Subrasante

Debido a que la subrasante presenta una granulometría fina, se realizó la granulometría por hidrómetro, para determinar el porcentaje de limos y el porcentaje de arcillas presente en el material. De este análisis se obtuvo que el material a utilizar como subrasante durante la presente investigación presenta un 55% de material tamaño limo (superior a 0,02mm) y un 45% de material tamaño arcilla, como se muestra en el Gráfico 2.

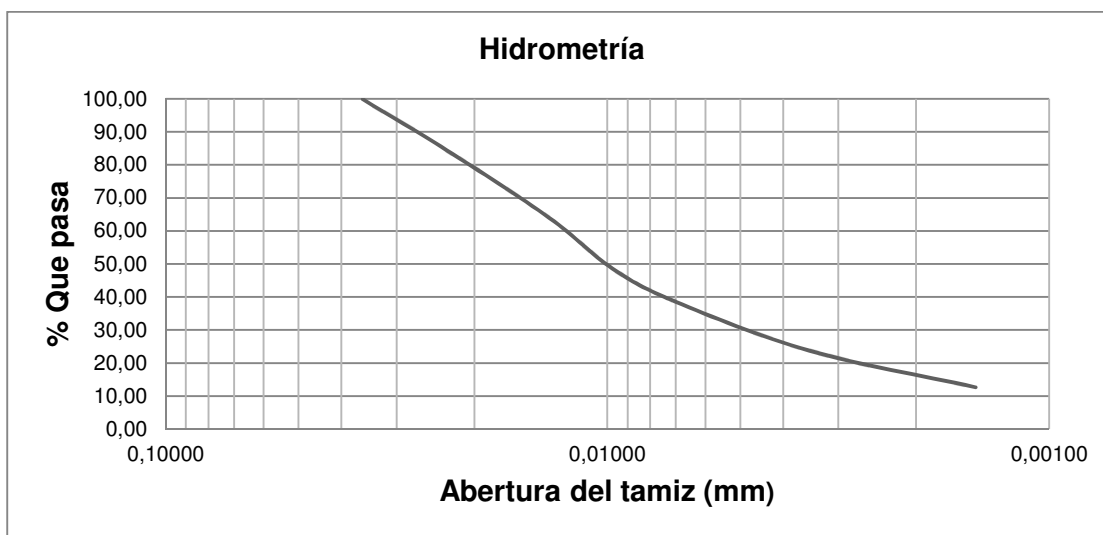


Gráfico 2 Curva de granulometría por hidrometría para material de subrasante.

También se realizaron pruebas para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, de los cuales se obtuvieron los resultados de la Tabla 5.

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| Límite Líquido        | 88% |
| Límite plástico       | 49% |
| Índice de Plasticidad | 39% |

Tabla 5 Valores límites de Atterberg subrasante

Estos resultados muestran una plasticidad media, por lo que durante el proceso de compactación deberá tenerse especial cuidado para evitar acolchonamientos, o sectores con bajos niveles de compactación.

De manera complementaria se adelantó el ensayo de gravedad específica de sólidos, por medio del procedimiento de laboratorio establecido en la norma INV-128-13, obteniendo un valor de 2.499. El registro de resultados de laboratorio se encuentra en los Anexos

Posteriormente se realizó la prueba de azul de metileno, con el fin de determinar la actividad y sensibilidad del material a variaciones de su humedad, de esta prueba se obtuvo lo mostrado en el Gráfico 3.

De esta prueba se observa que el material es un limo de actividad media, por lo que durante la fase experimental se deberán tener especiales cuidados para evitar grandes cambios de humedad, debido a la susceptibilidad que presenta el material ante este valor.

Debido al tamaño del molde a utilizar, y a la altura que se llenara con material de subrasante, se deberá tener especial cuidado, para mantener homogénea la humedad de todo el material a utilizar, y evitar diferencias de humedad entre sectores del molde, puesto que esto afectaría el comportamiento y resultados de los diferentes montajes.

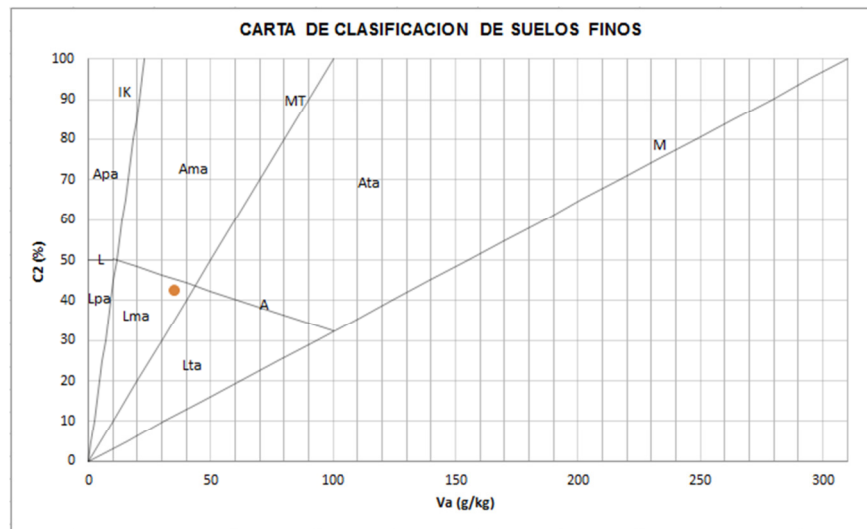


Gráfico 3 Actividad del material a partir de la prueba de azul de metileno

Complementariamente a los límites líquido y plástico, se evaluó en laboratorio el límite de contracción, siguiendo las recomendaciones de la norma INV-127-13. Los resultados se muestran en la Tabla 6.

| Descripción                                  | Unidad          | Ensayos |        |
|--|-----------------|---------|--------|
|  |                 | 1       | 2      |
| Peso recipiente + mercurio $M_{Hg+rec}$      | g               | 787.43  | 768.77 |
| Peso de mercurio desplazado                  | g               | 713.15  | 711.76 |
| Peso del mercurio en el recipiente           | g               | 173.75  | 172.23 |
| Peso del recipiente $M_T$                    | g               | 34.79   | 33.89  |
| Peso del mercurio                            | g               | 138.96  | 136.79 |
| Volumen de mercurio contenido $V$            | cm <sup>3</sup> | 9.51    | 9.38   |
| Peso de la muestra húmeda + recipiente $M_W$ | g               | 63.74   | 62.84  |
| Peso de la muestra seca + recipiente $M_D$   | g               | 56.76   | 55.86  |
| Masa húmeda de la muestra $M$                | g               | 28.95   | 28.95  |
| Peso de la muestra seca $M_0$                | g               | 21.97   | 21.97  |
| Humedad de la muestra $w$                    | %               | 31.77   | 31.77  |
| Volumen de la muestra seca $V_0$             | cm <sup>3</sup> | 5.48    | 5.35   |

|                         |                |   |       |       |
|-------------------------|----------------|---|-------|-------|
| Límite de contracción   | LC             | % | 13.43 | 13.43 |
| Relación de contracción | R              | - | 4.01  | 4.11  |
| Humedad superior al LC  | w <sub>1</sub> | % | 15.00 | 15.00 |
| Cambio volumétrico      | CV             | % | 6.30  | 6.46  |
| Contracción lineal      | CL             | % | -2.19 | -2.25 |

Tabla 6 Resultados de Limite de contracción

En lo referente a la caracterización mecánica de la subrasante, se procedió a evaluar el comportamiento del peso unitario seco con la variación de valores de humedad comprendidos entre 40% y 60%. A partir de la curva de densidad, se obtuvo que la humedad óptima con la que se obtiene la mayor relación peso/volumen es de 53% como se observa en el Gráfico 4.

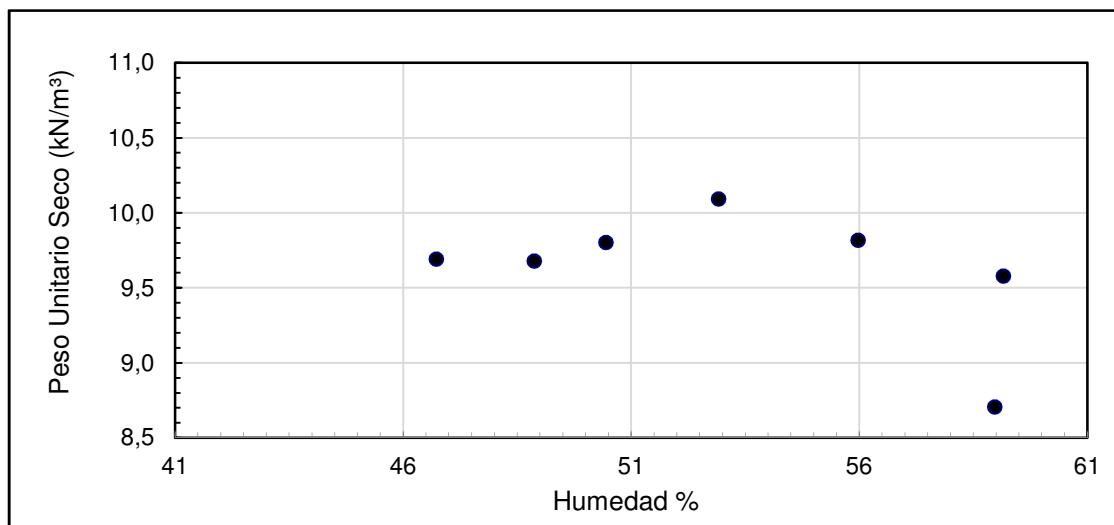


Gráfico 4 Curva de compactación Proctor para el material de Subrasante

Posteriormente se determinó el valor de densidad que proporciona un CBR de 3%, tal y como lo requiere el modelo propuesto para simular las subrasantes blandas. Para hallar el valor de densidad correcto, se adelantó el ensayo de CBR en laboratorio siguiendo el procedimiento establecido en la norma INV-148-13, y los resultados se resumen en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde se puede observar que los valores de densidad cercanos a 6.5 kN/m<sup>3</sup> pueden proporcionar un CBR deseado de 3%, con una humedad de 53%. Este ensayo resultaba fundamental dentro del proceso de montaje de los modelos, puesto que con sus resultados se encontró el valor de peso de material de subrasante, necesario en cada una de las capas para conservar la condición blanda de fundación necesaria para los modelos.

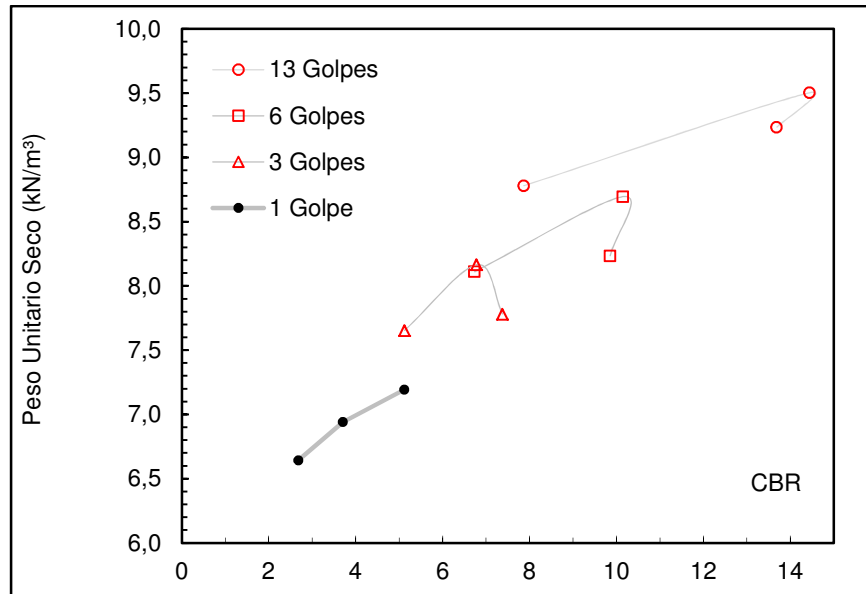


Gráfico 5 Ensayo de CBR de la Subrasante

Como resumen, se presenta en la Tabla 7, los datos de la caracterización del material utilizado como subrasante. Cabe destacar que si bien propiedades índice y de estado relacionadas con el contenido de humedad (i.e. Azul de metileno, Limite de contracción y Limites de Atterberg) se mantuvieron constantes a lo largo de la ejecución de ensayos en los modelos de pavimento, dado que no se alteraron las mediciones de humedad de las muestras, por lo tanto estos valores corresponden a valores secundarios de caracterización.

|                                    |        |                   |
|------------------------------------|--------|-------------------|
| Contenido de arcillas              | 19     | %                 |
| Contenido de Limos                 | 81     | %                 |
| Límite Líquido                     | 88     | %                 |
| Índice de plasticidad              | 39     | %                 |
| Límite de contracción              | 13,43  | %                 |
| Gravedad específica                | 2,4657 | -                 |
| Clasificación SUCS                 | MH     | -                 |
| Clasificación AASHTO               | A 7-6  | -                 |
| Azul de metileno                   | 35     | g/kg              |
| Nivel de Actividad                 | Lma    |                   |
| Superficie específica              | 124,4  | m <sup>2</sup> /g |
| Saturación                         | 50,3   | %                 |
| Porosidad                          | 72,7   | %                 |
| Relación de vacíos                 | 2,66   | -                 |
| Densidad de compactación en modelo | 10,67  | kN/m <sup>3</sup> |
| Humedad de compactación en modelo  | 53     | %                 |
| CBR en modelo                      | 3      | %                 |

Tabla 7 Resumen de resultados de caracterización de la Subrasante



### 3.2. Clasificación del Afirmado

Para el material de Afirmado, a diferencia del material de subrasante, se tienen valores de referencia y pruebas a realizar, para comprobar su clasificación respecto a la norma INVIAS (INVIAS 2013).

Se iniciaron las pruebas al material, con la granulometría; para este material, la norma presenta unos valores máximos y mínimos, entre los cuales se debe tener el material a utilizar, los resultados promedio de las diferentes granulometrías realizadas al material se muestran en el Gráfico 6.

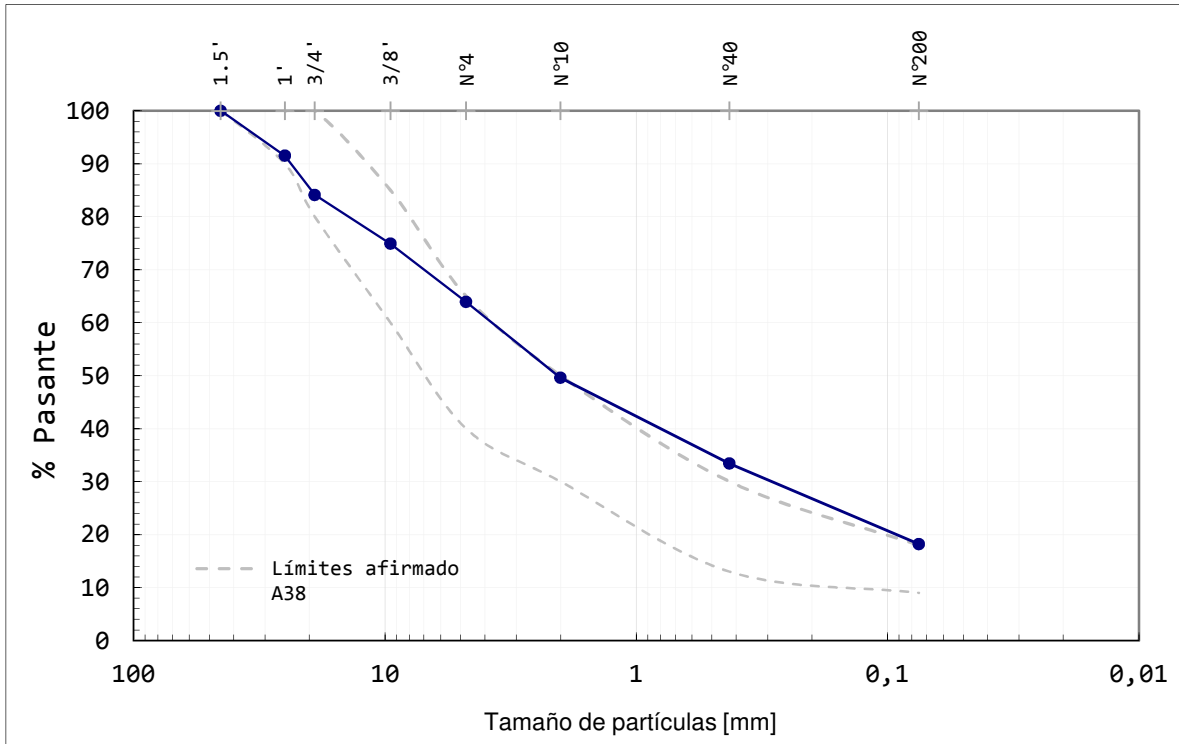


Gráfico 6 Granulometría promedio del material de Afirmado

De estos resultados se observa que desde la zona de arena fina en adelante, la granulometría se encuentra por encima del valor máximo para el Afirmado tipo A38, Este mejor ajuste presentaba a la granulometría encontrada.

A pesar de estar por encima del límite superior, se optó por continuar con su utilización, debido a que la parte que presentaba desajuste era la fracción fina, fracción que debido al tipo de molde y tipo de prueba a realizar, no presentaría afectaciones importantes en los resultados.

Posteriormente se realizó el ensayo de Proctor modificado, para determinar la densidad y humedad óptima del material tipo afirmado, tal y como se observa en el Gráfico 7. De estas pruebas se obtuvo que con una humedad de 8,2% se obtuvo la mayor densidad del material, con un valor de 20,35kN/m<sup>3</sup>.

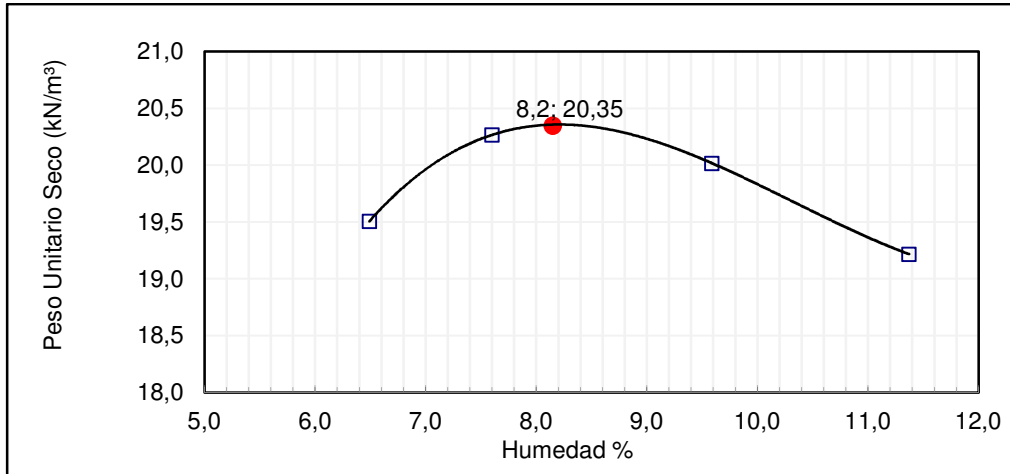


Gráfico 7 Curva de compactación para el Afirmado A-38

El valor requerido para representar el modelo de la estructura de pavimento demanda disponer una capa de Afirmado con una resistencia equivalente a 30 CBR. Para tal fin, se adelantó el ensayo de CBR en laboratorio, con el cual se establece la densidad que proporciona el CBR deseado. Del Gráfico 8, se determina que la densidad con la cual se debe disponer la capa de afirmado es de 18,45 kN/m<sup>3</sup>.

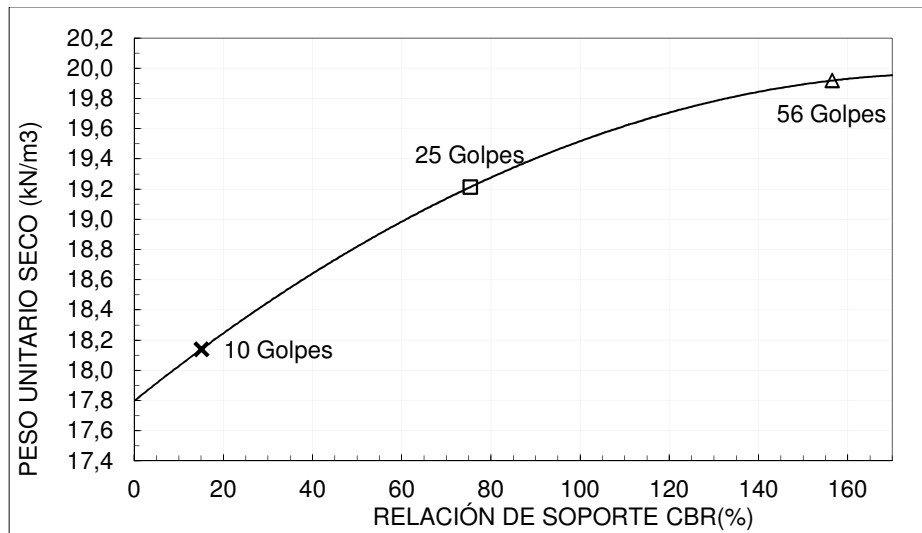


Gráfico 8 Ensayo de CBR para el Afirmado A-38

Posteriormente se realizaron los límites de Atterberg, obteniendo los siguientes valores:

|                       |      |
|-----------------------|------|
| Límite Líquido        | 18,6 |
| Límite plástico       | 11,4 |
| Índice de Plasticidad | 7,2  |

Tabla 8 Valores límites de Atterberg Afirmado

Estos valores son adecuados y cumplen con la especificación del material, cuyos valores de referencia son 40 como valor máximo del límite líquido y un valor entre 4 y 9 para el índice de plasticidad.

La especificación, también entrega valor máximo para partículas deleznable del material, dando como límite 2%; este valor se determina para obtener una referencia sobre el deterioro del material ante niveles de humedad altos, debido a daños o deficiencia en el drenaje.

Para realizar este ensayo, se tiene en cuenta la granulometría, para realizar un promedio ponderado entre la fracción gruesa y la fracción fina de las partículas analizadas.

| TERRONES DE ARCILLAS Y PARTICULAS DELEZNABLES - TAPD - (INV E -211) |                 |                     |               |          |
|---|-----------------|---------------------|---------------|----------|
| TAMIZ ("/No)  | MASA INICIAL, g | TAMIZ LAVADO ("/No) | MASA FINAL, g | TA&PD, % |
| 1-1/2" - 3/4"   | 3144,9          | No 4                | 3097,2        | 1,52%    |
| 3/4" - 3/8"   | 2109,9          | No 4                | 2021,3        | 4,20%    |
| 3/8" - No 4   | 1021,2          | No 8                | 987,8         | 3,27%    |
| No 4 - No 16  | 102,0           | No 20               | 99,8          | 2,16%    |
| TERRONES DE ARCILLA Y PARTICULAS DELEZNABLES DEL AGREGADO GRUESO, % |                 |                     |               | 1,96%    |
| TERRONES DE ARCILLA Y PARTICULAS DELEZNABLES DEL AGREGADO FINO, %   |                 |                     |               | 2,16%    |

|       |       |
|-------|-------|
| Total | 3,99% |
|-------|-------|

**Tabla 9** Calculo de partículas deleznales

Como resumen, en la Tabla 10, se compilan los resultados de la caracterización del afirmado, con la respectiva comparación respecto a las exigencias en el artículo INV-311-13. De dicha comparación debe resaltar que las propiedades físicas relacionadas con Granulometría, Abrasión y Partículas deleznales, sobrepasan los límites máximos permitidos por la especificación. Aun así, es posible alcanzar un valor de resistencia equivalente a 30 CBR, necesario para modelar la estructura de pavimento propuesta.

| INV.311.13                   |       |    |       |
|------------------------------|-------|----|-------|
| Gravas                       | 36.1  | %  |       |
| Arenas                       | 45.7  | %  |       |
| Pasa T200                    | 18.2  | %  | 20    |
| Tamaño máximo                | 38    | mm | 38    |
| D60                          | 3.75  | mm | 3-10  |
| D30                          | 0,29  | mm | 0,4-2 |
| D10                          | 0,08  | mm |       |
| Coficiente de uniformidad Cu | 50    | -  |       |
| Coficiente de curvatura Cc   | 0,3   | -  |       |
| Límite líquido               | 18,6  | %  | <40%  |
| Límite Plástico              | 11,4  | %  |       |
| Índice de Plasticidad        | 7,2   | %  | <9%   |
| Clasificación SUCS           | SC    | -  |       |
| Clasificación AASHTO         | A-2-4 | -  |       |

|                                       |       |                   |      |
|---------------------------------------|-------|-------------------|------|
| Desgaste en micro-deval               | 23,3  | %                 |      |
| Abrasión en Los Ángeles               | 50,6  | %                 | <50% |
| Partículas deleznales                 | 3,99  | %                 | <2   |
| Perdida por sulfato de magnesio       | 23    | %                 |      |
| Densidad óptima de compactación       | 20,35 | kN/m <sup>3</sup> |      |
| Humedad óptima de compactación        | 8,2   | %                 |      |
| Densidad de compactación en molde     | 18,45 | kN/m <sup>3</sup> |      |
| Humedad de compactación en molde      | 8,2   | %                 |      |
| Nivel de compactación (% del Proctor) | 91    | %                 |      |
| CBR en molde (91% Proctor)            | 30    | %                 | >15% |
| CBR (100% Proctor)                    | 75,36 | %                 |      |

**Tabla 10 Resumen de resultados de caracterización del Afirmado A-38**

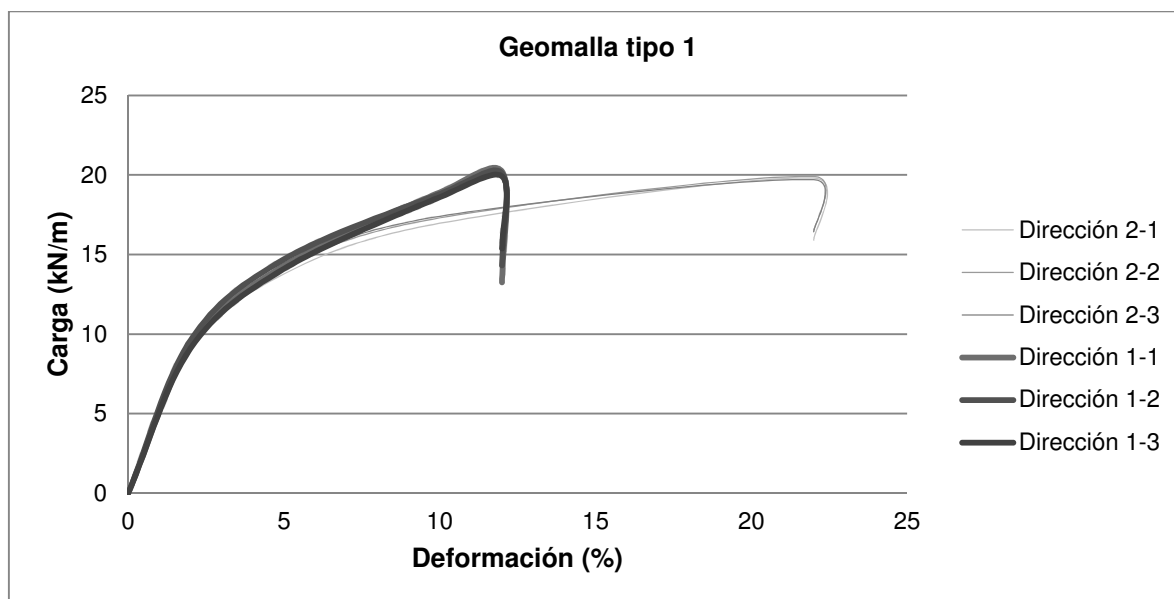
De este análisis, se obtiene que el material cumple con el límite establecido por la norma, al obtenerse un valor inferior al solicitado.

### 3.3. Caracterización de Geomallas

Posterior a las pruebas realizadas a la subrasante y al afirmado, se realizaron pruebas de caracterización de la Geomalla, para poder observar el comportamiento de las diferentes Geomallas a utilizar como elemento de refuerzo para el material tipo Afirmado.

Esta caracterización, consistió en realizar pruebas de tensión, y determinar la resistencia de cada espécimen a diferentes niveles de deformación en ambas direcciones.

Para la Geomalla tipo 1, se obtuvo que en la dirección longitudinal del rollo se tiene una resistencia de 20,0 kN/m en promedio, con una deformación máxima del 12%. Ya en la dirección transversal al rollo la resistencia máxima obtenida fue de 19,6 kN/m con una deformación máxima del 23%, como se observa en el Gráfico 9.



**Gráfico 9 Tensión deformación Geomalla tipo 1**

Para el caso de la Geomalla tipo 2, se realizó el mismo procedimiento, del cual se obtuvo que en la dirección longitudinal del rollo se tiene una resistencia de 30,6 kN/m en promedio, con una deformación máxima del 12%. Ya en la dirección transversal al rollo la resistencia máxima obtenida fue de 39,4 kN/m con una deformación máxima del 22%, como se observa en el Gráfico 10.

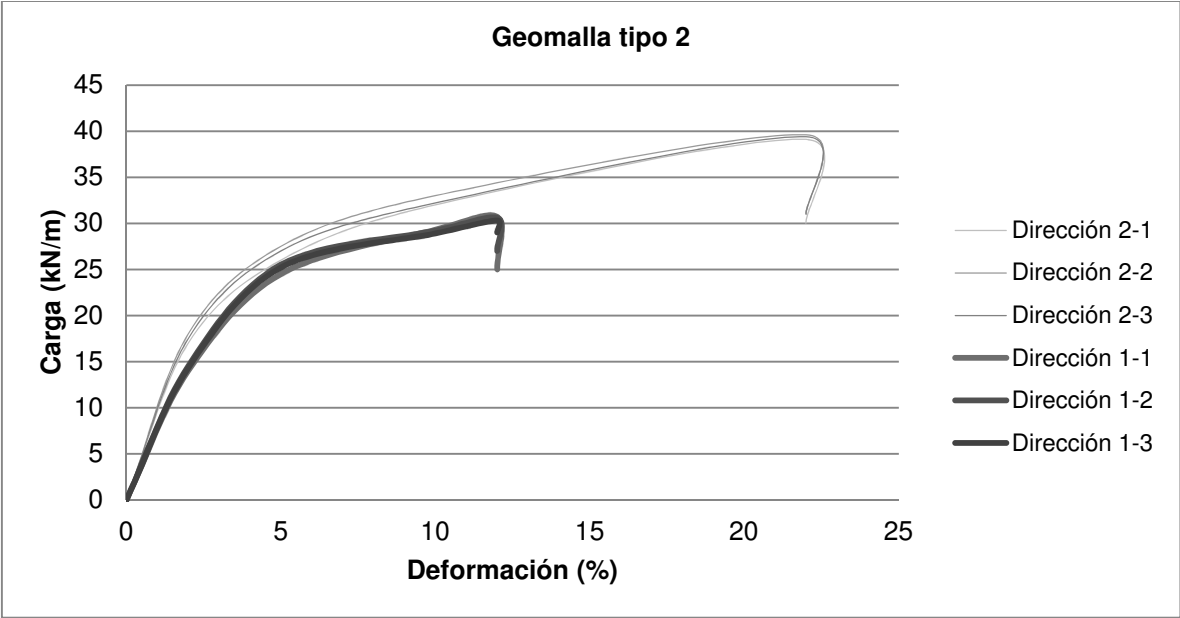


Gráfico 10 Tensión deformación Geomalla tipo 2

Posteriormente, se realizaron los cálculos y mediciones para determinar la resistencia en los nudos de cada una de las Geomallas a utilizar; de lo cual se obtuvo que la resistencia para la Geomalla tipo 1 es de 19,6 kN y para la Geomalla tipo 2 la resistencia es de 29,8 kN.

## 4. RESULTADOS DE MODELOS DE ESTRUCTURA

Posterior a las clasificaciones y mediciones realizadas a los materiales a utilizar dentro de la presente investigación, se realizaron los montajes de las diferentes estructuras a estudiar. Estos montajes se realizaron dentro de los laboratorios de la Pontificia Universidad Javeriana.

### 4.1. Repetitividad de las pruebas

De acuerdo al procedimiento mostrado en apartes anteriores del presente documento, se inició con el montaje del modelo de 0,15m de Afirmado sin refuerzo, del cual se realizaron dos (2) montajes, para comparar los resultados obtenidos y determinar la repetitividad de las pruebas; puesto que por disposición de tiempos en laboratorio y de espacio en el mismo, se debían acotar el número de pruebas y modelos para poder cumplir con los alcances establecidos dentro de la fase de planeamiento y propuesta de la investigación.

Estos dos montajes, al ser probados según las condiciones y características de la prueba, mostraron comportamiento similar, con una tendencia de comportamiento semejante, lo que permite inferir que los resultados obtenidos pueden ser repetidos, manteniendo las condiciones de los materiales, como son humedades, densidades y espesores. Al realizar la comparación entre el número de ciclos de carga y el módulo resiliente obtenido de las pruebas, se encontró que la diferencia entre ambos resultados era del 2%, como se observa en el Gráfico 11, al cabo de 150000 ciclos de carga.

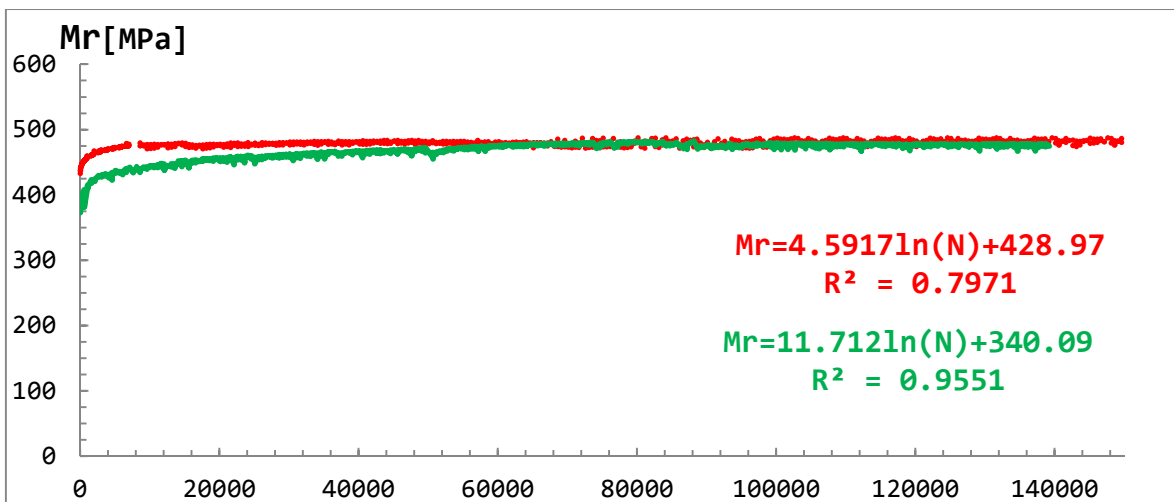


Gráfico 11 Comparación de resultado de las pruebas realizadas a 2 montajes de 15cm de material tipo Afirmado

### 4.2. Variación del ángulo de dispersión.

Una vez realizado el análisis de estos resultados, se montó un solo modelo por estructura, y a cada una de ellas se les realizó el mismo procedimiento de prueba que el utilizado.

Con el fin de determinar el efecto de dispersión de los esfuerzos, y determinar la diferencia de los mismos entre la sección sin refuerzo y las secciones reforzadas, se colocaron los sensores de presión, como se describió en el capítulo 2.7.

Estas mediciones se realizaron en la zona de rampa y carga sostenida aplicada sobre el modelo, durante un tiempo total de 2 minutos, buscando que el modelo se estabilizara y así poder recolectar los datos de manera estable. Para esto se utilizó la ecuación de calibración de cada una de las celdas. Con estas ecuaciones, se realizó la conversión de los datos obtenidos a valores de presión en la celda, los cuales se adoptaron como los valores de presión que se estaban aplicando en la subrasante, causada por la carga aplicada en la superficie, como se observa en el Gráfico 12.

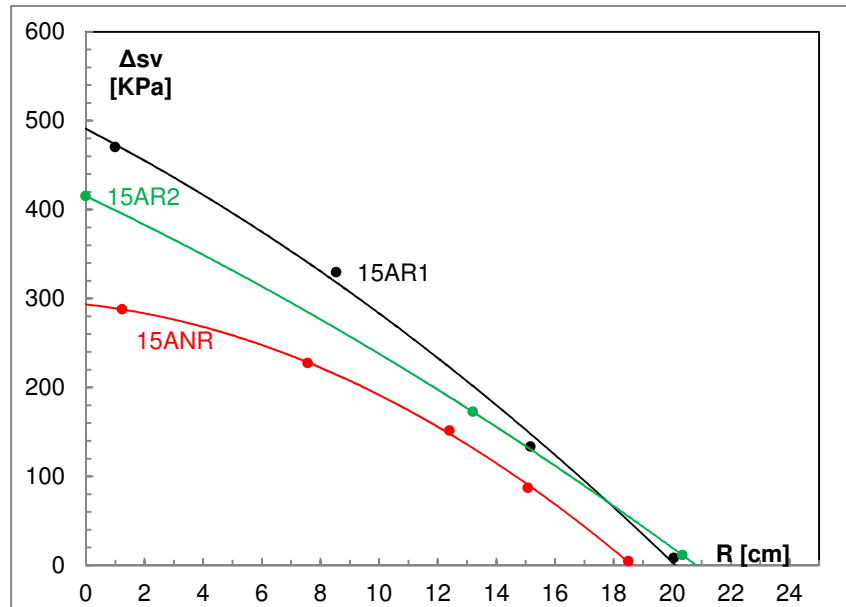


Gráfico 12 Mediciones de presión realizadas en los diferentes montajes

Cada una de las celdas mostro un valor, que fue disminuyendo en relación a su distancia desde el centro del molde, ubicación donde se aplicaron las cargas. Con estos valores, y de manera comparativa, se realizó el cálculo del radio afectado por la variación de presiones debido a la carga aplicada en superficie, determinando de este modo el ángulo de dispersión de los esfuerzos para cada uno de los montajes.

Realizando la comparación para los montajes de 0,15m de espesor de afirmado, sin refuerzo, reforzado con Geomalla tipo 1 y reforzado con Geomalla tipo 2, se obtuvo que el modelo sin refuerzo, presentaba un ángulo de dispersión más bajo, concentrando los esfuerzos en un área más pequeña, transmitiendo de esta manera mayores esfuerzos a la subrasante. Para el modelo reforzado con Geomalla tipo 1, se encontró un ángulo superior al calculado en el modelo sin refuerzo. Ya por último, para el modelo con refuerzo con Geomalla tipo 2, se presentó un área mayor debido al mayor ángulo de dispersión calculado, como se muestra en la Imagen 11 y Tabla 11.

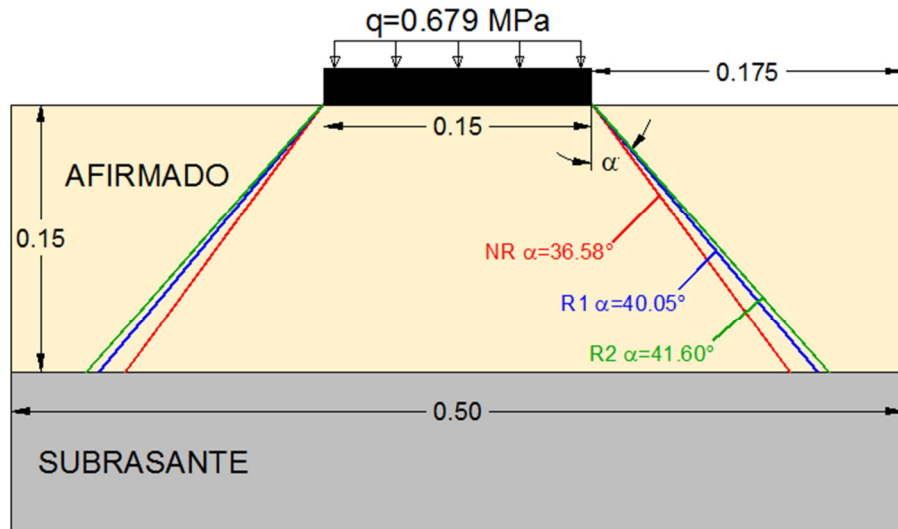


Imagen 11 Representación ángulos de dispersión para los diferentes montajes (dimensiones en m)

| MODELO | R <sub>0</sub><br>[m] | α<br>[°] | Área<br>[m <sup>2</sup> ] | Δ Área |
|--------|-----------------------|----------|---------------------------|--------|
| 15ANR  | 0,186                 | 36,58    | 0,109                     | 100%   |
| 15AR1  | 0,201                 | 40,05    | 0,127                     | 116%   |
| 15AR2  | 0,208                 | 41,60    | 0,136                     | 125%   |

Tabla 11 Variación de las áreas de aplicación de carga

Estas mediciones, solo se realizaron durante el proceso de carga estática, puesto que al realizar mediciones durante la carga cíclica, se observaron pérdidas de comunicación entre las celdas y el equipo, mediciones erradas y variables, debido a que las celdas trabajan con aplicación de carga en dirección perpendicular a su cara, y en el proceso de carga cíclica se presentan deformaciones de la subrasante y desplazamientos de las celdas de carga, por lo que ya no se tenían aplicaciones en dirección perpendicular a la cara de la celda.

### 4.3. Cálculo de Módulo Resiliente.

Para cada uno de los modelos montados, se realizó la aplicación de cargas, de acuerdo al procedimiento anteriormente explicado, de este procedimiento, en cada uno de los modelos, se realizó la toma de datos de deformaciones en superficie para cada uno de los ciclos de carga, observando la variación en la deformación promedio de este procedimiento. Tomando esta variación, se calculó la pendiente en cada uno de los ciclos, obteniendo, que a mayor número de ciclos de aplicación de carga, se presentan mayores pendientes en la curva de deformación entre la zona de carga y la zona de descarga del ciclo, esto mostrando que las deformaciones que se presentan en altos valores de repetición de carga son de carácter elástico, puesto que las deformaciones plásticas se van disminuyendo con el paso de los ciclos de carga.



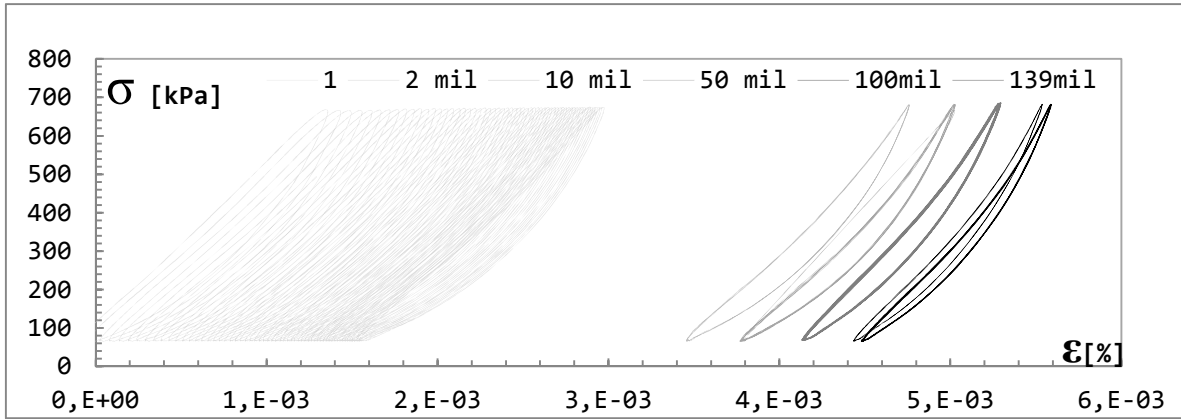


Gráfico 13 Ciclos de aplicación de carga y sus deformaciones en superficie, estructura de 0,15m sin refuerzo.

Para cada una de las pruebas se calculó la pendiente entre la zona de carga y descarga, y se graficó esta pendiente respecto al número de ciclos, obteniendo de este modo, el módulo resiliente de la estructura combinada entre los dos materiales, como se muestra en el Gráfico 14.

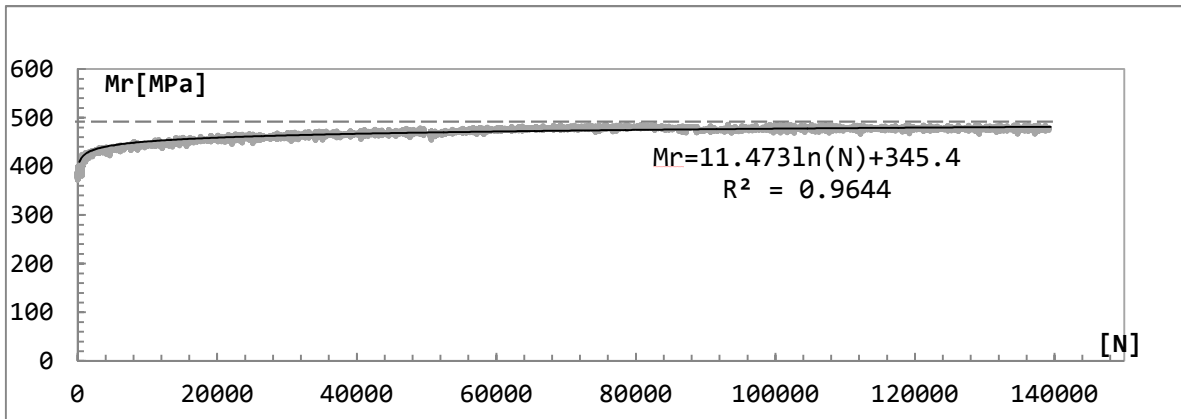


Gráfico 14 Módulo resiliente calculado

Por otra parte también se observa, que a medida que se aplican los ciclos de carga, la pendiente de la graficación de las deformaciones, empieza a presentar un comportamiento asintótico a un valor, este valor será el módulo resiliente de toda la estructura. Este mismo procedimiento se realizó para cada uno de los montajes, obteniendo graficas comparativas entre el aumento de los espesores de capas de afirmados y las inclusiones de los elementos de refuerzo en cada uno de los espesores.

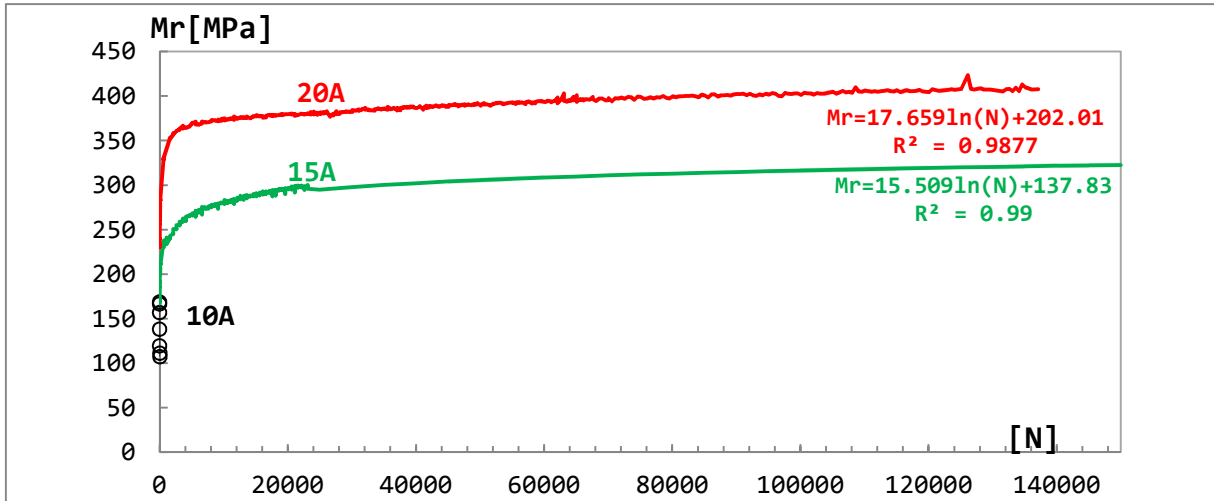


Gráfico 15 Comparativo de valores de módulo resiliente calculado para diferentes espesores de afirmado, sin refuerzo.

Como se esperaba desde el momento de la planificación de los espesores a colocar como capa de Afirmado, al utilizar 0,1m de espesor no se conseguía conformar una capa lo suficientemente resistente, que pudiese soportar un número importante de aplicaciones de carga, por lo que con pocos ciclos de carga se observaron valores importantes de deformaciones, llegando al valor de falla establecido rápidamente como se observa en el Gráfico 16.

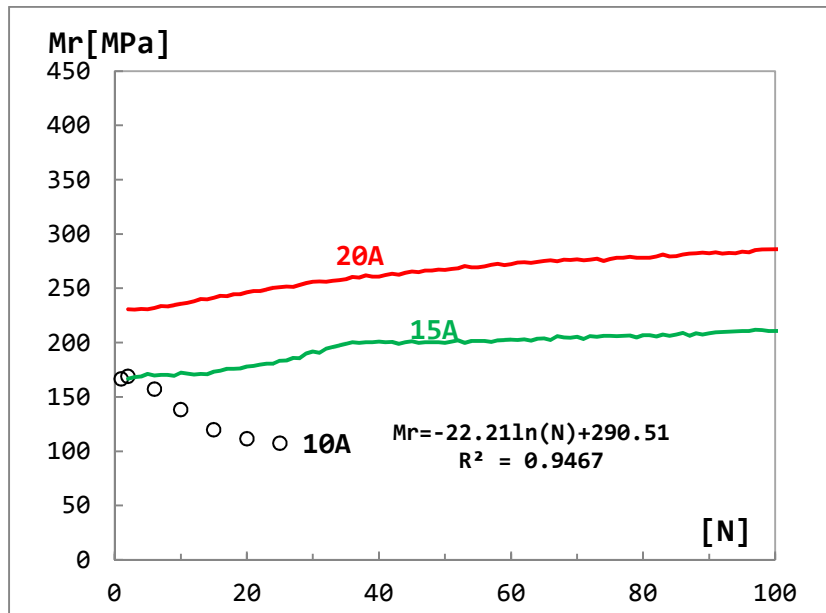


Gráfico 16 Valores de módulo resiliente en los primeros ciclos de carga

El valor máximo de deformación en superficie fue definido como 0,075m, para evitar que el brazo actuador golpeará por su máxima extensión y presentara daños.

Posteriormente, se realizó un comparativo de las estructuras con misma condición de refuerzo, y los diferentes espesores de material tipo Afirmado conformado; para establecer la evolución y variación del módulo resiliente en la parte final de las pruebas, donde su comportamiento era asintótico a un valor, este comparativo, para la condición sin refuerzo se muestra en el Gráfico 17.

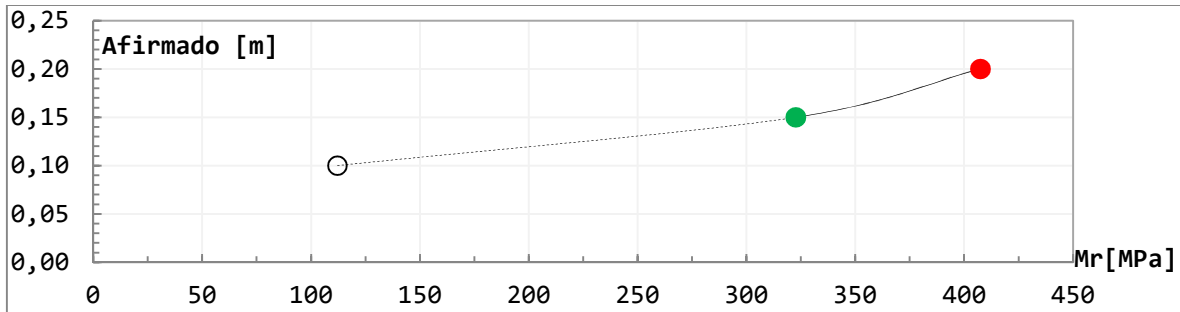
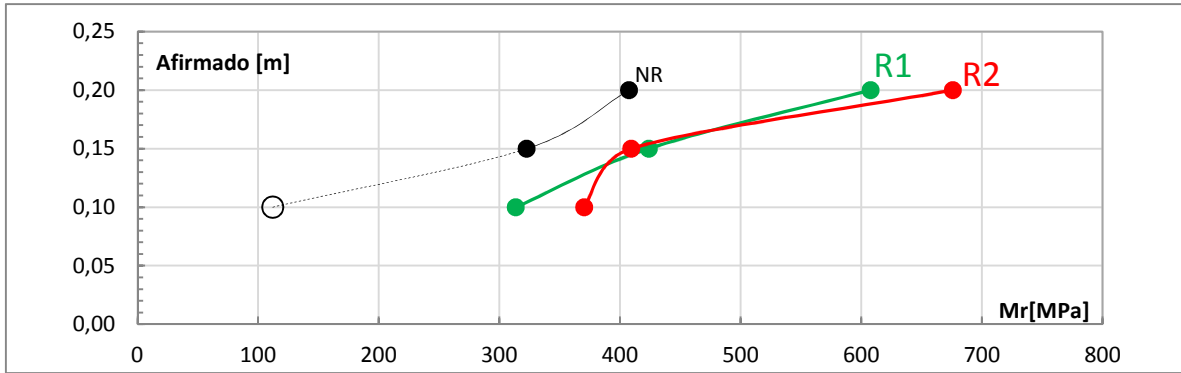


Gráfico 17 Evolución del módulo resiliente por cambio de espesor de Afirmado sin refuerzo

Como se observa en el Gráfico anterior, el módulo resiliente de la estructura, presenta valores más altos con el aumento del espesor de material de Afirmado, donde el punto verde representa el valor de módulo resiliente para la estructura con 0,15m de Afirmado y el punto rojo representa el valor de módulo resiliente para la estructura con 0,2m de espesor de Afirmado. De este comparativo se pudo obtener que el módulo resiliente de la estructura presenta un aumento de 1,7MPa por cada milímetro de material tipo Afirmado que se aumenta en la estructura.

Del mismo modo, se realizó el comparativo de la evolución del módulo resiliente de la estructura, para un mismo espesor de material granular tipo Afirmado, para cada una de las condiciones de refuerzo; esto con el fin de poder observar y determinar los aportes estructurales que se generan dentro de la estructura como efecto de las Geomallas de refuerzo incluidas en la estructura.

En general, se observa un aumento del valor de módulo resiliente con la inclusión de las Geomallas de refuerzo, como se muestra en el Gráfico 18. En este mismo Gráfico se puede ver el comportamiento de los diferentes tipos de refuerzo, observándose un valor no concordante con la tendencia general de los resultados, para la estructura con Geomalla de refuerzo tipo 2 y 0,15m de material tipo Afirmado.



**Gráfico 18 Variación del Módulo resiliente para las diferentes condiciones ensayadas**

El valor atípico encontrado anteriormente, causó la necesidad de analizar el por que de su comportamiento diferente, por que fue necesario incluir mas condiciones de analisis en cada uno de los modelos, para determinar de manera eficiente las razones de los resultados.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Posterior a la recopilación de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a cada uno de los modelos ensayados, se realizó un análisis, buscando entender las razones de los diferentes comportamientos obtenidos.

Como se mencionó en el Capítulo 4, se observó un aumento del módulo resiliente ante el incremento del espesor de material tipo Afirmado. Este comportamiento muestra una evolución lógica del sistema, puesto que el material con mejor capacidad mecánica presentaba un espesor mayor, con lo cual se presenta una mejor distribución de los esfuerzos causados por la aplicación de la carga en la superficie, con lo que se disminuyen los ahuellamientos en superficie.

Para el análisis del espesor de 0,1 m de material tipo Afirmado, no se evaluó la condición sin refuerzo, ya que su comportamiento no permitió observar la evolución de comportamiento útil para aplicaciones de condiciones reales, por lo cual en este caso solo se realiza el análisis con las estructuras reforzadas.

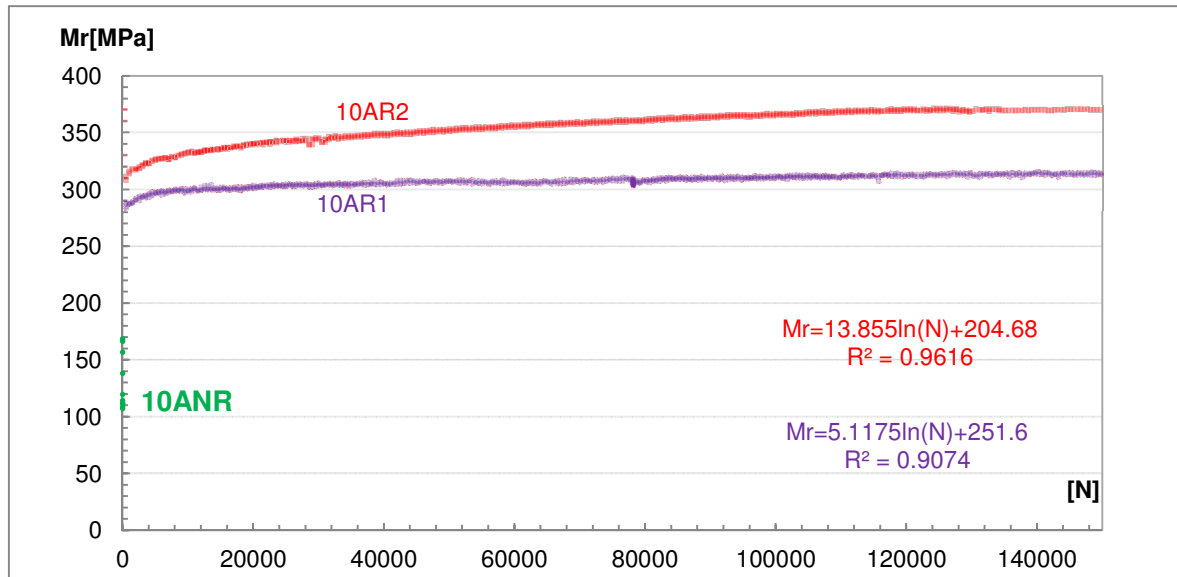


Gráfico 19 Comparativo de Módulo resiliente para los diferentes modelos de 0,1m de Afirmado

Para el modelo reforzado con Geomalla tipo 1, se obtuvo un valor de módulo resiliente de 314 MPa, mientras que al utilizar la Geomalla tipo 2 se obtuvo un valor de módulo resiliente de 370 MPa, como se observa en el Gráfico 19. Lo que muestra que para este espesor de Afirmado, un aumento de 10kN en la resistencia de la Geomalla, genera un aumento del 22% en el valor del módulo resiliente.

Del mismo modo se realizó el análisis para el espesor de 0,15m de Afirmado, obteniendo que para la condición sin refuerzo el valor de módulo resiliente fue de 322 MPa, para el modelo con refuerzo tipo 1 el módulo resiliente fue de 423 MPa y para el refuerzo tipo 2 el módulo resiliente fue de 410 MPa.

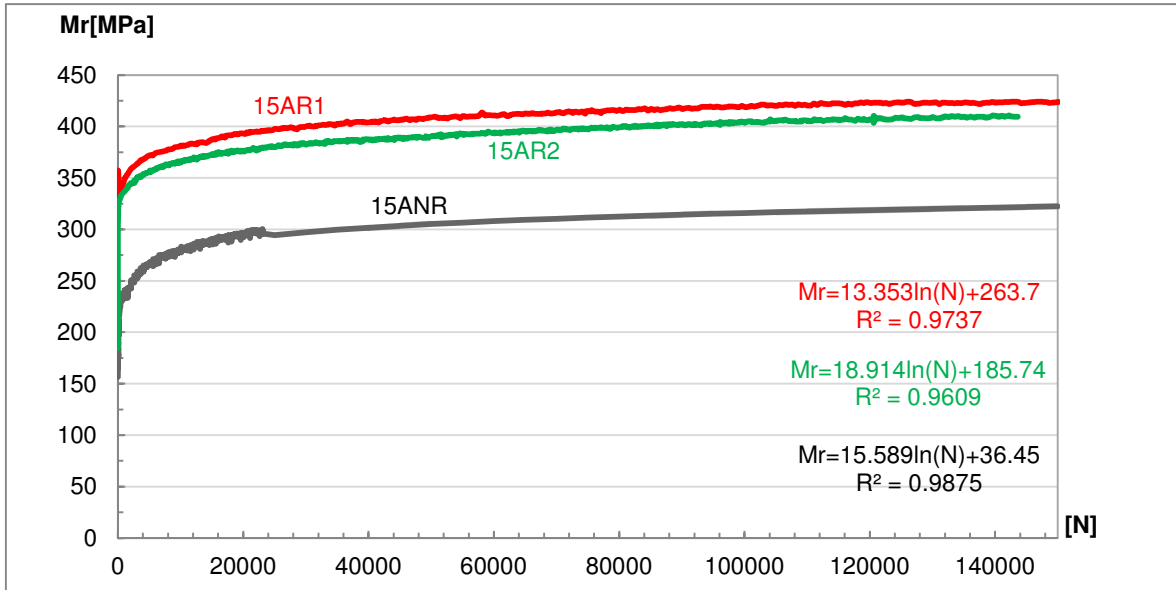


Gráfico 20 Comparativo de Módulo resiliente para los diferentes modelos de 0,15m de Afirmado

Este último valor, presenta un comportamiento atípico, según la evolución encontrada en los demás modelos, por lo que se realizó un análisis de los diferentes elementos que pudieron influir en la variación encontrada. Posterior a analizar los ciclos de carga, las cargas aplicadas y procesos de conformación de las estructuras, se realizó el análisis de las humedades de los materiales en las diferentes pruebas, obteniendo como resultado el Gráfico 21.

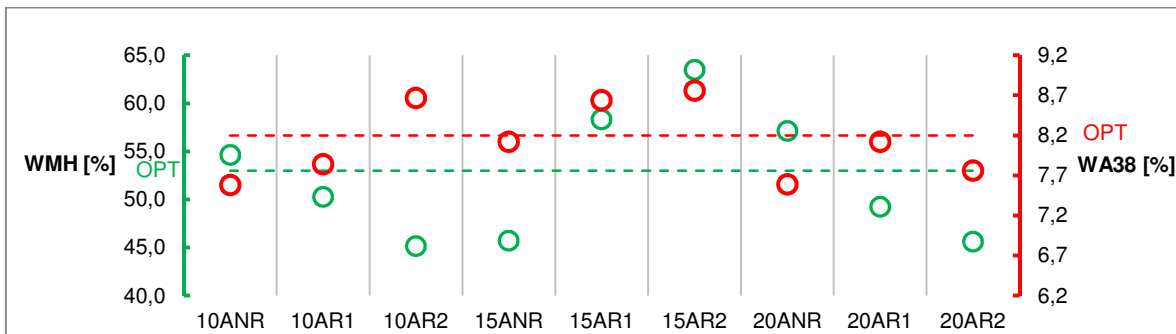


Gráfico 21 Humedades medidas durante el montaje de los modelos

En este Gráfico, se puede observar que para el montaje realizado con refuerzo con Geomalla tipo 2 y un espesor de material tipo Afirmado con espesor de 0,15m (15AR2), los valores de humedad tanto de la subrasante, como del Afirmado, se encontraban por encima de los valores óptimos. La mayor humedad de los materiales, principalmente en el material de la subrasante, explica la razón de las mayores deformaciones obtenidas durante la aplicación de las cargas, con lo cual el valor del módulo resiliente de la estructura, se vio afectada de manera negativa.

Este efecto, al compararlo con el modelo reforzado con Geomalla tipo 1, donde a pesar de tenerse unos valores de humedad por encima de los óptimos, pero en menor cantidad, se obtuvo un mejor comportamiento de la estructura, muestra que aumentos de la humedad

de la subrasante, genera una pérdida de condiciones mecánicas, causando mayores deformaciones y afectaciones del comportamiento de la estructura ante la aplicación de cargas, efecto visible en la realidad cuando estructuras similares a las ensayadas se ven enfrentadas al paso de vehículos en temporadas invernales, donde los valores de humedad de los materiales se encuentran por encima de los óptimos.

Una vez realizado este análisis, y encontrando la posible razón del comportamiento atípico de ese modelo, se realizó el comparativo entre la condición sin refuerzo y la estructura reforzada con Geomalla tipo 1; comparativo que mostro que la inclusión de la Geomalla de resistencia de 20kN incremento el módulo resiliente, en comparación con la estructura sin refuerzo en un 31,5%.

Para la estructura de 0,2m de espesor de material de Afirmado, se encontro que para la condición sin refuerzo el módulo resiliente es de 408 MPa, la estructura con refuerzo 1 tiene un módulo resiliente de 607 MPa y la estructura con refuerzo tipo 2 tiene un módulo resiliente de 674 MPa, como se observa en el Gráfico 22. Esta evolución muestra que entre el caso sin refuerzo y el modelo con refuerzo tipo 1 se tiene un aumento del 48,8%, y con el refuerzo tipo 2 se presenta un aumento del 65,2%.

Del mismo modo, al comparar el modelo con refuerzo tipo 1 y el modelo con refuerzo tipo 2, se observó un aumento del módulo resiliente del 12%.

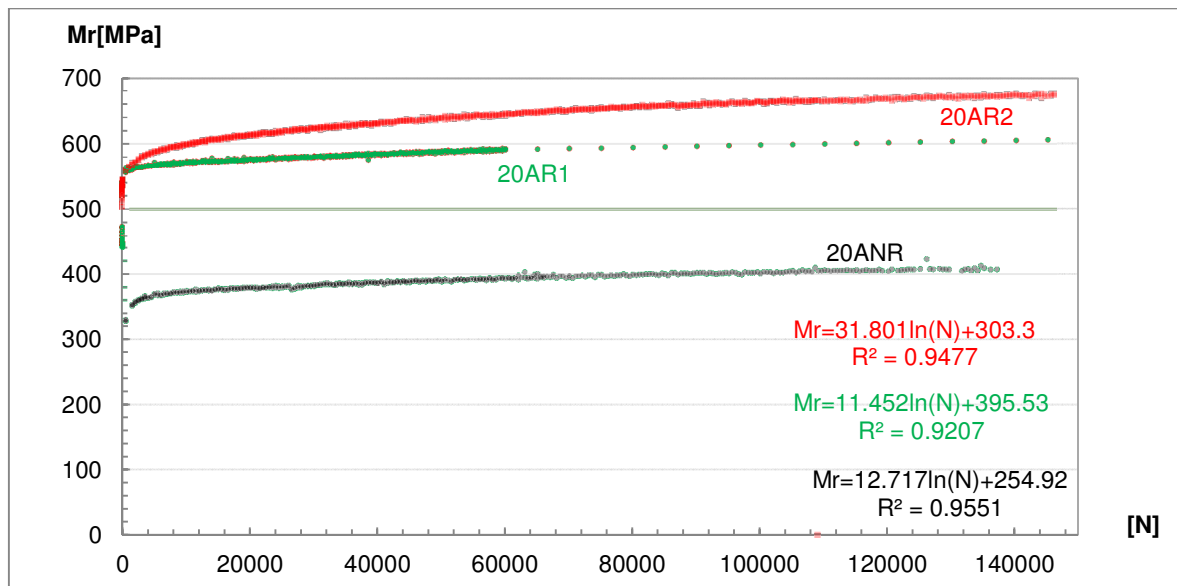


Gráfico 22 Comparativo de Módulo resiliente para los diferentes modelos de 0,2m de Afirmado

Estos tres (3) modelos, con el mismo valor de espesor y diferentes tipos de refuerzo, muestran de manera clara el incremento de propiedades mecánicas de la estructura, por lo cual se evidenció el aporte que genera un elemento de refuerzo y su incremento de resistencia a la tensión.

|                     |        | Mr a 150k ciclos [MPa] |             |             | Incremento del Mr Reforzado / Mr No Reforzado |             |
|---------------------|--------|------------------------|-------------|-------------|---|-------------|
|                     |        | No reforzado           | Refuerzo R1 | Refuerzo R2 | Refuerzo R1                                   | Refuerzo R2 |
| Espesor de afirmado | 0,10 m | 204 *                  | 314         | 370         | 54.3%   | 81.9%       |
|                     | 0,15 m | 322                    | 423         | 410         | 31.5%   | 27.3%       |
|                     | 0,20 m | 408                    | 607         | 674         | 48.8%   | 65.2%       |

**Tabla 12 Resumen de variaciones de módulo resiliente para diferentes espesores y refuerzos**

Del mismo modo, se realizó el análisis de la evolución del módulo resiliente variando el espesor de material granular, pero manteniendo el tipo de refuerzo. Para la condición sin la presencia de refuerzo con Geomallas, se analizaron los resultados de las estructuras con 0,15m de Afirmado y 0,2m de espesor de este.

Como se mencionó anteriormente, la estructura sin refuerzo, con un espesor de 0,15m de Afirmado mostró un valor de módulo resiliente de 322 MPa, mientras que la estructura con espesor de 0,2m de Afirmado mostró un valor de 408 MPa. Esto nos permite observar que al aumentar 0,05m de espesor granular incrementa el módulo resiliente un 27%; valor inferior al encontrado al incluir una Geomalla de refuerzo tipo 1 en la estructura de 0,15m de espesor de Afirmado, que fue del 30%.

Comparando estos dos resultados, se puede ver que con la inclusión de una Geomalla de 20 kN/m de resistencia a la tensión en ambas direcciones, se pueden conseguir resultados superiores que al aumentar el espesor granular, lo que redundaría tanto en costos, tiempos de construcción y huella de carbono menor con la utilización de Geomallas de refuerzo.

Del mismo modo se realizó el análisis de los resultados obtenidos para los diferentes espesores con la inclusión de la Geomalla tipo 1, mostrando que el módulo resiliente de la estructura con un espesor de 0,1m de Afirmado es de 314 MPa, para el espesor de 0,15m el módulo resiliente fue de 423 MPa, mostrando un aumento del 34%. Para la estructura con un espesor de 0,2m y refuerzo tipo 1, el módulo resiliente fue de 607 MPa, mostrando un aumento del 96% respecto al espesor de 0,1m con refuerzo tipo 1 y un aumento del 46% respecto al espesor de 0,15m con refuerzo tipo 1.

Estos resultados permiten observar como las estructuras reforzadas, donde adicionalmente se les realiza un aumento del espesor de material granular, generan un aumento de capacidad mecánica de mayor proporción que en los modelos donde se aumenta el espesor de material granular pero sin la inclusión de Geomallas de refuerzo.

Para los modelos con refuerzo tipo 2, se realizó el mismo análisis, buscando determinar el aumento de las capacidades mecánicas de las estructuras, tomando en consideración que el modelo de 0,15m de espesor de Afirmado, reforzado, presentó un comportamiento atípico con los demás modelos estudiados, motivos que ya fueron estudiados anteriormente.



En este caso, el modelo de 0,1m de espesor de material de Afirmado, con refuerzo en Geomalla tipo 2, presento un valor de módulo resiliente de 370 MPa, para el espesor de 0,15m, se obtuvo un valor de 410 MPa, mientras que para el modelo con 0,2m de espesor de Afirmado el valor de módulo resiliente fue de 674 MPa; este último valor muestra un incremento del 81% respecto al módulo de la estructura de menor espesor; que al igual que el análisis anterior nos permite observar un aumento significativamente más alto respecto a los modelos donde el incremento de espesor se realiza sin la colocación de refuerzo.

Estos resultados, permiten inferir que el efecto que genera la inclusión de un refuerzo con Geomalla biaxial se transfieren a la totalidad del espesor granular, y no solo a una porción del espesor. Resulta fundamental determinar el valor límite del espesor de granular que recibe los efectos de mejoramiento como efecto de la inclusión de Geomallas, esto con el fin de poder desarrollar mecanismos y modelos de estructuras multi-reforzadas, a diferencia de las actualmente utilizadas que son mono reforzadas.

En condiciones de funcionamiento en vías reales, en general, no se poseen mecanismos o instrumentación que permitan observar el aporte del refuerzo con Geomalla, sobre la distribución de esfuerzos que son aplicados a la subrasante; motivo por el cual el efecto en condiciones reales, se observa en el comportamiento de las deformaciones de la superficie o ahuellamientos, generado por el paso repetitivo de las cargas.

Es importante entender la diferencia que se puede presentar entre las aplicaciones de carga en laboratorio y las aplicaciones reales de los vehículos, puesto que en laboratorio las aplicaciones de carga siempre están realizadas sobre el mismo punto; efecto que no se cumple en las vías, puesto que el paso de vehículos no es perfectamente canalizado, pero a medida que se van generando deformaciones en superficie, los vehículos si empiezan a tener un comportamiento canalizado, buscando pasar por la huella creada por las repeticiones anteriores y no sufrir efectos de atascamiento o bloqueo.

Una vez aclarado esto, se realizó el análisis del comportamiento del ahuellamiento respecto al tipo de refuerzo y espesor de Afirmado que se trabajó en cada modelo, obteniendo los siguientes resultados.

Para los modelos con espesor de Afirmado de 0,1m se obtuvo que con la inclusión de Geomalla tipo 1 se presentó un ahuellamiento de 25mm, mientras que con la inclusión de la Geomalla tipo 2 como elemento de refuerzo se obtuvo un ahuellamiento de 22mm. Respecto al modelo sin refuerzo, este modelo presento un rápido colapso, llegando al valor límite establecido de 75mm con pocas repeticiones, por lo cual no fue tenido en cuenta dentro del presente análisis.

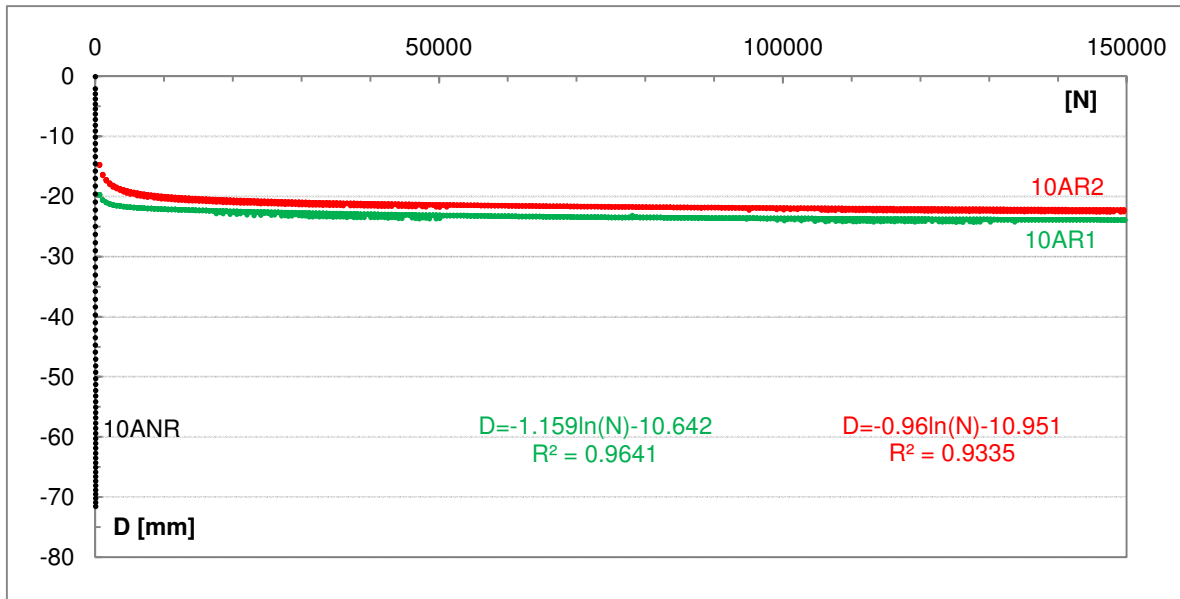


Gráfico 23 Comparativo de ahuellamientos para estructuras con 0,1m de espesor de Afirmado

Estos valores de ahuellamientos, que se consideran bajos, se presentan debido a una consolidación de la subrasante, debido a la aplicación de la carga y el bajo valor de espesor granular, que no permiten una correcta disipación de los esfuerzos, con lo que se muestra que este espesor, a pesar de tener un elemento de refuerzo, es insuficiente para generar un elemento de rodadura en una estructura bicapa.

Para el análisis de las estructuras con espesor de 0,15m de Afirmado, se observó que el ahuellamiento de la estructura sin refuerzo fue de 68mm, para la estructura con refuerzo 1 se presentó un ahuellamiento de 35mm y para la estructura con refuerzo 2 se presentó un ahuellamiento de 20mm. Se observa una disminución en los modelos reforzados, respecto al modelo sin refuerzo, debido al efecto de rigidización de la Geomalla de refuerzo y su aumento del ángulo de distribución de esfuerzos, que genera una menor exigencia mecánica a la subrasante, con lo cual los ahuellamientos, causados por deformación de la subrasante se ven disminuidos.

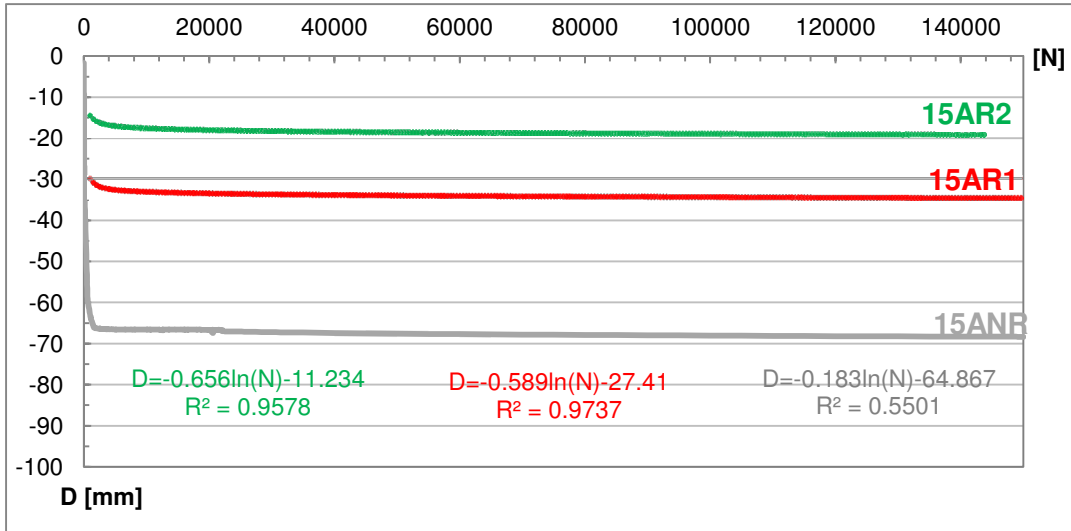


Gráfico 24 Comparativo de ahuellamientos para estructuras con 0,1m de espesor de Afirmado

Para los modelos con 0,2m de espesor granular, se observa que la estructura sin refuerzo presenta un ahuellamiento de 20mm, para la estructura con refuerzo en Geomalla tipo 1 un ahuellamiento 3mm y que la estructura con refuerzo en Geomalla tipo 2, un ahuellamiento de 1,5mm; valores bajos respecto a las demás estructuras analizadas. De este último espesor de Afirmado estudiado, es importante resaltar que ambos tipos de refuerzo generan importantes disminuciones de los ahuellamientos, pero que la variación de la resistencia de la Geomalla de refuerzo no genera diferencias relevantes de los ahuellamientos, como si sucede en los modelos de 0,15m de espesor de Afirmado, donde el aumento de la resistencia de la Geomalla permitió observar una reducción cercana a los 15mm en el ahuellamiento; mostrando la importancia de la resistencia de la Geomalla dentro del efecto de mejoramiento de las condiciones mecánicas del material granular en contacto con la Geomalla.

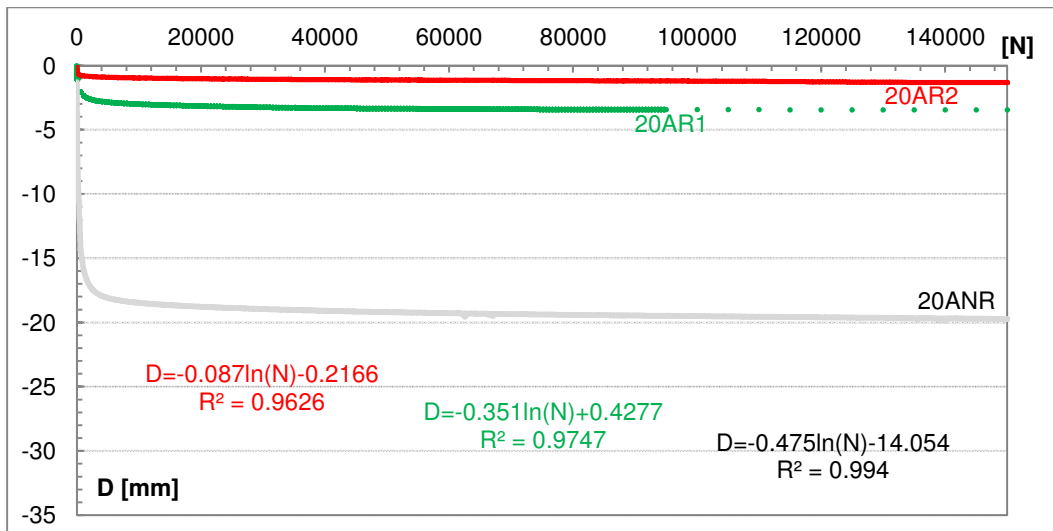


Gráfico 25 Comparativo de ahuellamientos para estructuras con 0,1m de espesor de Afirmado

## 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Es importante recordar que los resultados obtenidos dentro de las pruebas realizadas para las estructuras con y sin refuerzo, pueden ser aplicados para condiciones de carga similares, pero ante variaciones de las condiciones de velocidad en la vía analizada, así mismo se deberán realizar nuevos ensayos, debido a que frecuencias mayores de aplicación de carga, generan respuestas diferentes de los materiales que conforman la estructura, principalmente de los materiales de la subrasante.

Se observó durante el proceso de conformación de los diferentes montajes, que la primera capa de material de Afirmado, presentaba dificultad en alcanzar la densidad establecida como valor óptimo, puesto que la baja capacidad de soporte de la subrasante, hacía que el proceso de compactación se generara en capas inferiores del material de subrasante y no en el granular. Ya en las capas siguientes ese efecto no se evidenciaba.

En la metodología mostrada por Giroud y Bonaparte en 1985, se realiza el cálculo del espesor de material granular necesario para soportar un determinado número de repeticiones de carga. Esta metodología utiliza en la Ecuación 2, el parámetro de CBR de la subrasante, número de repeticiones de carga y ahuellamiento máximo admisible.

$$h_{os} = \frac{[125 \log N - 294(r - 0,075)]}{(30000CBR)^{0,63}}$$

Ecuación 2 Giroud y Bonaparte estructura no reforzada

Dónde:

**N** es el número de repeticiones de carga

**r** es el ahuellamiento máximo permitido

**h<sub>os</sub>** es el espesor de material granular a utilizar

Bajo esta metodología; tomando como ahuellamiento máximo 0,075m, 150000 repeticiones de carga y un valor de CBR de la subrasante del 3%, se obtiene que se requieren 0,49m de material granular sin refuerzo para soportar el número de repeticiones de carga.

Este valor calculado, resulta mucho más alto que lo observado dentro de las pruebas de laboratorio, donde con 0,15m de material tipo afirmado, la estructura fue capaz de soportar los 150000 ciclos de carga de manera adecuada.

Esta diferencia de valores, se puede deber a que dentro de la metodología planteada (Giroud y Bonaparte 1985), no se toman en cuenta los parámetros mecánicos del material granular a utilizar, por lo cual no importa la calidad del mismo, dentro de los resultados de espesor necesario para soportar el número de repeticiones de carga.

Posteriormente, esta metodología realiza la inclusión de la Geomalla, en la cual hace una relación entre el ahuellamiento máximo permitido y la ecuación a utilizar, donde toma como bajos ahuellamientos los inferiores a 0,15m y altos ahuellamientos los superiores a 0,15m. De este punto se desprenden

$$h = Rh_0$$

**Ecuación 3 Giroud y Bonaparte estructura reforzada para bajos ahuellamientos**

$$h = 0,9Rh_0$$

**Ecuación 4 Giroud y Bonaparte estructura reforzada para altos ahuellamientos**

En este caso, y debido al valor de ahuellamiento establecido dentro de las pruebas, se utilizó la Ecuación 3, para calcular el espesor reforzado. De este cálculo se obtiene que para la malla de resistencia en el sentido longitudinal de 20 kN/m se requieren 0,22m de espesor granular, mientras que para la Geomalla de resistencia 30 kN/m se requieren 0,2m de espesor granular.

Ambos valores son superiores a los obtenidos dentro de las pruebas de laboratorio, posiblemente por el tipo de Geomalla utilizada dentro de las pruebas y su interacción con el material granular. Cabe resaltar que dentro de la información obtenida sobre la investigación realizada, no se tiene información de las características mecánicas del material granular, por lo cual establecer una relación entre los resultados resulta inviable, puesto que el material granular cumple una función primordial en el efecto de distribución de cargas y de interacción con la Geomalla.

Es importante mencionar que esta metodología no tiene en cuenta la carga que ejerce cada repetición, por lo que su utilización se ve limitada únicamente a las consideraciones que se realizarán dentro de la investigación, donde se tomó como referencia un eje de 80kN.

Gran número de vías, que han sido construidas sobre materiales blandos, como arcillas o limos con contenidos de materia orgánica, como es el caso de las pruebas realizadas en esta investigación, utilizan como elemento de mejoramiento un Geotextil Tejido, de alta resistencia a la tensión; por este motivo, se realizó la revisión de investigaciones bajo estas condiciones de refuerzo. Una de estas investigaciones fue la realizada por (Hausmann 1987), en la cual propone una serie de ecuaciones para el cálculo de los espesores granulares necesarios para soportar un número de repeticiones de carga.

$$h'_0 = (0,0236 \log N + 0,0161) \sqrt{\frac{P}{CBR} - 17,8A}$$

**Ecuación 5 Calculo de espesor sin refuerzo propuesta por Hausmann**

Dónde:

**h<sub>0</sub>** es el espesor de diseño

**N** es el número de repeticiones de carga

**P** es la carga aplicada

**A** es el área de contacto de la rueda

Esta metodología, presenta como diferencia importante, que se empieza a tomar en cuenta tanto la carga que se esta aplicando a la estructura, como el área de aplicación de la misma, por lo cual su utilización se puede expandir a diferentes valores de carga. La Ecuación 5, muestra la propuesta realizada por Hausmann, en la que al igual que en la metodología anteriormente analizada, se observa que no se toma en cuenta el tipo ni las propiedades mecánicas del material de subrasante.

Utilizando la Ecuación 5, se realizó el calculo del espesor de material granular que se requeriria para soportar 150.000 repeticiones de carga, para un material tipo Afirmado con un CBR de 15%. De este calculo se obtuvo que se requeririan 0,84m para que al final del número de repeticiones planteado, se tuviera un ahuellamiento máximo de 75mm, valor de ahuellamiento utilizado para la calibracion de la metodología. Este valor es bastante alto, tanto para los resultados de la metodología de (Giroud y Bonaparte, Design of unpaved roads and trafficked areas with geogrids 1985) como para los resultados obtenidos en laboratorio.

Ya para la inclusión del Geosintetico, se dice en el artículo, que los geotextiles no generan un reforzamiento del material granular, puesto que no existe interacción entre ambos elementos, sino que su efecto se observa como elemento de distribución de carga debido al efecto membrana, por lo cual no se recomienda una reduccion de espesores granulares.

Realizando una comparación entre los resultados obtenidos dentro de los modelos probados, con y sin refuerzo, con la metodología actualmente utilizada en el país, metodo (Giroud y Han, Design method for Geogrid - Reinforced Unpaved Roads. I. Development of design Method 2004), a partir de la Ecuación 6 (Giroud y Han, Design Method for Geogrid - Reinforced Unpaved Roads. II Calibration and Aplications 2004), y utilizando el programa de computador Geosoft Pavco® V3.0, donde se incluye el módulo de cálculo para este tipo de estructuras bicapa, se encontraron las siguientes diferencias.

$$h = \frac{0,868 + (0,661 - 1,006J^2) \left(\frac{r}{h}\right)^{1,5} \log N}{1 + 0,204 \left[ \frac{3,48CBR_{bc}^{0,3}}{CBR_{sg}} - 1 \right]} \times \left[ \frac{\frac{P}{\pi r^2}}{\left(\frac{s}{f_s}\right) \left\{ 1 - 0,9 \exp \left[ - \left(\frac{r}{h}\right)^2 \right] \right\} N_c C_u} \right] r$$

Ecuación 6 Giroud y Han

Dónde:

**h** es el espesor de diseño

**N** es el número de repeticiones de carga

**P** es la carga aplicada

**r** es el radio de aplicación de carga

**f<sub>s</sub>** es el ahuellamiento durante las pruebas de calibración (0,075m)

**s** es el ahuellamiento máximo permitido en los cálculos

**CBR<sub>bc</sub>** es el CBR del material granular a utilizar

$CBR_{sg}$  es el CBR del material de la subrasante

Se realizaron los cálculos en el programa para 150.000 repeticiones de un eje de 80kN, tomando como valor de CBR de la subrasante 3% y de CBR para el Afirmado 15% y un ahuellamiento máximo de 0,075m, que fueron los parametros tomados para realizar las pruebas en laboratorio.



Imagen 12 Resultados obtenidos en Geosoft Pavco® V3.0

Con los resultados obtenidos, se necesitarían 0,45m de material tipo Afirmado, sin refuerzo, para que la estructura fuera capaz de soportar 150.000 repeticiones. Valor que es superior al obtenido dentro de las pruebas de laboratorio, puesto que con 0,15m de espesor de Afirmado, sin refuerzo, se lograron las 150.000 con un valor de ahuellamiento de 45mm.

Esta diferencia en el valor del espesor del modelo sin refuerzo, se ve disminuida en proporción en los modelos con refuerzo, donde con los cálculos realizados, para una Geomalla con resistencia de 20kN/m, se requieren 0,25m de afirmado y para la Geomalla de resistencia de 30 kN/m se requieren 0,10m de Afirmado.

Dentro de las pruebas realizadas en el laboratorio, en las condiciones de refuerzo, el espesor de 0,1m fue capaz de resistir los 150.000 ciclos de carga sin llegar a los valores de ahuellamiento de 75mm, establecidos como valor límite. Este efecto se puede explicar debido a que las Geomallas utilizadas dentro del proceso de calibración de la ecuación, y que se utilizaron en la investigación que permitió la creación de la metodología, fueron Geomallas de sección rectangular, donde las resistencias en sus dos direcciones no presenta igualdad en el valor, por lo que su capacidad de refuerzo es inferior.

Es importante realizar una comprobación a escala real de estos resultados, para poder determinar la influencia del molde en acero sobre los resultados obtenidos, y realizar un ajuste a la metodología de Giroud y Han sobre los espesores obtenidos en el cálculo y

poder tener diferentes calibraciones, respecto al tipo de malla y sección de las aberturas, que se utilice.



## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Estructuras bicapa, como las analizadas en laboratorio, donde el espesor de Afirmado sea inferior a 0,15m sin refuerzo, poseen inconvenientes debido a la baja capacidad de distribución de carga que se origina por el espesor reducido de material granular, permitiendo un ahuellamiento rápido, haciéndolas inviables técnicamente.
- La inclusión de Geomallas de refuerzo, en todos los espesores de material Afirmado analizados, presenta un mejoramiento de las condiciones mecánicas de la estructura (entre el 30% y 50% para el valor de  $M_r$  con Geomalla tipo 1 y entre el 30% y 80% para la Geomalla tipo 2), disminuyendo los ahuellamientos en superficie e incrementando los módulos resilientes de las estructuras, con lo cual se aumenta el número de aplicaciones de carga que es capaz de soportar cada estructura, en comparación con los modelos no reforzados.
- Una variación del 10% en las humedades del material de subrasante, pueden causar variaciones importantes en el comportamiento de la estructura, causando mayor susceptibilidad a la aplicación de las cargas, observándose mayores ahuellamientos que en condiciones con menores humedades de la subrasante.
- El aumento de la resistencia a la tensión de las Geomallas de refuerzo (comparando resistencias de 20kN/m y 30 kN/m), genera un aumento en el aporte estructural al material granular, creando una capa más rígida, capaz de distribuir de manera más adecuada los esfuerzos.
- La variación del ángulo de dispersión de esfuerzos obtenida en laboratorio, muestra un efecto de incremento de su valor (16% para la Geomalla tipo 1 y 25% para la Geomalla tipo 2), directamente proporcional al aumento de la resistencia a la tensión de la Geomalla de refuerzo.
- El incremento de la humedad de la subrasante, presenta un efecto relevante en el comportamiento de la estructura, generando que modelos reforzados con Geomalla de resistencia a la tensión de 30kN/m presenten propiedades mecánicas inferiores (423 MPa para la Geomalla tipo 1 y 410 MPa para la Geomalla tipo 2) y ahuellamientos mayores que estructuras reforzadas con Geomalla de resistencia a la tensión de 20kN/m.
- Debido a que los resultados obtenidos dentro de la investigación, son para Geomallas de construcción por coextrusión, se considera apropiada la continuación de la investigación para determinar el aporte y efectos de la construcción de las Geomallas, y poder determinar cómo afecta su configuración en los aportes estructurales a partir de su interacción con materiales granulares.
- Es de gran importancia, realizar modelos de estructuras con y sin refuerzo, realizando variaciones de la humedad de la subrasante, para poder determinar los efectos de estas variaciones hacia los aportes estructurales de las diferentes Geomallas de refuerzo, para así comprender la importancia de obras de drenaje sobre los comportamientos mecánicos de las estructuras.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Barenberg, E.J, J Hales, y J Dowland. «Evaluation of soil–aggregate systems with MIRAFL.» *University of Illinois Report*, 1975.
- Congreso de la Republica. *Informe Temporada Invernal años 2010 y 2011*. Bogota: Congreso Visible, 2012.
- Giroud, J.P., y Jie Han. «Design method for Geogrid - Reinforced Unpaved Roads. I. Development of design Method.» *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004: 775-786.
- Giroud, J.P., y Jie Han. «Design Method for Geogrid - Reinforced Unpaved Roads. II Calibration and Applications.» *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004: 787-797.
- Giroud, J.P., y R Bonaparte. «Design of unpaved roads and trafficked areas with geogrids.» *Polymer grid reinforcement*, 1985: 116-127.
- INVIAS, Instituto Nacional de Vias. *Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras*. Bogota: INVIAS, 2013.
- INVIAS, Instituto Nacional de Vias. *Resumen del estado de a red Vial Nacional con criterio Tecnico 2014*. Rendicion de Cuentas, Bogota: INVIAS, 2015.
- Koerner, Robert. *Designing with Geosynthetics*. Estados Unidos: Xlibris Corporation, 2012.
- Meza, Victoria Elena. «Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la catedra universitaria.» *Boletin Ciencias de la Tierra*, 2012.
- Minstransporte. *Anuario Transporte en Cifras - Estadísticas 2014*. Bogota: MinsTransporte, 2014.
- Rondon, Hugo Alexander, Fredy Alberto Reyes, y Carlos Felipe Urazan. «Efecto de la disminución de la velocidad vehicular en la durabilidad de una capa asfáltica.» *Ingeniare*, 2013: 139-146.
- Rondon, Hugo alexander, y Fredy Alberto Reyes. *Comportamiento de materiales granulares en pavimentos flexibles*. Bogota: Universidad Catolica de Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, 2008.
- Rondon, Hugo Alexander, y Fredy Alberto Reyes. *Pavimentos, materiales, construcción y diseño*. Bogota: ECOE Ediciones, 2015.
- Steward, J.E., R. Williamson, y J and Mohny. *Guidelines for Use of Fabrics in Construction and Maintenance of Low Volume Roads*. Portland: U.S. Forest Service, 1977.

Webster, S.L, y J.E. Watkins. «Investigation of construction techniques for tactical bridge approach roads across soft ground.» *Technical Report USAE Waterways Experiment Station*, 1977.

