

UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA

Escuela de Ingenierías

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

UDLAP®

“Identificación de las propiedades de los geosintéticos de refuerzo para su implementación
en proyectos de pavimentos flexibles”

Tesis que, para completar los requisitos del Programa de Honores presenta el estudiante

Alain Paul Estuardo Moreno Animas

159241

Ingeniería Civil

Director de tesis: Dr. Rosemberg Reyes Ramírez

San Andrés Cholula, Puebla

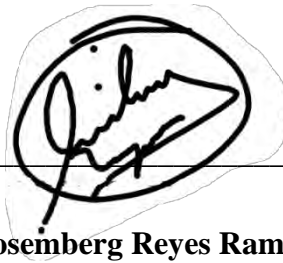
Otoño 2021

Hoja de firmas

Tesis que, para completar los requisitos del Programa de Honores presenta el estudiante

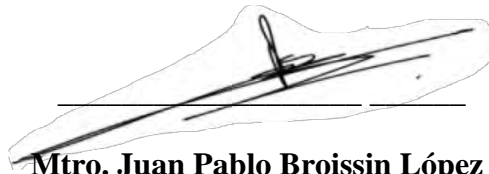
Alain Paul Estuardo Moreno Animas con ID 159241

Director de Tesis

A handwritten signature in black ink, enclosed in a light grey oval-shaped highlight. The signature is written over a horizontal line.


Dr. Rosenberg Reyes Ramírez

Presidente de Tesis

A handwritten signature in black ink, enclosed in a light grey irregular highlight. The signature is written over a horizontal line.

Mtro. Juan Pablo Broissin López

Secretario de Tesis

A handwritten signature in black ink, enclosed in a light grey irregular highlight. The signature is written over a horizontal line.

Dr. Benito Corona Vázquez

Dedicatoria

A Dios por darme la salud, energía y discernimiento para lograr este objetivo.

A las tres personas más importantes de mi vida: mi madre Alejandra, mi abuela Beatriz y mi hermana Alessandra, por todo su amor incondicional, consejos y apoyo en todo momento.

Agradecimientos

A Dios, a mis padres, a mis hermanos, mis abuelos, mis tías, mi primo Jesús y a mi prima Karina por todo su apoyo durante esta etapa de mi vida e impulsarme a seguir alcanzando mis metas.

Al Dr. Rosemberg y todos aquellos profesionistas que aportaron en mi formación dentro de esta área con conocimientos y retroalimentación más que valiosa.

A mis colegas ingenieros con quienes compartí dos años y medio grandes aprendizajes en Puebla y por un año y medio el reto en la adaptación a la nueva normalidad: Adolfo, Carlos, José Luis, Iván, Christian, José Antonio, Mariana, David Eduardo, Claudia Catalina, Gabriela, Cynthia y Miguel Ángel.

E igual aquellos amigos a la distancia que siempre mostraron apoyo y palabras de ánimo en momentos de paz e incertidumbre: Denisse, Edgar, José, Eduardo, Ricardo, Alan, Mariana, Ignacio y Juan Pablo.

ÍNDICE

Introducción	6
Justificación	9
Objetivos	10
Marco Teórico	11
Los Geosintéticos	21
Polímeros: Materia Prima	23
Tipos de Geosintéticos	27
Funciones de los Geosintéticos	37
Características de los Geosintéticos de Refuerzo y Mecanismos de Interacción	40
Valores MARV	48
Diseño con geosintéticos para la función de refuerzo	50
Estabilización de Suelos con Geosintéticos	52
Metodología	56
Resultados y Discusión	58
Primer Estudio	58
Segundo Estudio	62

Tercer Estudio	63
Cuarto Estudio	66
Quinto Estudio	68
Comparativa de resultados con Teoría de Giroud-Han 2004	111
Comentarios	122
Conclusiones y Recomendaciones	127
Bibliografía	131
Anexos	134

INTRODUCCIÓN

En más de una ocasión, ya sea en congresos o estudios elaborados por instancias nacionales o internacionales como Central Intelligence Agency, se ha vinculado fuertemente la calidad y capacidad de desarrollo económico de un país en función de la infraestructura vial con la que cuenta. El que un territorio tenga una red de vías terrestres adecuada se ve reflejado con la mejora en los tiempos de transporte de población y mercancías, y en un país como México esto resulta sumamente imperativo puesto que el 95.2% de los pasajeros emplean medios terrestres para movilizarse y el 56.3% de las mercancías es transportada mediante autotransporte de cargas a través de la red carretera de nuestro país (SCT, 2020).

Acorde con los datos actualizados de la Red Nacional de Caminos publicado por el Instituto Mexicano del Transporte, en el país existen 780,509 kilómetros de caminos, de los cuáles 174,779 kilómetros se encuentran pavimentados y dentro de esta cantidad aproximadamente el 29% corresponde a caminos federales, en donde predomina fuertemente el uso de pavimentos flexibles en alrededor del 95.4% (IMT, 2021).

Los pavimentos que conforman estas vías son sistemas multicapas complejos, no sólo porque cada capa que lo conforma cuenta con diferentes propiedades en su espesor y en los materiales empleados para su construcción, sino porque también están expuestas a una gran variedad de factores que tienden a deteriorar el pavimento a un ritmo mayor de lo previsto en su ciclo de vida, como lo son las sobrecargas vehiculares, los cambios bruscos de temperatura, la precipitación, la reflexión e incluso las condiciones atmosféricas.

En este contexto, empresas y profesionistas en esta área de la ingeniería han desarrollado e implementado una gran variedad de tecnologías que buscan mejorar desde su

construcción las propiedades mecánicas y geotécnicas de los pavimentos flexibles, es decir, aquellos conformados por capas de agregado pétreo seleccionados y en su parte superior coronados con una carpeta asfáltica.

Una de estas tecnologías son los geosintéticos, polímeros plásticos los cuales poseen una gran variedad de funciones no sólo en el área de geotecnia y vías terrestres, sino también en la ingeniería sanitaria y ambiental.

En términos de pavimentos, el refuerzo (que pueden proporcionar tipos de geosintéticos en específico) se refiere a la “habilidad de una intercapa para mejorar la distribución de la carga aplicada sobre una mayor área y compensar la falta de resistencia a la tensión en este sistema estructural” (Ibrahim et al., 2016). Con la mejora de este sistema multicapa, buscan la optimización de recursos y/o la ampliación de la vida útil del proyecto.

No obstante, pese a que la implementación de los geosintéticos en pavimentos flexibles data de la década de 1970 (Zofka et al., 2017) y ha dado resultados favorables, los mecanismos en su funcionamiento siguen sin esclarecerse, ha habido muy pocos intentos en la sistematización de este proceso de aplicación, por lo que resulta importante localizar cuáles propiedades del geosintético, y/o de los agregados pétreos del pavimento o del suelo adyacente, influyen objetivamente en el desempeño de esta tecnología.

Dada la amplia gama de aplicaciones de los geosintéticos en el rubro de las vías terrestres y por las diferentes condiciones que se presentan en el sistema multicapa de un pavimento flexible, esta investigación busca focalizar su objeto de estudio en los parámetros involucrados en los geosintéticos de refuerzo que se emplean para la estabilización de la

interfase entre la capa de subrasante y la capa de subbase (o base) del sistema de pavimento más común en la red de carreteras del país.

A lo largo de este documento, se relatará la justificación económica y social de esta investigación para explicar detalladamente el contexto de la problemática con las vías terrestres, específicamente con los daños en los pavimentos flexibles, y posteriormente se profundizará en la teoría de los geosintéticos (incluyendo características, tipos, fabricación y funciones) así como en sus mecanismos de trabajo cuando se emplean como refuerzo entre las capas de un pavimento. Dicho marco teórico concluirá con la recapitulación de la teoría de estabilización de suelos.

Tras ello, se explicará la metodología de esta investigación, así como sus alcances y limitaciones, la cual está basada en la revisión bibliográfica con estudios técnicos en donde se evalúa el desempeño de los geosintéticos en su función de refuerzo en pavimentos flexibles aunado con una comparación cuantitativa con la teoría abordada en la estabilización de suelos.

Posterior a un análisis de los resultados, se delimitarán las características de los geosintéticos de refuerzo que, en base a lo argumentado en la discusión, tienen una correlación importante con el desempeño de esta aplicación en vías terrestres, cerrando así con las conclusiones enfatizándose los puntos en que se puede brindar continuidad al tema en próximos estudios.

JUSTIFICACIÓN

La implementación de los geosintéticos de refuerzo como estabilización de subrasante no únicamente busca mejorar las propiedades de esta capa, sino que influye positivamente en las demás capas del sistema del pavimento disminuyendo la contaminación de finos en la capa superior y manteniendo en la medida de lo posible las propiedades de diseño de las capas.

Por más inversión que se coloque a las capas superiores (carpeta asfáltica, riegos de impregnación y liga, emulsiones, o la base), si las capas que conforman las terracerías no están en buenas condiciones el sistema multicapa empezará a presentar complicaciones antes de lo previsto en el ciclo de vida del proyecto.

Por ello, el conocer y ubicar las propiedades de los geosintéticos que permiten estabilizar la parte superior de las terracerías otorga a los productores y proveedores la información de las propiedades específicas que deben salvaguardarse por encima de las demás durante la producción y transporte de este material de refuerzo, optimizando así el sistema de producción y asegurando un mejor rendimiento en campo de este material y del periodo de vida de la vía terrestre, todo esto se verá reflejado en una disminución de los costos de operación de la vía terrestre y en la mejora de la calidad de la infraestructura carretera del país donde se implemente correctamente los geosintéticos para esta función.

OBJETIVOS

Objetivo general:

- Identificar las propiedades de los geosintéticos de refuerzo, puntualmente de geomallas y geotextiles tejidos, que estén vinculados al desempeño en la aplicación de la estabilización de la subrasante en pavimentos flexibles.

Objetivos específicos:

- Sintetizar en un documento la teoría de refuerzo de vías terrestres con geosintéticos en donde se contemplen las fallas en los sistemas de pavimentos flexibles y los mecanismos de interacción de los geosintéticos en la intercapa de interés.
- Proponer, a partir de las propiedades identificadas, una metodología experimental para futuras investigaciones con las que pueda corroborarse el desempeño de las variables propuestas en la función de estabilización de subrasante.
- Analizar la relación que guarda el sistema de producción de los geosintéticos de refuerzo con las propiedades identificadas dentro del objetivo general, considerando el material, la geometría, el proceso de fabricación y unión de los elementos, etc.

MARCO TEÓRICO

La comprensión de la problemática a tratar en este documento recae en la ubicación del lugar en el que interviene el objeto de estudio, los pavimentos. Acorde con Rico y del Castillo, un pavimento consiste en una serie de capas horizontales de materiales apropiados entre el nivel superior de terracerías a la superficie de rodamiento (1978), el cual debe proporcionar una superficie uniforme para transitar, poseer color y texturas adecuadas con las que proporciona fricción a la superficie y resistir la acción del tránsito y del intemperismo.

La función principal del pavimento es recibir y transmitir adecuadamente a las terracerías los esfuerzos producidos por las cargas de tránsito sin que se presenten deformaciones excesivas y procurando mantener condiciones de tránsito confortables y seguras.

Los pavimentos se dividen en dos grandes grupos acorde a su superficie de rodamiento: los pavimentos flexibles (una superficie elaborada con concreto asfáltico) y los pavimentos rígidos (con una superficie hecha de concreto hidráulico).

Un pavimento flexible consiste en una carpeta asfáltica colocada encima de capas granulares de materiales seleccionados encima de las capas de terracerías, la estructura de estos pavimentos puede ser un sistema multicapa, full-depth o sección invertida.

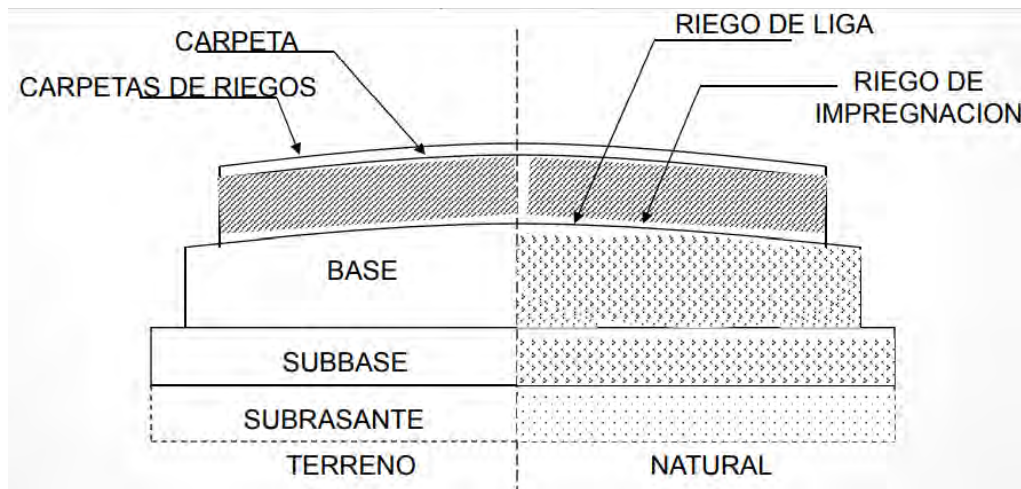


Figura 1.- Esquema general de un pavimento flexible (Reyes R. R., 2020).

Un pavimento rígido se trata de una losa de concreto colocada encima de la capa superior de las terracerías, por proceso constructivo se coloca una capa de calidad sub-base que únicamente cumple con funciones de drenaje y no aporta resistencia estructural al pavimento.

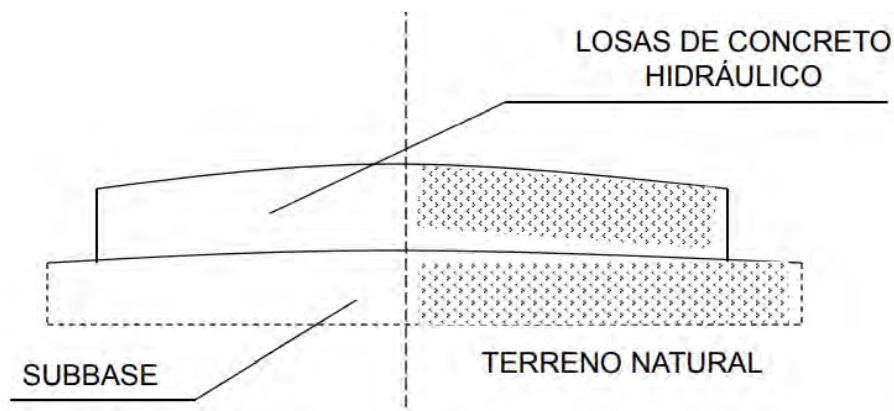


Figura 2.- Esquema general de un pavimento rígido (Reyes R. R., 2020).

Debido a que la mayor parte de las carreteras en México mantienen una estructura de pavimento flexible, el presente estudio se enfocará en dicho tipo de pavimento.

En un sistema de pavimento, mientras más cercana a la superficie se encuentra la capa requerirá de materiales de mayores especificaciones, y tanto el uso como el espesor de cada una de ellas estará en función de la intensidad de tránsito y demás parámetros contemplados en la metodología de diseño del pavimento. Un pavimento flexible de altas especificaciones se encuentra conformado por las siguientes capas, enlistadas de la más profunda a la más superficial:

- Terraplén: Consiste en suelos y fragmentos de roca que van del nivel de desplante a la subyacente, entre sus funciones están alcanzar los niveles necesarios para cumplir con las especificaciones geométricas del proyecto, resistir las cargas de tránsito transmitidas por las capas superiores y distribuir los esfuerzos para la transmisión de la carga al terreno natural.
- Subyacente: Capa compuesta de suelos y fragmentos de roca producto de cortes o la extracción de bancos, empleado inmediatamente encima de un terraplén. Dicha capa debe colocarse a partir de intensidades de tránsito de los 10,000 ejes equivalentes. Es una capa de transición que absorbe los esfuerzos que no absorbió la subrasante y así transmitir esfuerzos adecuados a las características del terraplén.
- Subrasante: Es la capa que corona a las terracerías, compuesta de suelos naturales, seleccionados y cribados productos de cortes y extracción. Sirve de desplante para la estructura del pavimento, de igual forma evita que los materiales finos plásticos del terraplén contaminen las capas del pavimento y evita que materiales de las capas superiores se introduzcan en las oquedades de los fragmentos de roca en la capa de terraplén. En la normativa del Instituto Mexicano del Transporte corresponde a la

primera capa, que especifica un tamaño máximo de agregado de 76mm, pero aun permite un porcentaje considerable de finos.

- Subbase: Primera capa de la estructura del pavimento la cual está conformada por material granular natural, cribado, parcialmente triturado, totalmente triturado y mezclado. Se coloca sobre la subrasante y forma una capa de apoyo para la base. La normativa establece requisitos para su granulometría estableciendo que la curva granulométrica para el material empleando en esta capa no debe presentar cambios bruscos en su pendiente. Una de sus principales funciones es de drenaje, buscando impedir que la humedad de las terracerías ascienda por capilaridad y en caso de que se introduzca agua de la parte superior, permite que descienda y se desaloje por efecto del bombeo y sobreelevación de las capas inferiores.
- Base: Capa ubicada entre la subbase y la carpeta asfáltica, conformada de materiales cribados, parcialmente triturados, totalmente triturados o mezclados. Al igual que la subbase debe proveer condiciones de drenaje adecuadas procurando mantener un porcentaje de finos menor al 5%. Dicha capa es la que recibe directamente las cargas de tránsito a través de la carpeta asfáltica y debe transmitir dichas cargas adecuadamente a las capas inferiores.
- Carpeta asfáltica: Es la capa comprendida entre la base con la superficie de rodamiento del pavimento, es la mezcla de agregado natural con material asfáltico y aditivos. Entre sus atributos deben estar presente: la capacidad de soportar cargas, resistencia adecuada al deslizamiento, regularidad superficial (longitudinal y transversal), rápida eliminación de agua superficial, adecuada reflexión luminosa,

apariciencia agradable, proporcionar bajo nivel de ruido y de desgaste en las llantas, etc.

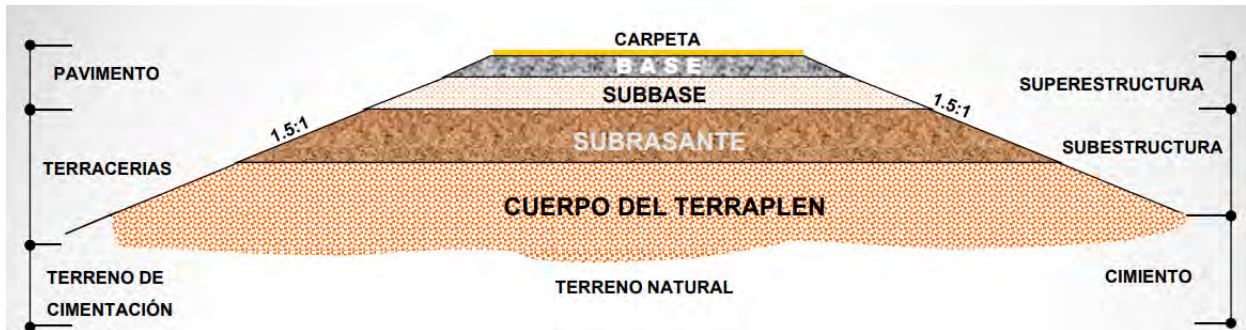


Figura 3.- Estructura de una carretera con pavimento flexible (Reyes R. R., 2020).

En lo que respecta al diseño de los pavimentos, este consiste en la definición adecuada de los espesores de cada una de las capas, así como establecer las características de cada una de estas y la forma es que se hará su adhesión. Este proceso parte del tránsito y sus cargas, el medio ambiente (temperatura, precipitación, etc.), los materiales que se tiene a la disposición, y los criterios de falla.

Antes de explicar cuáles son dichos criterios de falla en los pavimentos flexibles, se comentará acerca de las metodologías de diseño. Ciertamente existe una gran variedad debido a los tipos de métodos que se han desarrollado en las últimas décadas, en su inicio dichos métodos eran meramente empíricos, pero después se han ido incorporando metodologías basadas en el equilibrio límite, de deflexión límite, incluso de regresiones y así hasta llegar a los mecanicistas, de igual forma existen metodologías que son combinaciones de estos métodos mencionados.

Cabe destacar que un dato clave que está presente en las metodologías de diseño de pavimentos son los Ejes Equivalentes (EEA), es una unidad de daño producida por las cargas vehiculares determinada a partir del Tráfico Diario Promedio Anual (TDPA), la cantidad de carriles en la vía de interés, el sentido de circulación en dichos carriles, el tiempo de vida útil del proyecto, entre otros datos. Mediante esta variable se condensan los requerimientos de carga vehicular que debe soportar un pavimento durante su periodo de vida.

En cuanto a las propiedades de los materiales, son dos las que juegan un papel importante en varias de estas metodologías. La primera es el Valor Relativo de Soporte VRS (ó California Bear Ratio, CBR por sus siglas en inglés), es una medida de resistencia del agregado en capa compactada que es comparado con la resistencia estandarizada de un agregado calizo en California. El segundo es el Módulo de Resiliencia (MR), es un módulo elástico que mide la capacidad de recuperación de los materiales ante deformaciones debido a cargas repetidas, este se obtiene con una prueba en cámara triaxial.

A continuación, se describen tres metodologías de diseño de pavimentos conocidas en el país:

1.- Metodología del Instituto del Asfalto: Es un método que surgió en Estados Unidos y parte de conocer la temperatura del lugar, los ejes equivalentes y el módulo de resiliencia de la subrasante. A través de unos gráficos tomando como datos de entrada a las variables antes mencionadas, se interpola gráficamente el espesor de la capa de carpeta asfáltica que requiere el pavimento para condiciones dadas. Los espesores de las capas granulares (base, subbase) vienen estandarizadas, pero existen varios gráficos para esta metodología en función de tres temperaturas distintas y del tipo de base implementada en el proyecto

(granular y estabilizada). No obstante, la cantidad de escenarios se ve muy limitados al contemplar sólo tres temperaturas que son más típicas de Estados Unidos. Además, esta metodología de diseño tiende a proponer espesores de carpeta asfáltica muy elevados, por lo que su uso por las empresas es mínimo.

2.- Metodología de AASHTO-1993: Es un método mecánico-empírico sucesor de la metodología AASHO de 1958-1961, a partir de tramos de prueba en EUA con condiciones de suelo conocidas se estudió el comportamiento de diversas secciones ante el paso vehicular y de estas pruebas se planteó una ecuación basada en una regresión no lineal que contempla los ejes equivalentes, condiciones de servicio, el módulo de resiliencia de la capa evaluada y demás variables estadísticas.

En el proceso de diseño, a partir de la ecuación general se determina la variable SN (Número estructural) para toda la estructura del pavimento, una condición que debe cumplir la suma de todos los números estructurales de cada capa de esta estructura. Tras ello se determinan los coeficientes de cada capa del pavimento a partir de ecuaciones indicadas en el manual de diseño y en orden de la capa más superficial a la más profunda, se obtendrá el número estructural de cada capa (y un coeficiente de drenaje a partir de las capas granulares) con el cual se despeja el valor de espesor mínimo que requiere la capa del pavimento. Obteniéndose así los espesores de la capa de carpeta asfáltica, base y subbase.

Esta es una de las metodologías más empleadas por la cantidad de variables que intervienen en su desarrollo, no obstante, se debe recalcar que la ecuación general que se obtuvo en los estudios originales se rige bajo las condiciones puntuales de los tramos de prueba por lo que generalizar sus criterios y aplicarlos en otros lugares puede llevar a ligeras

discrepancias. Además, su metodología no contempla la evaluación ante deformaciones permanentes, únicamente el agrietamiento por fatiga.

3.- Método del Instituto de la Ingeniería de la UNAM: Es una metodología más mecanicista que las anteriores descritas, puesto que su base recae en las teorías para cálculos de esfuerzos, deformaciones y deflexiones contemplando la Teoría de Boussinesq y la Teoría Multicapa de Burmister aplicada a estructuras de pavimentos flexibles.

Dicho método se encuentra condensado en un programa llamado DIS-PAV, al cual se le debe ingresar información sobre el tipo del camino del proyecto, las condiciones de tráfico, el módulo de resiliencia y otras propiedades de las capas de los materiales, las condiciones de daño permitidas para el proyecto y demás variables estadísticas, para que proponga una estructura de pavimentos de hasta 5 capas a partir de una evaluación por deformación permanente, posteriormente el software verifica el diseño por fatiga (agrietamiento) e indica si cumple o no con los criterios de falla. En caso de no cumplir, permite modificar al momento los espesores de capas, los módulos de resiliencia de las capas o incluso el incorporar una base estabilizada hasta lograr el diseño óptimo, es decir, aquel que cumpla con los criterios de falla empleando los menores espesores posibles.

Debido a la automatización del proceso para cálculo y modificación, así como su fundamento menos empírico, esta metodología es la más empleada en el país. Aunque, la calidad de la información ingresada al programa por parte del diseñador debe estar respaldada por la comprensión de los conceptos teóricos detrás de esta metodología junto con una verdadera comprensión de los criterios de falla y la relación que guardan todas las variables involucradas para así asegurar un diseño adecuado.

Como se describió en las metodologías de diseño, un elemento fundamental que condiciona cada una de ellas son los criterios de falla, es decir, las condiciones de daño específicas que se permitirá que el pavimento sufra durante su periodo de vida útil antes de que llegue a condiciones de falla.

A diferencia del diseño de cimentaciones en donde se determina la capacidad de carga del suelo o la falla por cortante, debido a las cargas de menor magnitud a las que está sometido un pavimento (cargas vehiculares) lo que rige las condiciones estructurales y funcionales en el diseño son las deformaciones y el agrietamiento. Las fallas en los pavimentos pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- Fallas funcionales: Aquellas que se generan en la superficie de rodamiento o debajo de la misma llegando a afectar la circulación. Estas provocan incomodidad e inseguridad a los usuarios, así como daños a los vehículos.
- Fallas estructurales: Aquellas que se generan al interior de la estructura del pavimento que conlleve al colapso de la estructura de pavimento o de alguno de sus componentes, siendo incapaz de soportar las cargas e interrumpiendo su continuidad.

Existen una gran variedad de daños en los pavimentos flexibles que deben contemplarse a la hora de plantear un programa de gestión y mantenimiento de infraestructura carretera, no obstante, las principales fallas que son consideradas como criterios a la hora de diseñar un pavimento flexible son las siguientes:

- Agrietamiento por fatiga: Criterio relacionada al número de repeticiones permisibles para un nivel dado de deformaciones horizontales producidas por esfuerzos de tensión producidos en el lecho inferior de la carpeta asfáltica.
- Deformación permanente o rodera: Consiste en la deformación vertical que se da en el sentido longitudinal de la vía producida por los esfuerzos de compresión en la subrasante.
- Agrietamientos térmicos: Se incluyen los agrietamientos debido a las bajas temperaturas como al efecto de fatiga producido por el ciclo de variación de temperatura diaria, principalmente en asfaltos endurecidos.

Muchos son los factores vinculados al surgimiento de estos deterioros, pero en el país se ha detectado que una alta incidencia de daños en pavimentos flexibles se debe a: diseños por debajo de los requerimientos actuales en cuanto a espesores y calidad de los materiales, procedimientos constructivos y control de calidad inadecuados, conservación deficiente y sin planificación, mala calidad en las condiciones de drenaje, pero principalmente por el incremento en el tránsito en términos de volumen y magnitud de cargas (llegándose a presentar sobrecargas vehiculares en camiones y tractocamiones).

La complejidad de esta problemática ha conllevado a una gran variedad de estudios que buscan atribuir qué elementos específicos intervienen en cada uno de estos dos principales criterios de falla (rodera y agrietamiento). En el caso del agrietamiento, su presencia es contribuido en su totalidad por problemas que presenta la carpeta asfáltica, específicamente los daños causados por la acumulación repetida de esfuerzos o deformaciones. Mientras que,

para la rodera, cada capa del pavimento influye en la magnitud de este deterioro, desde la carpeta asfáltica, las capas granulares, las terracerías y el terreno natural.

Por ello, dos ejes centrales para contrarrestar la problemática de daños y deterioros en los pavimentos flexibles de nuestro país recaen en un buen diseño de mezcla asfáltica y, en el caso de las deformaciones permanentes, procurar las condiciones mecánicas y geotécnicas en cada una de las capas de la estructura del pavimento, por lo que la aplicación de un refuerzo en la interfase de un sistema multicapa de pavimento flexible es una medida que lleva varias décadas implementándose y que ha sido ampliamente estudiada en los últimos años, refiriéndose precisamente al refuerzo con geosintéticos. Por lo que a continuación se profundizará detalladamente en esta tecnología y los fundamentos de su aplicación como refuerzo y estabilización en las capas granulares de un pavimento flexible.

Los Geosintéticos

El término de Geosintético se compone de dos palabras:

- Geo. - Prefijo griego que significa tierra/suelo, involucrado en áreas de la ingeniería y geotecnia.
- Sintético. – Productos fabricados por procedimientos industriales o síntesis química.

La unión de ambos términos define el concepto de interés, siendo los geosintéticos aquellos productos desarrollados a partir de segmentos industriales (textiles, caucho, materiales plásticos, membranas bituminosas, etc.), para la transformación de polímeros

básicos (polietileno, polipropileno, nylon, fibra de vidrio) que puedan ser empleados para el mejoramiento en el comportamiento de los suelos.

Otra definición, acorde a las ASTM D4439 Standard Terminology for Geosynthetics, indica que el geosintético es “un producto plano fabricado a partir de material polimérico utilizado con suelo, roca, tierra u otro material relacionado con la ingeniería geotécnica como parte integral de un producto hecho por el hombre, estructura o sistema.”

La idea de agregar materiales obtenidos de la naturaleza a los suelos, como madera, raíces, bambú, ramas, etc., para mejorar las propiedades de estos ha estado desde los primeros capítulos de la humanidad. Algunos de estos ejemplos de aplicación en la antigüedad se remontan a las construcciones de Mesopotamia y China cuyas murallas tenían en su interior mezclas de suelos reforzados con raíces.

Un marco inicial para el uso de los geosintéticos ha sido el uso de mantas de algodón como refuerzo de pavimentos asfálticos en Carolina del Sur en el año de 1926. Con el auge en la fabricación de polímeros sintéticos en la década de 1940 el uso de los geosintéticos se hizo más frecuente, llevando en la década de 1950 el desarrollo de técnicas de producción de geotextiles tejidos y posteriormente de geotextiles no tejidos (en la década de 1960).

El empleo de los geosintéticos en la ingeniería civil ha incrementado en los últimos años, tomando cada vez un papel más importante en la industria de la construcción. Su rápido crecimiento en las últimas 4 décadas se debe principalmente a las siguientes características favorables:

- No corrosividad.

- Altamente resistente a la degradación química y biológica.
- Durabilidad a largo plazo bajo la cubierta del suelo.
- Alta flexibilidad.
- Ligereza.
- Fáciles de transportar y almacenar.
- Simplicidad de instalación.
- Proporcionan buen aspecto estético a la estructura.

Por ello se emplea en una gran variedad de aplicaciones dentro de la ingeniería geotécnica, transporte, recursos hídricos, ingeniería ambiental, y costera para lograr beneficios económicos y técnicos.

Esta importancia no sólo se debe al aumento que este concepto representa en el presupuesto total de las obras, sino también a la importancia de las responsabilidades técnicas para las cuales son diseñados. Resultando importante entender el fundamento químico de los geosintéticos en el área de los polímeros para comprender el origen de las propiedades físicas y mecánicas de estos materiales.

Polímeros: Materia Prima

La palabra polímero proviene del griego “poli” que significa muchos y “meros” que significa partes, por ello, un material polímero consiste en varias partes unidas para formar un entero, y cada una de estas partes se le conoce como monómero. Los monómeros y la repetición de sus unidades moleculares son diferentes debido al proceso de polimerización, el número de

locales donde una molécula monomérica puede ligarse a otras moléculas monoméricas (conocido como funcionalidad) determina el tipo y largo de la cadena polimérica.

Acorde a su geometría, los polímeros empleados en la fabricación de los geosintéticos son:

- Polímeros amorfos: Aquellos en donde las moléculas no presentan ningún tipo de orden, creando unos huecos por donde pasa la luz dándole transparencia al material.
- Polímeros semi-cristalinos: Aquellos compuestos por zonas con un determinado orden en la unión de sus moléculas y zonas amorfas. En este caso, al tener un orden existen menos huecos entre cadenas por lo que no pasa luz a no ser que posean un espesor pequeño.

El peso molecular de un polímero es el número de veces que ocurre la repetición de una unidad (grado de polimerización) multiplicado por el peso molecular de la unidad repetida. El peso molecular promedio y la distribución estadística son muy importantes en el comportamiento resultante del polímero, es decir, con el aumento en el peso molecular promedio se obtiene:

- Aumento en la resistencia del textil
- Aumento en la elongación
- Aumento en la resistencia de impacto
- Aumento en la resistencia al agrietamiento
- Aumento en la resistencia al calor
- Reducción de la capacidad de escurrimiento

- Reducción en la procesabilidad

La fabricación de los polímeros generalmente es realizada por compañías químicas o petroquímicas que producen polímeros en forma de hojuelas o gránulos sólidos conocidos como pellets. La mayoría de los polímeros empleados en la fabricación de los geosintéticos son aquellos que presentan solamente un tipo de monómero y son conocidos como “homopolymers”. Sin embargo, hay otras variantes que buscan expandir las propiedades estructurales de un polímero con su fabricación a partir de dos o tres unidades, denominados copolymers o terpolymers respectivamente.

Pese a esta amplia variedad de opciones y que en el mundo se fabrican aproximadamente 50,000 de polímeros diferentes, comúnmente se emplean los siguientes polímeros en la fabricación de los geosintéticos:

- Polietileno (PE)
- Polipropileno (PP)
- Cloruro de Polivinilo (PVC)
- Poliéster (PET)
- Nylon o Poliamida (PA)
- Poliestireno (PS)

Un material que últimamente se ha empleado más para fabricar estos productos es la fibra de vidrio. La decisión de cuál geosintético emplear a partir de su material depende normalmente de las condiciones en sitio donde se colocará el material, por ejemplo, el pH

del suelo reacciona de diferentes maneras con los diferentes polímeros listados, llegando a degradar algunos y no afectar a otros porque son inertes.

El proceso en la fabricación de los geosintéticos tiene influencia a partir de las propiedades de los polímeros de los cuales se fabrica. Entre algunos efectos asociados al proceso de fabricación se encuentra el pre-estiramiento y el porcentaje de cristalización del polímero, ya que condicionan las características de resistencia a la tracción de las fibras o filamentos, influyendo también en el comportamiento a fluencia (creep), y los aditivos mejoran su durabilidad.

Entre los procesos de degradación que puede sufrir un polímero se encuentran: la temperatura, la oxidación (las poliolefinas como el polipropileno y el polietileno son más susceptibles), la hidrólisis (en pH elevados el poliéster es más susceptible), los rayos UV (el polipropileno es más susceptible), los agentes químicos, los agentes biológicos, etc. La complejidad en estos procesos de degradación involucra una serie de factores que requiere de la correcta asesoría desde el proyecto hasta la aplicación de los materiales.

Los geosintéticos han demostrado tener varias ventajas en su aplicación para fines ingenieriles, entre ellas destacan las siguientes:

- Tienen un funcionamiento predecible
- Las teorías para su diseño son conocidas
- Ahorro en espacios, volúmenes y tiempos de construcción
- Fácil control en la fabricación y colocación
- Continuidad sobre grandes áreas

- En varias ocasiones tienen a representar una alternativa más económica frente a las soluciones tradicionales.

Antes de profundizar en la aplicación de esta tecnología en el rubro de interés de esta investigación, es necesario recapitular los diferentes tipos de geosintéticos existentes junto con las funciones que desempeña cada uno de estos.

Tipos de Geosintéticos

La familia de los geosintéticos está compuesta de la siguiente manera, marcándose entre paréntesis su simbología:

- Geotextiles (GT)
 - Geotextil tejido (GTW)
 - Geotextil no tejido (GTN)
- Geomallas (GG)
 - Geomalla extruida (GGE)
 - Geomallas por adhesión (GGB)
 - Geomalla tejida (GGW)
- Geomembranas
- Georredes (GN)
- Geomcompuestos
- Geomantas (GA)
- Geoceldass (GL)

Geotextiles

Son productos sintéticos y permeables utilizados principalmente en aplicaciones de ingeniería y geotecnia. Se subdividen en:

Geotextiles Tejidos

Son estructuras planas y regulares producidas a través del entrelazamiento, generalmente en ángulos rectos, de dos o más juegos de hilos en dos direcciones preferenciales que constituyen los hilos de urdiembre (paralelos al sentido de producción) y los hilos de la trama (perpendiculares a los hilos de urdidura). En función de la selección de las fibras los geotextiles tejidos pueden subdividirse en Monofilamente, Multifilamento y Bandaleta (son cintas achatadas). Este tipo de geotextil ofrece una alta resistencia presentando bajos niveles de deformación unitaria (del 2 al 5%).

Geotextiles no tejidos

Son estructuras planas formadas por fibras o filamentos orientados aleatoriamente e interligados por procesos mecánicos, térmicos o químicos.

En el proceso mecánico el entrelazamiento de fibras se da por medio de agujas dentadas, en el proceso térmico la liga de las fibras es mediante la fusión parcial por calentamiento, mientras que el proceso químico consiste en la unión de las fibras empleando productos químicos como resinas.

Los geotextiles no tejidos también se diferencian por la longitud de las fibras, pudiendo ser continuas o cortas. No obstante, este tipo de geosintéticos no genera

resistencias altas hasta que alcanza una deformación unitaria elevada (alrededor del 50%) por lo que sus aplicaciones se ven restringidas en el área del refuerzo y se enfocan en la función de filtración, protección y separación.

Los geotextiles son fabricados con varios tipos de polímeros, pero cada uno tiene una mayor o menor participación en el mercado acorde con las costumbres de consumo en cada país. Se estima que en el mundo aproximadamente el 85% de los geotextiles se fabrican de polipropileno, el 12% de poliéster, el 2% de polietileno y el 1% restante de poliamida.

Para su fabricación, el polímero seleccionado se transforma en un fundido por calor o presión y después se coloca en un molde. Del molde salen fibras o una cinta plana en estado semilíquido e inmediatamente se enfría con agua o aire para volverlo un sólido con la cualidad de elongable, paralelo a este proceso el material se estira para reducir sus dimensiones en ancho y espesor para ocasionar un ordenamiento en sus moléculas. Así, se forman filamentos con resistencia en el sentido longitudinal, la modificación de los procesos deriva a una variedad de posibilidades en el comportamiento esfuerzo – deformación del geotextil.

Los principales filamentos empleados en la construcción de este geosintético son los monofilamentos cortados (fibra cortada), multifilamento (filamento continuo), hilos de fibra, hilos de filamento continuo entrelazados, hilos de multifilamento entrelazados y cinta plana ranurada.

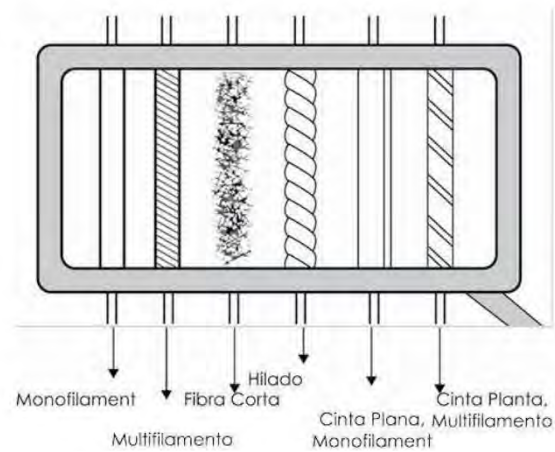
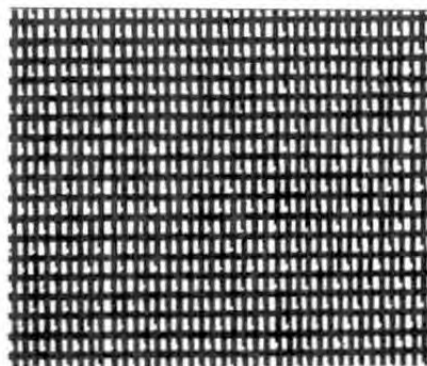
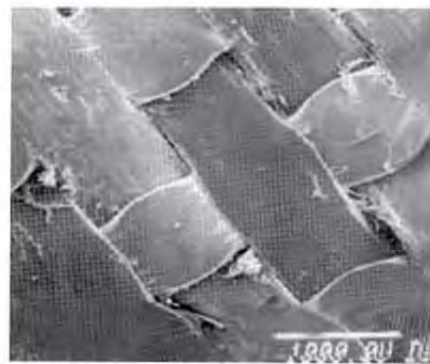


Figura 4.- Tipos de filamentos en geotextiles (PAVCO, 2012).

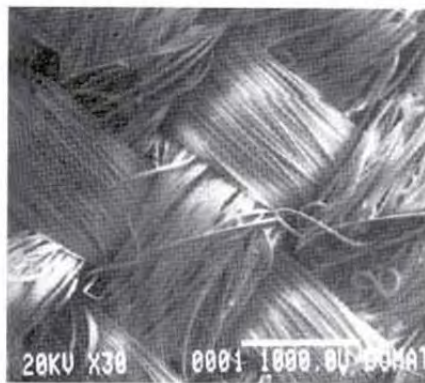
En las siguientes 4 imágenes se muestra a nivel microscópico los diferentes ejemplos de filamentos en los geotextiles tejidos:



a. Monofilamento Tejido



b. Monofilamento Tejido calandrado



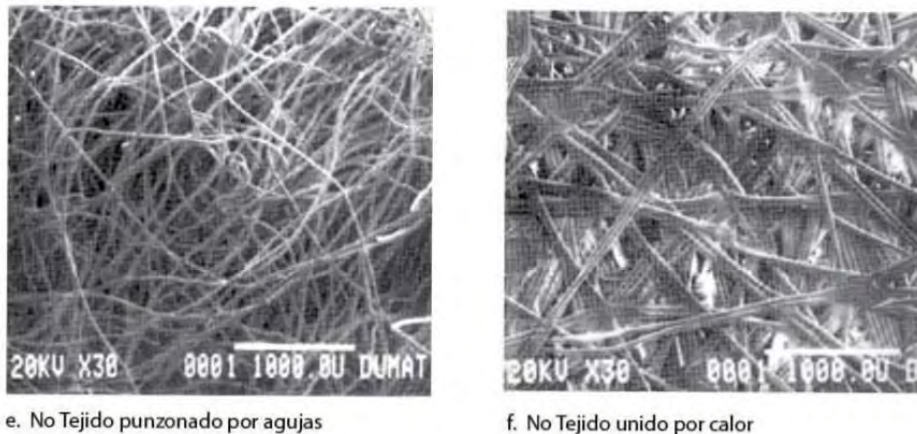
c. Multifilamento Tejido



d. Tejido Plano

Figura 5- Geotextiles tejidos a escala microscópica (PAVCO, 2012).

En las siguientes dos imágenes a escala microscópica se muestran ejemplos de los filamentos en geotextiles no tejidos.



e. No Tejido punzonado por agujas

f. No Tejido unido por calor

Figura 6- Geotextiles no tejidos a escala microscópica (PAVCO, 2012).

Hay una gran cantidad de funciones asociadas a los geotextiles, entre ellas destacan: filtración, separación/estabilización, protección, refuerzo, control de erosión, impermeabilización, etc.

Geomallas

Son estructuras formadas por una red rectangular de elementos conectados integralmente, que pueden ser fijados por extrusión, adhesión o entrelazamiento, cuyas aberturas son mayores que sus componentes. Las geomallas tienen como mecanismo fundamental de funcionamiento la fricción, pudiendo contar algunos tipos de geomallas con el efecto confinante de las partículas del suelo que se alojan en sus aberturas. Las geomallas pueden ser de los siguientes tipos:

Geomallas co-extruidas

Son estructuras planas fabricadas de materiales poliméricos, normalmente de polietileno de alta densidad (HDPE) a través de un proceso de extrusión y un sucesivo

estiramiento. Están conformadas por una red angular de costillas conectadas de forma integrada con aberturas de suficiente tamaño para permitir la trabazón del suelo, piedra u otro material geotécnico circundante. Su principal función es como material de refuerzo. Se clasifican principalmente en dos tipos:

Mono-orientada o unidireccional: Es una geomalla con una distribución uniforme de largas aberturas elípticas, desarrollando una gran fuerza a la tensión en la dirección longitudinal, llegando a soportar entre 60 a 200 kN/m. Debido a su material son totalmente inertes a las condiciones químicas y biológicas que se presentan en el suelo.



Figura 7- Geomalla extruida unidireccional (PAVCO, 2012).

Bi-orientada o bidireccional: Es una geomalla con una estructura uniforme de espacios rectangulares de alta resistencia a la tensión en ambas direcciones (rango de 20 a 30 kN/m) y un alto módulo de elasticidad. Este tipo de geomallas co-extruidas se componen de elementos y nudos rígidos que proveen un gran confinamiento. Son efectivos en el refuerzo de estructuras de pavimentos rígidos o flexibles.



Figura 8- Geomalla extruida bidireccional (PAVCO, 2012).

En cuando al proceso de fabricación para ambos tipos de geomallas co-extruidas, inicialmente se tienen láminas de material en el que se realizan unas perforaciones, cuadradas o elípticas, de forma uniforme y controlada sobre toda la lámina. Según sea el caso, la lámina perforada recibe estiramiento en una o dos direcciones, el cual se realiza a temperaturas y esfuerzos controlados para evitar la fractura del material mientras se orientan las moléculas en el sentido de la elongación.

Geomallas Tejidas

Son estructuras planas en forma de red fabricadas por el entrelazamiento (en ángulos rectos) de fibras sintéticas con un elevado módulo elástico, generalmente recubiertas por una capa protectora que también es de un material polimérico (generalmente PVC o polietileno).

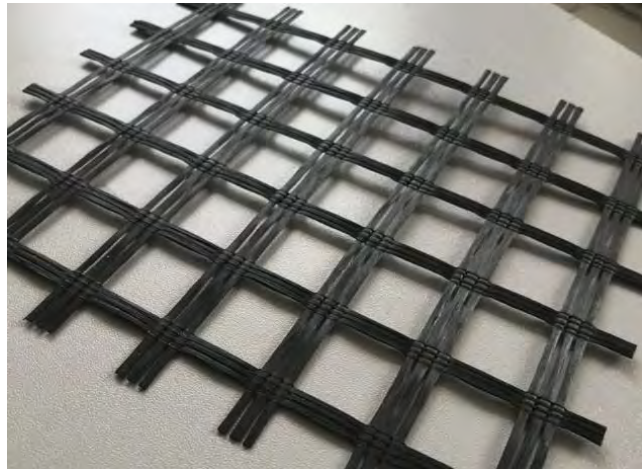


Figura 9- Geomalla tejida bidireccional (Feicheng Lianyi Engineering Plastics Co., Ltd, 2021).

Geomallas por adhesión o sobreposición de fibras (soldadas)

Son estructuras planas producidas por la sobreposición y la soldadura, formadas generalmente en ángulos rectos y un núcleo de poliéster de alta resistencia revestido por una protección de polipropileno. Es el tipo de geomalla más resistente a la tracción longitudinal alcanzando los 1200 kN/m.



Figura 10- Geomalla soldada bidireccional (Environmental XPRT, 2021).

Pese a los tipos de geomallas previamente comentados, hay otra forma de clasificarlas en los siguientes dos grupos:

Geomallas convencionales: Son formadas por cintas de un único material obtenidos a través del estiramiento de membranas extruidas y posteriormente perforadas, o directamente extruidas y luego estiradas. Se representan con una estructura muy abierta.

Geomallas compuestas: Formadas por fibras de alta resistencia revestidas por un segundo polímero, donde las fibras definirán las características de resistencia y el segundo polímero proporcionará la protección contra el deterioro de las fibras.

Georredes

Geosintético que consiste en una serie de tiras poliméricas paralelas conectadas íntegramente sobre otras series de tiras similares con ángulos variados. Tiene un espesor de 1 a 5mm, sus ángulos de conexión van de los 60° a 90°, son hechas normalmente de polietileno de alta densidad o polipropileno y su función principal es de drenaje, llegándose a aplicar en depósitos líquidos, túneles y muros de contención. Para evitar la intrusión de los materiales que serán drenados, las georredes siempre se utilizan en conjunto con geotextiles (como filtros) y las geomembranas (como elementos de retención).

Geomantas

Son estructuras constituidas por fibras, hilos o cintas de materiales sintéticos formado por una malla no regular deformable con un espesor de 10 a 20mm. Su arreglo enmarañado puede ser obtenido a través de la conexión térmica o mecánica de los materiales sintéticos. Son caracterizadas por tener un alto índice de vacíos (mayor al 90%).

Las geomantas no aportan resistencia mecánica, su aplicación está dirigida a colocarlas en pendientes (suaves o pronunciadas) para mejorar la resistencia contra la erosión

provocada por el impacto y flujo de la lluvia, garantizando el crecimiento de la vegetación y por ende una capa de refuerzo superficial del suelo.

Geoceldas

Son celdas yuxtapuestas producidas por costura o soldadura de tiras de materiales sintéticos con una altura aproximada de 100mm, formando una estructura similar a una colmena. La principal función de este geosintético es la contención del terreno o de otros materiales sueltos colocados al interior de las celdas

Geotubos

Son tubos hechos de material sintético, generalmente PVC o HDPE, de superficie corrugada, lisa o perforada. Estos materiales son empleados para captar y conducir fluidos en sistemas de drenaje para una vasta gama de obras de ingeniería, como algunos ejemplos están: conductores en drenes de pavimentos, conductores en drenes de muros de contención, etc.

Geobloques

Son prismas rectangulares fabricados de materiales sintéticos livianos y resistentes, generalmente poliestireno expandido. Se emplean en la geotecnia para reemplazar el suelo con la finalidad de generar una disminución de cargas en la construcción de rellenos. Lo recomendable es recubrirlo para que agentes externos (como solventes) no los desintegren.

Geomembranas

Son geosintéticos de permeabilidad muy baja usados como barrera para el control de la migración de fluidos. La mayoría son fabricadas a partir de polímeros extruidos o co-extruidos como el HDPE, PP o PVC que son extruidos en hojas muy largas las cuales son

soldadas en el lugar de aplicación. Pueden ser plastoméricas, elastoméricas o bituminosas. Pueden emplearse en azoteas, piscinas, pero su uso principal recae en los rellenos sanitarios.

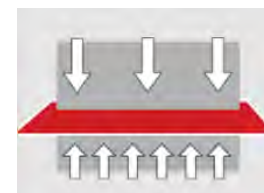
Geocompuestos

Es el nombre genérico para definir productos confirmados por la asociación de dos o más geosintéticos distintos. La filosofía para el desarrollo de estos materiales es combinar las mejores características de diferentes geosintéticos en la solución de un problema.

Funciones de los geosintéticos

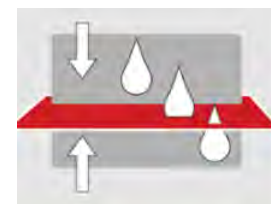
Al ser una gran variedad de geosintéticos, es importante tener focalizado las funciones que nos aportan cada uno de ellos, siempre realizan una o más de las siguientes funciones básicas cuando están en contacto con tierra, roca y/o cualquier material relacionado con la ingeniería civil:

- **Separación:** Se trata de la función más básica, y consiste en la prevención de la mezcla de suelos diferentes y adyacentes mediante el uso de un geosintético.



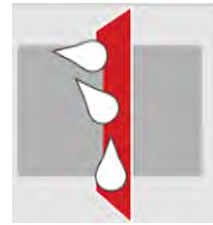
Nota 1

- **Filtración:** Consiste en la restricción para evitar la pérdida de partículas de suelos sometidas a fuerzas hidrodinámicas, pero permite el paso de los fluidos a través del geosintético.



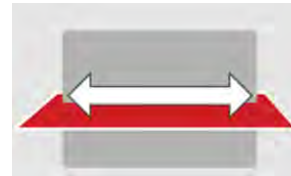
Nota 1

- **Drenaje:** Se presenta cuando el flujo del líquido a varias salidas del sistema es permitido, pero con una migración nula o limitada de partículas de suelo dentro de su plano desde la masa de suelo circundante.



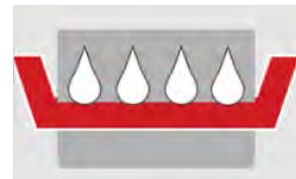
Nota 2

- **Estabilización y refuerzo:** La presencia del geosintético actúa en estos casos como un elemento que al combinarse con el suelo produce un geo material con propiedades de resistencia a tensión y deformaciones mejorados sobre un suelo no reforzado.



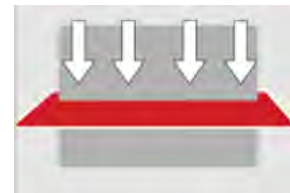
Nota 2

- **Impermeabilización:** Cuando el geosintético actúa como una membrana para evitar la migración de líquidos o gases durante la vida útil proyectada de la aplicación.



Nota 2

- **Protección:** Dicha función ocurre cuando se da un alivio o distribución de tensiones transmitidos de un material a otro con el geosintético en su interfase, y así protege al material de daños.



Nota 2

- **Funciones diversas:** A partir de las funciones básicas anteriores, los geosintéticos realizan otras funciones catalogadas como descripciones cualitativas que a pesar de no estar respaldadas por pruebas estándar, sus técnicas de diseño son implementadas,

como, por ejemplo: absorción, amortiguación, aislamiento, cribado, control de erosión, confinamiento, etc.

En la siguiente tabla se resumen todas las funciones que poseen estos materiales junto con los tipos de geosintético en específico que proveen cada una de dichas funciones.

Función	Descripción	Productos
Filtración	Permitir el pasaje de los fluidos, reteniendo la migración de las partículas de suelo.	Geotextiles, geocompuestos
Drenaje	Facilitar el transporte de fluidos	Georredes, geocompuestos
Separación	Evitar la mezcla de dos tipos de suelos diferentes o materiales diferentes	Geotextiles, geocompuestos
Protección	Evitar daños a una estructura, a un material o a otro geosintético	Geotextiles, georredes, geocompuestos
Impermeabilización	Formar una barrera a los fluidos	Geomembranas, geocompuestos
Refuerzo de muros y taludes	Proporciona resistencia a la tracción en el suelo	Geomalla unidireccional, geotextiles
Refuerzo de suelos blandos	Aumenta la capacidad de soporte del suelo	Geomalla bidireccional, geotextiles, geocompuestos

Refuerzo de pavimentos	Proporciona resistencia a la tracción y a la fatiga	Geomalla bidireccional, geotextiles
Control de erosión	Evita el desprendimiento y transporte de las partículas del suelo provocado por la lluvia, escurrimiento superficial y el viento	Geomantas, geoceldas, biomantas
Confinamiento	Retención del movimiento superficial del suelo	Geoceldas

Tabla 1.- Resumen de funciones de los geosintéticos (Elaboración propia).

Dado el planteamiento del problema de esta investigación, la aplicación enfocada al refuerzo en pavimentos y la estabilización para capas de pavimentos requiere de las funciones de refuerzo y separación, motivo por el cual se profundizarán en los mecanismos de trabajo de los tipos de geosintéticos que cumplen con estas funciones.

Características de los geosintéticos de refuerzo y Mecanismos de Interacción

La noción del refuerzo de suelos radica en la inclusión de elementos buenos en tensión que mejoran las características mecánicas del suelo. El problema se origina en que los suelos son materiales con una incontrolable variabilidad de características, pero el geosintético de refuerzo busca eliminar estos inconvenientes convirtiendo al suelo en un material de características predecibles. A través de esta función de refuerzo se crea un sistema mejorado

con la introducción del geosintético, un material que trabaja bien a tensión, dentro de un suelo, un material que trabaja bien a compresión.

Aquellos geosintéticos con los que se puede cumplir adecuadamente dicha función son los geotextiles tejidos y las geomallas, no obstante, debido a su geometría y características físicas presentan diferentes mecanismos de trabajo. Por ello, se describirán las características de los geosintéticos que influyen más en el desempeño de estos materiales para la función de refuerzo y posteriormente cada uno de los mecanismos de interacción-suelo geosintético.

Son dos las características principales que se comentarán en este apartado, la resistencia a la tensión y la rigidez del geosintético.

Resistencia a la tensión

Considerada como la propiedad más importante del geotextil que aparece como función primaria en aplicación de refuerzo. El ensayo básico para determinarla consiste en colocar el geosintético entre un juego de mordazas dentro de una máquina de ensayo mecánico y tensar el material hasta la falla de ruptura. Durante el ensayo se toman mediciones con la que se genera una curva de esfuerzo deformación, dicho esfuerzo está dado en unidades de carga por unidad de ancho.



Figura 17.- Ensayo a Tensión Grab (Instron, 2021).

De la curva de esfuerzo deformación se obtiene la siguiente información:

- Esfuerzo máximo (resistencia del geosintético)
- Deformación a la falla (elongación máxima)
- Tenacidad (trabajo por unidad de volumen antes de la falla)
- Módulo de elasticidad (la pendiente de la porción inicial de la curva)

Las normas ASTM que refieren a esta propiedad física son la ASTM D4632 (Método Grab) y ASTM D4595 (Muestra ancha).

Rigidez



Figura 18.- Geomalla colocada en campo (Geosintéticos Origo, 2021).

Es la flexibilidad que posee el geosintético a partir de la relación entre el peso de este material entre su resistencia a doblarse bajo su propio peso. Es una propiedad indicativa respecto a la capacidad para proveer una superficie de trabajo sobre suelos blandos, resultando un elemento clave si el geosintético se plantea usar para la función de estabilización.

El método utilizado para determinar este parámetro viene descrito en la ASTM D1398 y su valor normalmente es expresado en mg-cm.

Estas propiedades físicas junto con la geometría específica de cada geosintético de refuerzo definen en gran medida el comportamiento que presentará el material una vez sea colocado en sitio, resultando importante comprender cómo interactúa el geosintético al contacto con el suelo para tener un punto de partida en la medición del desempeño de estos materiales. Este documento abundará en cinco mecanismos de interacción suelo-geosintético, aunque en próximos apartados se hará énfasis en unos mecanismos más que en otros, estos son: mecanismo de membrana, mecanismo de trabazón, mecanismos de capacidad de carga, mecanismo de corte y mecanismo de anclaje. Cada uno de estos se explica a continuación:

Mecanismos de membrana

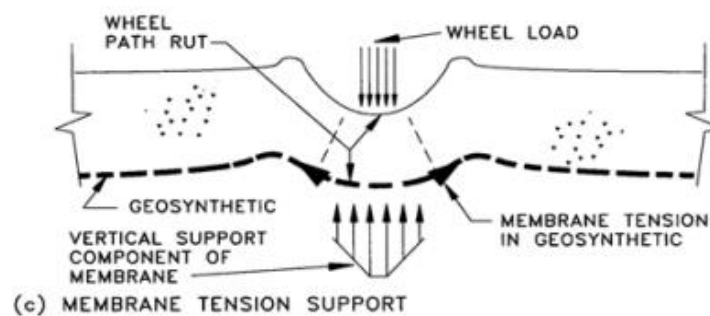


Figura 18- Posibles funciones de refuerzo provistos por geosintéticos en camino para soporte de membrana a tensión (Holtz et al, 2008, after Haliburton, et al., 1981).

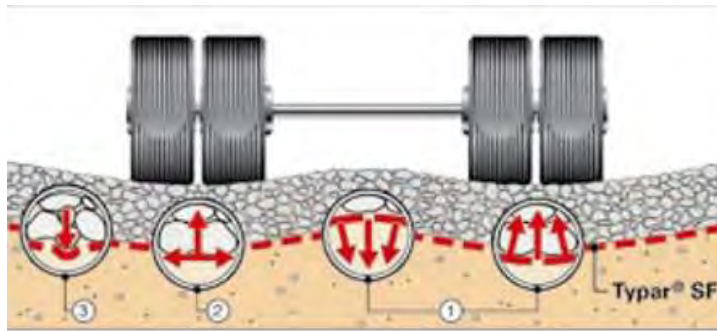
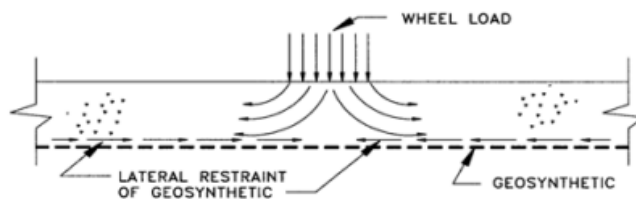


Figura 19- Mecanismo de membrana (Cymper, 2015).

Este mecanismo predomina principalmente en los geotextiles tejidos, en donde la aplicación de la carga produce tensiones en la parte inferior del geosintético y así inicia a trabajar ya que se origina una reacción a estos esfuerzos de tensión. Simultáneamente, a los costados de la zona del geosintético en donde se aplica la carga, se produce una reacción hacia abajo que se considera como una sobrecarga q , esto restringe la superficie de falla y termina mejorando la capacidad portante de la interfase dividida por el geosintético.

Este mecanismo se rige por la fricción entre el material con el geosintético y su implementación es más deseada en capas de materiales con calidad de subrasante, al presentar particular de menor granulometría respecto a las capas superiores del pavimento.

Mecanismo de trabazón mecánica



(a) LATERAL RESTRAINT

Figura 20- Posibles funciones de refuerzo provistos por geosintéticos en camino para confinamiento lateral (Holtz et al, 2008, after Haliburton, et al., 1981).



Figura 21- Esquema de confinamiento lateral del agregado en geomalla (PAVCO, 2020).

Es un mecanismo que se da específicamente en las geomallas, en este la penetración parcial de las partículas del agregado en las aperturas del geosintético genera un estado de confinamiento lateral en esta interfase reforzada, la cual previene el desplazamiento horizontal y vertical de las partículas de relleno cuando se aplica de una carga sobre la capa de material.

Dada su naturaleza este mecanismo funciona a partir de la trabazón y su uso resulta más favorable para reforzar capas granulares de la estructura del pavimento, subbase y base. No obstante, se debe procurar un estado de confinamiento para que el mecanismo se desarrolle adecuadamente ya que una separación granular resta rigidez al sistema.

Mecanismo de Distribución de Carga.

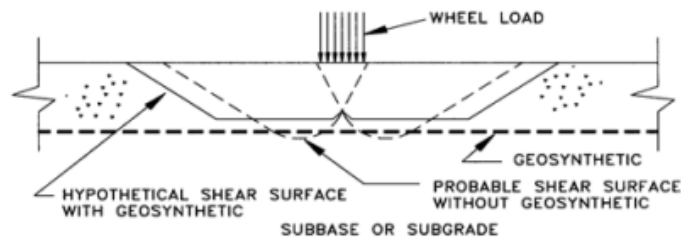


Figura 22.- Posibles funciones de refuerzo provistos por geosintéticos en camino para distribución de carga (Holtz et al, 2008, after Haliburton, et al., 1981).



Figura 23.- Analogía del mecanismo de distribución de carga en zapatos de esquí (Stock Photo 123 RF, 2021).

En este mecanismo, la colocación del geosintético de refuerzo amplía el área en la cual se distribuyen las cargas aplicadas en la superficie y se da una mejor distribución de los esfuerzos, generando un menor estado de carga en la capa por debajo del geosintético.

Este mecanismo es análogo a lo que sucede cuando un esquimal emplea un calzado más amplio al convencional para poder caminar encima de las capas de nieve para hundirse menos al dar cada uno de sus pasos puesto que la presión vertical es distribuida en un área más grande.

Mecanismo de corte

Este mecanismo se da cuando el geotextil es colocado sobre un suelo con carga de compresión en la dirección normal y luego ambos materiales son cortados en su interfase. Mediante la adaptación de la prueba de corte directo es que se puede estudiar el comportamiento de la fricción suelo-geotextil. Con la comparación de la respuesta de la prueba hecha en una interfase suelo-suelo y en una interfase geosintético-suelo es que se pueden obtener las eficiencias de las resistencias al corte en términos de la cohesión y el ángulo de fricción del suelo.

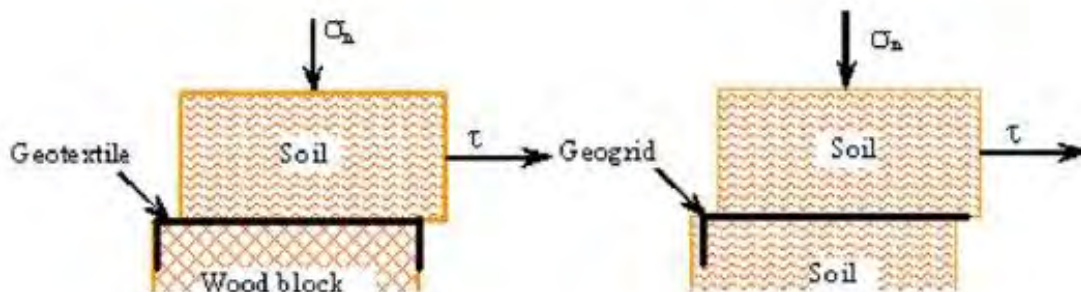


Figura 24.- Diagrama de suelo-geosintético en prueba de corte directo (Abu-Farsakh et al., 2007).

Relacionando los parámetros de resistencia al corte (c y φ) con los parámetros anteriores se pueden calcular las eficiencias:

$$E_c = \left[\frac{Ca}{c} \right] \quad E_\varphi = \left[\frac{\tan \delta}{\tan \varphi} \right] * 100$$

Donde:

- E_c = Eficiencia en cohesión
- E_φ = Eficiencia en fricción
- Ca = Adhesión del suelo al geosintético.
- c = Cohesión del suelo
- δ = Ángulo de resistencia cortante suelo-geosintético
- φ = Ángulo de resistencia cortante del suelo

Mecanismo de Anclaje (Pull-out)

Es un mecanismo similar al del corte, pero en este el suelo actúa en ambos lados del geosintético contra una fuerza que tiende a jalarlo hacia fuera. Este parámetro se obtiene de una prueba de laboratorio en donde el geosintético es confinado en un bloque de suelo y se le aplica una fuerza para extraerlo, a partir de la carga de falla (cuando se da el arrancamiento) se determina la adherencia del geosintético en ambos lados.

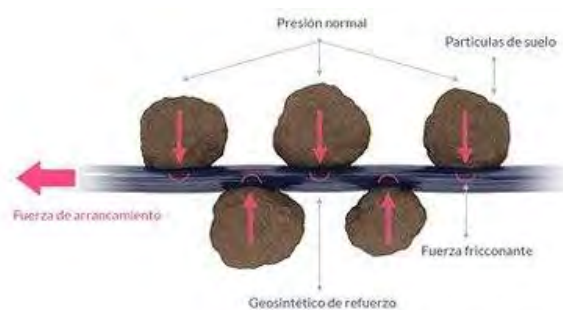


Figura 25- Fuerza de arrancamiento en geosintéticos (Geomatrix, 2016).

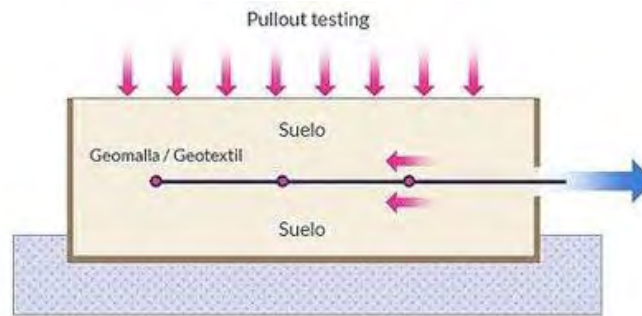


Figura 26.- Prueba de arrancamiento ASTM D6706 (Geomatrix, 2016).

Siendo entonces la resistencia propia del geosintético confinado a ser arrancado, la variable que se mide en esta prueba es el coeficiente de interacción del geosintético con el suelo ensayado y se despeja de la siguiente ecuación:

$$T = 2 * C_i * L_e * \sigma_n' * \tan \varphi'$$

Donde:

- T = Capacidad de anclaje por unidad de ancho (kN/m)
- C_i = Coeficiente de interacción adimensional
- L_e = Longitud de empotramiento de la geomalla
- σ_n' = Esfuerzo normal efectivo aplicado en el geosintético (kPa)
- φ' = Ángulo de fricción efectiva en el suelo ($^{\circ}$).

Dicha expresión aplicada para suelos granulares, y para su aplicación en vías terrestres el material es granular, pero para suelos cohesivos dicha expresión se modifica.

Valores MARV

Una vez aterrizadas las cuestiones teóricas de las propiedades de los geosintéticos y los mecanismos por los cuales operan aquellos empleados en la función de refuerzo, es de interés para este estudio comentar la particularidad que los proveedores de geosintéticos han

implementado a la hora de especificar las propiedades de sus productos en las fichas técnicas para garantizar una confiabilidad adecuada en la implementación de estas tecnologías.

En las especificaciones, las entidades indican las propiedades mínimas requeridas del geosintético para una determinada aplicación (llámese refuerzo, drenaje, filtración) y muchos fabricantes acostumbraban a poner en sus catálogos los valores promedios de las propiedades medidas en pruebas de laboratorio de los geosintéticos. No obstante, el valor promedio de una propiedad dada, dentro de un lote, es el valor para el cual un 50% de valores está por encima y el 50% está por debajo, ciertamente esto es un índice de confiabilidad bajo.

Por lo que se inició a determinar estadísticamente un valor intermedio entre estos dos puntos, el valor promedio y el valor mínimo, conocido como MARV (Minimal Average Roll Value por sus siglas en inglés), el cual se considera como el número representativo de ensayos realizados en rollos seleccionados de geosintéticos de un lote en específico.

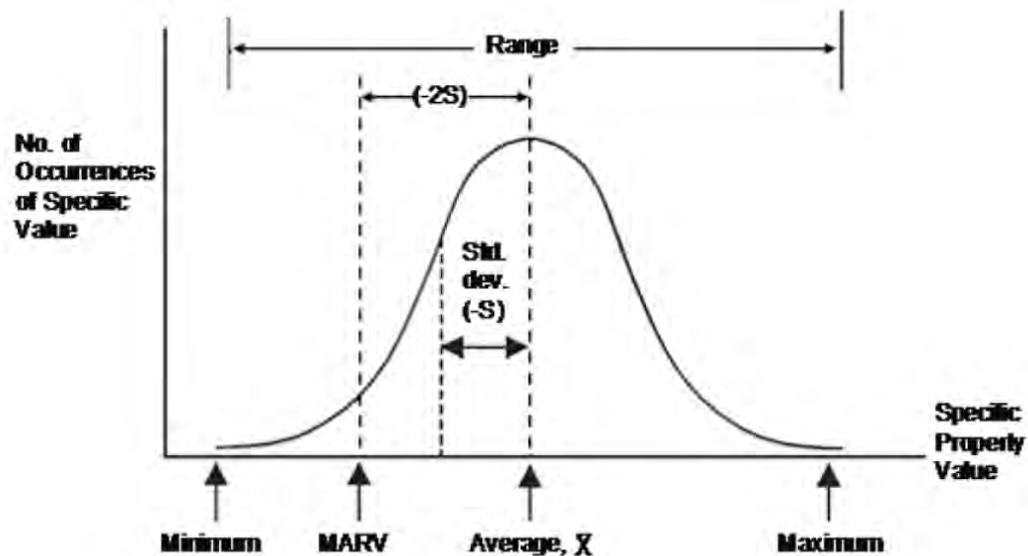


Figura 27.- Ubicación de MARV en una distribución normal (PACVO, 2012).

La obtención del valor MARV es mediante la resta de dos desviaciones estándar al valor promedio, de esta manera se obtiene un 2.5% de cada lado de la distribución normal y con ello se logra una certidumbre del 95%. Es así como se pasa de una confiabilidad del 50% usando los valores promedios a una del 95% empleando los valores MARV para reportar una propiedad del geosintético en sus fichas técnicas.

Por ello, cuando se reciba la ficha técnica de un proveedor de geosintéticos, se debe verificar que todos los valores reportados para las propiedades de los productos sean valores MARV y así se tiene un elevado grado de certeza de que las propiedades de los especímenes empleados cumplirán con lo solicitado para la función del geosintético.

Diseño con Geosintéticos para la función de refuerzo

El fundamento para la selección del geosintético de refuerzo para determinado proyecto parte de un mismo principio: se establece un factor de seguridad global a partir de la resistencia a la tensión permisible entra la resistencia a la tensión requerida.

$$F.S. = \frac{T_{perm}}{T_{req}}$$

La resistencia a la tensión requerida se obtiene partir de las condiciones geométricas y geotécnicas de la obra, con la que se calcula una tensión requerida del geosintético en la obra.

Mientras que la resistencia permisible se obtiene dividiendo la resistencia última del geosintético, tomada del valor MARV reportada en la ficha técnica, entre varios factores de reducción que varían en función del área de aplicación del geosintético en sitio. Dichos factores de reducción buscan incorporar la degradación de las propiedades mecánicas del

geosintético tras su colocación en sitio, pese a que diferentes autores plantean varios tipos de factores de reducción, estos pueden condensarse en tres grandes grupos:

- Factor de reducción por daños de instalación
- Factor de reducción por creep
- Factor de reducción por degradación química-biológica

El primer factor contempla el daño que puede sufrir el geosintético a causa de errores humanos desde su transporte, almacenamiento y el cuidado con la técnica durante su colocación. El segundo factor busca abarcar la afectación que sufre el geosintético en cuanto a su elongación bajo cargas constantes, en otras palabras, su deformación con el paso del tiempo, su evaluación es importante porque los polímeros son materiales sensibles a esta sollicitación. Por último, el tercer grupo de los factores de reducción contempla las afectaciones que sufre el material ante la reacción con los compuestos químicos o microorganismos presentes en el material que esté en contacto con el geosintético.

Los rangos recomendados en los factores de reducción difieren entre las geomallas y los geotextiles. La selección acertada de estos valores de reducción se da conociendo las condiciones del suelo en el sitio del proyecto y el material que conforma a los geosintéticos, pero en caso de carecer de una información en específico, el diseño con geosintéticos selecciona habitualmente aquel escenario crítico con el valor máximo en el rango de los factores de reducción.

Tras esta explicación de los mecanismos de interacción de los geosintéticos de refuerzo con el suelo y los criterios ingenieriles empleados en el diseño con geosintéticos, se

profundizará en la teoría detrás de la aplicación de interés en este trabajo de investigación, la estabilización en la interfase de capas granulares de un pavimento flexible.

Estabilización de suelos con geosintéticos

La estabilización con geosintéticos es un proceso físico (por la combinación de materiales) y mecánico (por la interacción de cargas). El geosintético es colocado dentro de las interfaces de suelos con diferentes propiedades mecánicas y físicas que en conjunto con el agregado conforman una sección estabilizada.

Las funciones de los geosintéticos que vienen implícitas con la función de estabilización de suelos son la separación, filtración y la propia estabilización. Los geosintéticos empleados para este proceso son los mismos que funcionan óptimamente en el refuerzo de pavimentos: los geotextiles tejidos, las geomallas biaxiales y las geoceldas; pero, por alcances de la investigación, únicamente se abordará en este documento el desempeño de los primeros dos geosintéticos mencionados para esta función.

Como se ha mencionado en apartados previos, el objetivo de incorporar estos materiales poliméricos es proporcionar la resistencia a la tensión que los suelos por sí solos no tienen. Además, con el proceso de estabilización se brinda una plataforma adecuada de trabajo para la colocación de capas superiores, disminuye la compresibilidad de la capa y disminuye la erosionabilidad.

Para la metodología de diseño de geosintéticos para la estabilización de suelos, una propiedad indispensable que debe conocerse del suelo a mejorar es su CBR. Manuales de Diseño de Geosintéticos recomiendan que suelos con CBR menores al 3% son los que

forzosamente deben diseñarse bajo la función de estabilización y separación, mientras que aquellos con un CBR mayor al 3% recomiendan diseñar únicamente por separación.

No obstante, la colocación de geosintéticos de refuerzo para la estabilización de las capas granulares trae ventajas al mejorar las propiedades de las capas de material en la interfase donde se ubique el geosintético y así disminuir las deformaciones permanentes. Por ello, a continuación, se describirá la teoría en que se basa la metodología de diseño con geosintéticos para estabilización de suelos más reconocida y así entender el proceso con el que puede medirse numéricamente el desempeño de estas tecnologías para esta aplicación.

Esta metodología es la de Giroud-Han (2004) cuya ecuación general de diseño está basada en la comparación de dos estructuras, la primera diseñada sin refuerzo (una estructura de control) y la segunda estabilizada con un geosintético de refuerzo. Con la comparación inicial de dicha tecnología se hizo un análisis matemático, después se efectuaron pruebas de laboratorio con este modelo de las dos estructuras y tras ello se realizaron pruebas en campo.

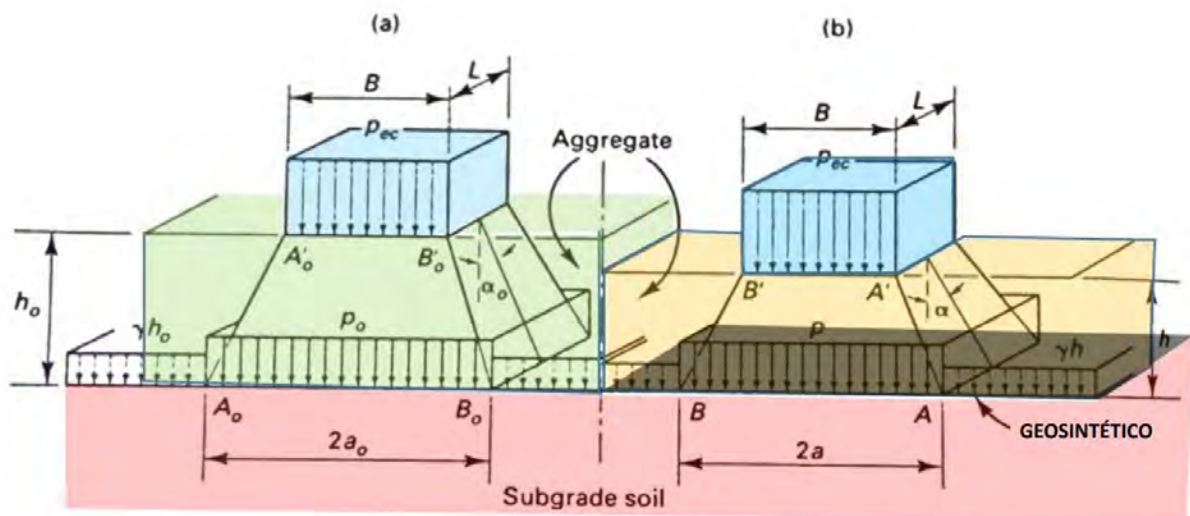


Figura 28.- Planteamiento para el modelo Giroud-Han 2004 con una estructura de suelo no reforzada (izquierda) y una estructura de suelo reforzada (derecha) con geosintético (PACVO, 2020).

De estos estudios se planteó la ecuación para la estabilización de suelos con geosintéticos:

$$h = \frac{0.868 + (0.661 - 1.006 * J^2) \left(\frac{r}{h}\right)^{\frac{1}{2}} \log N}{\left[1 + 0.204 \left(\frac{3.48 * CBR_{BG}^{0.3}}{CBR_{SR}} - 1\right)\right]} \left[\sqrt{\frac{\frac{P}{\pi * r^2}}{\frac{s}{f_s} \left[1 - 0.9 * e^{-\left(\frac{r}{h}\right)^2}\right] N_c * f_c * CBR_{SR}} - 1} \right] * r$$

Donde:

- h (m) = Espesor de la capa de material granular requerido.
- J (m-N^o) = Módulo de rigidez del geosintético
- N = Número de repeticiones de carga
- P (kN) = Carga por rueda, 2P es igual a la carga del eje.
- r (m) = Radio del área de contacto de la llanta.
- CBR_{SR} % = CBR de la subrasante (o de la capa de material debajo del refuerzo)
- CBR_{GB} % = CBR del material granular (o de la capa de material encima del refuerzo)
- s (mm) = Ahuellamiento/rodera permitido, se trata de la deformación que sufrirá el pavimento, es un criterio de servicialidad que acorde al criterio del diseñador puede ir de los 25 a 100mm.
- N_c = Factor de capacidad portante
- f_s = Profundidad del ahuellamiento/rodera de referencia (75mm).
- f_c = Constante de 30 kPa
- $P / (\pi * r^2)$ = Presión de contacto de la llanta (p)

El Manual de Diseño para esta metodología consultado como referencia indica que para secciones sin refuerzo de geosintético el valor de la variable N_c deberá considerarse de 3.14 y el de J igual a cero, mientras que para interfase de capas reforzada con geotextil tejido el valor de N_c a considerar es de 5.14 y el de J igual a cero, mientras que para interfases reforzadas con geomallas N_c se indica que deberá usarse el valor de 5.71 y el valor de J dependerá de la especificación técnica de la geomalla biaxial, puede ser de 0.33 o de 0.55 dependiendo del proceso de fabricación de la geomalla.

De igual manera recomienda la implementación de geotextiles tejidos para la función de estabilización en interfases de capas de materiales granulares o finos, mientras que el uso de las geomallas para refuerzo únicamente serán de material granular (y que su uso deberá complementarse con un geotextil que cumpla con la función de separación ya que la geomalla por si sola permite la filtración de finos que pueden modificar significativamente las propiedades del suelo de la capa superior).

Es así como ya se presentó y desglosó la información necesaria para el desarrollo metodológico de esta investigación, procedimiento que será descrito a continuación para posterior entregar los resultados del proceso.

METODOLOGÍA

El tipo de investigación para la elaboración de este documento consiste en una revisión bibliográfica de una amplia de variedad de estudios realizados por instancias gubernamentales o empresas particulares en donde se abarcan temas como la interacción que tienen los geosintéticos con los suelos, el desempeño de la aplicación de los geosintéticos en los pavimentos y la relación que muestran las diferentes propiedades de estos materiales como refuerzo en el sistema multicapa de los pavimentos, siendo los de principal interés aquellos enfocados en la función de estabilización de la subrasante.

A partir de esta revisión se localizaron las propiedades que, en función de todo el estado del arte previamente explicado en las secciones anteriores, muestran tener una posible relación con el desempeño de esta tecnología en la aplicación de interés. Cabe destacar que los documentos revisados hicieron uso del método experimental en la obtención de sus resultados, por lo que, en este trabajo se busca sintetizar todos estos datos buscando proponer variables congruentes a la teoría de refuerzo de suelos con las que se pueda medir cuantitativamente el impacto que tiene los geosintéticos para estabilizar la capa de subrasante de un pavimento.

Los primeros cuatro estudios que se abarcarán en este documento buscan resaltar propiedades puntuales que convergen en la recapitulación de un último quinto estudio de carácter más técnico en donde se hicieron mediciones rigurosas en un modelo a escala real que involucraron una gran cantidad de variables a consideración para definir las más congruentes al buen desempeño de los geosintéticos de refuerzo aplicados en campo.

Posterior a ello se efectuó una comparación numérica de los resultados obtenidos en las mediciones del último estudio técnico con la teoría de diseño de geosintéticos para la estabilización de suelos blandos explicada en el apartado anterior con la finalidad verificar algunos de los resultados de dicho estudio y mostrar la importancia que recae en una buena caracterización de propiedades a la hora de formular ecuaciones de diseño.

Se hace hincapié en que esta investigación es meramente la interpretación de una revisión de varios estudios junto con la aplicación teórica del diseño de geosintéticos para una función en específico, directamente para este documento no se efectuó ninguna prueba de laboratorio o estudios en campo que respaldasen los argumentos, sino que se recopiló información de varios medios y con la teoría conocida de los geosintéticos se le brindó una argumentación encaminada a las áreas de oportunidad que presenta la rama del diseño con geosintéticos.

Pese a sólo involucrar directamente los resultados de cinco estudios, la recopilación del estado del arte y la búsqueda en general de la información requirió de la lectura y comprensión de muchos documentos más, presentándose únicamente aquellos con relación al hilo principal de la argumentación de este documento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se explicó en el apartado de metodología, en este apartado se desglosarán los puntos principales de los diferentes estudios revisados con relevancia para esta investigación, los cuales respaldan el funcionamiento de los geosintéticos como refuerzo de pavimentos flexibles.

1.- Aplicaciones del refuerzo de pavimentos con geosintéticos.

El primer estudio revisado, elaborado por Perkins et al. en 2010 sobre las aplicaciones de los geosintéticos en el refuerzo de pavimentos, corroboró gran parte de la información descrito en apartados previos.

Entre los puntos más importantes en cuanto a la función de estabilización en pavimentos indican:

- Que la colocación del refuerzo busca proveer una plataforma para la construcción de caminos sin pavimentar o sistemas de pavimento rígido o flexible. Una geomalla con capacidad de confinamiento lateral o geotextil con buena capacidad friccionante provee refuerzo a manera de resistencia a tensión del movimiento lateral de las capas de agregados; reduce la deformación del suelo y deformaciones plásticas. También aumenta la superficie de distribución del esfuerzo cortante.
- El geosintético de refuerzo provee separación para evitar el mezclado de la capa granular con la subrasante. La ligera intromisión de finos a la capa granular si afecta en gran medida las características estructurales de los pavimentos. La geomalla no impide la intromisión del suelo de la subrasante hacia las capas superiores; la capa granular con la geomalla debe proveer esta función.

- Como el suelo de la subrasante consiste una parte de granos finos con alto contenido de agua, el geotextil debe permitir la filtración para disipar el exceso de presión de poro hacia la capa de la base. Para geomallas, la capa granular soportada por la geomalla debe tener una gradación compatible con la subrasante. Entonces lo que provee el refuerzo para la estabilización mecánica de suelos de subrasante débil es el propio refuerzo, separación, filtración y drenaje.
- La estabilización con geosintéticos facilita en gran medida la superficie de construcción. Es una alternativa más eficiente a otros métodos de estabilización; a su vez reduce los requerimientos de compactación para las primeras rondas de la capa de agregados. A largo plazo, mantiene la sección del camino y la integridad del material de la base previniendo de los agregados ingresen a la subrasante.
- Los dos principales mecanismos de aplicación son el incremento de la capacidad portante y el confinamiento lateral, ambas contribuyen a la capacidad de carga. Cuando la capa de agregado es cargada por algún vehículo dicha capa tiende a moverse lateralmente y es restringida por la subrasante o el refuerzo del geosintético. El componente del mecanismo consiste en la restricción de movimiento lateral de la base o subbase (genera confinamiento), incrementando el módulo de los agregados, mejorando la distribución de los esfuerzos verticales en la subrasante con el incremento del módulo en la capa granular, y reduce la deformación por cortante en la parte superior de la subrasante.
- A medida que se aumente el espesor de la capa de grava o aumente la rigidez al añadir secciones de pavimento, el esfuerzo en el geosintético disminuirá a tal punto que las deformaciones en el geosintético serán muy pequeñas o nulas.

- En cuanto a la relación que guarda la presión de poro en aplicaciones de refuerzo, el estudio indicó que las mayores deformaciones por ciclo se dan en las mayores condiciones de presión de poro y las menores deformaciones se presentaron en su caso contrario. Hay estudios que afirman una reducción en la presión de poro a través con la presencia bien posicionada de un geosintético.

En cuanto al refuerzo de la capa base, esta misma investigación recalca los siguientes puntos:

- El objetivo de colocar el refuerzo en esta capa es para disminuir la deformación permanente (rodera) y las grietas por fatiga durante su vida operacional. La aplicación de una carga por parte del vehículo genera esfuerzos dinámicos en varios componentes del pavimento, la rigidez de estos componentes condiciona a las deformaciones (las cuales son pequeñas en un pavimento bien diseñado). Conforme las cargas se aplican, la deformación permanente es inducida y acumulada. Las grietas por fatiga en la carpeta asfáltica resultan de repetidos ciclos de deformación lateral a tensión al fondo de la capa. Para caracterizar al geosintético es importante considerar la pequeña reformación de la rigidez al oponerse a la resistencia de altos niveles de deformaciones.
- El mecanismo del refuerzo busca prevenir movimientos laterales en los agregados de la base con la interacción del cortantes entre la base y el geosintético. La deformación lateral puede darse durante la construcción del camino (por el equipo pesado de compactación que ocasiona esfuerzos de compresión a la capa granular) y durante su vida útil.

- De los estudios efectuados por modelo DEM y modelos de carga triaxial se estableció que el empleo de un refuerzo lleva a una reducción en la deformación vertical de la base, deriva a una menor superficie de deflexión, así como una disminución en el esfuerzo a tensión al fondo de la carpeta y un mejor periodo de vida respecto a la fatiga.
- Se destacó que la vida de servicio de un pavimento se encuentra definida por las repeticiones de carga necesarias para alcanzar una superficie particular de deformación permanente; este número de ciclos puede incrementar incorporando un factor al incluir un geosintético en la capa de la base, y el espesor de la base puede reducir en el orden de un 50%. La mayoría de los estudios cuantifican los beneficios en función de las deformaciones permanentes (rodera). Es más complicado demostrar experimentalmente los beneficios en función del incremento de la vida de fatiga de la carpeta asfáltica.
- La eficiencia del refuerzo depende de las condiciones de uso. El refuerzo trabaja mejor cuando la capacidad portante del pavimento es baja. Si la capacidad portante del pavimento es alta, el refuerzo no tiene mucho efecto en las deformaciones permanentes. Una malla de acero previene el desarrollo de grietas longitudinales por heladas en el área reforzada (debe instalarse en todo el ancho del camino, no hay necesidad de traslape).
- Son necesarias buenas propiedades de interacción para transferir la carga de los agregados al refuerzo. No obstante, se han tenido problemas para correlacionar el parámetro de un solo material con el desempeño del refuerzo. Esto quiere decir que un parámetro por sí solo no puede definir todo el desempeño, y el conjunto de

parámetros pueden trabajar a favor o en contra para determinar cómo el refuerzo beneficiará al pavimento.

2.- Refuerzo de pavimentos sobre arcillas expansivas

El uso de un refuerzo en la capa de la base además de tener la función de aumentar el periodo de vida útil del camino, o la función de optimizar la capa disminuyendo su función, también presenta una función adicional relacionada a la aparición de las grietas longitudinales.

Este estudio realizado por el Dr. Zornberg en 2012 evaluó principalmente casos en campo (de tramos de estudio en Texas) para ver los efectos que traía consigo el refuerzo con geomallas encima de subrasantes compuestas de arcillas expansivas, enfocándose en el parámetro de la aparición de grietas longitudinales.



Figura 29.- Comparación del desempeño de secciones de pavimento sobre arcillas expansivas: (a) Sección 2 reforzada con geomalla; (b) Sección de control (no reforzada); (c) Sección 1 reforzada con geomalla (Zornberg J.G., 2012).

Conclusiones de las observaciones en campo:

- Los geosintéticos utilizados como refuerzo pueden minimizar efectivamente el desarrollo de grietas longitudinales en pavimentos construidos sobre arcillas expansivas.
- Los geosintéticos utilizados como refuerzo consiguen reubicar grietas longitudinales más allá de la zona de pavimento reforzado.
- Tanto las especificaciones disponibles como los métodos de ensayo existentes para caracterizar los refuerzos de pavimento no son suficientes para identificar los parámetros que rigen el desempeño de pavimentos reforzados.

3.- Efecto del contenido de humedad y la densidad seca en la interacción de geosintético en suelo cohesivo mediante pruebas de corte directo.

Este estudio se enfocó en las propiedades de los geosintéticos para suelos cohesivos, en donde efectuaron pruebas de corte directo en 4 tipos de suelos diferentes (3 arcillas de diferentes propiedades y 1 arena) en tres diferentes geomallas y un geotextil tejido.

Los parámetros de interacción en la interfase suelo-geosintético depende del mecanismo de interacción (corte directo o pull-out), propiedades mecánicas de suelo (densidad, tamaño y forma de grano, distribución del agregado y contenido de agua), las propiedades mecánicas del geosintéticos (resistencia a la tensión última y con 5% de deformación) y de sus propiedades geométricas.

La falla por pull-out se ocasiona debido a un mal ancho del geosintético en el sistema, y la falla por corte directo se da por la relación entre el suelo con el geosintético (su prueba

de estudio brinda parámetros mecánicos muy importantes como lo son la cohesión y el ángulo de fricción generado en esta interfase).

Entre las geomallas de poliéster y geotextil de polietileno, los geosintéticos hechos de poliéster muestran en un inicio una mejor resistencia o desempeño.

Para tener un punto de control, se hizo una prueba de corte sin el suelo reforzado. Esquema de las pruebas (las capas de suelos superiores fueron debidamente compactadas a una misma energía de compactación):

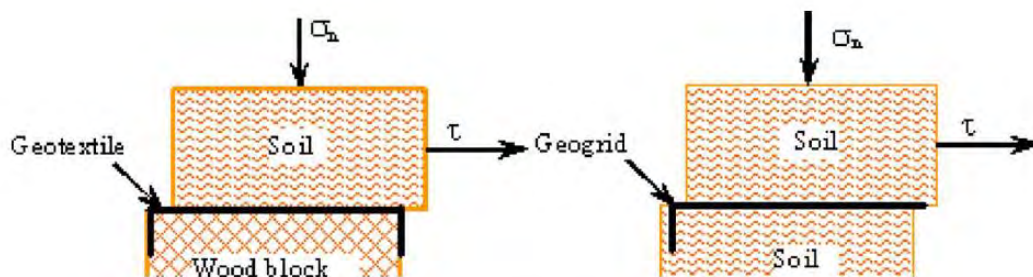


Figura 24- Diagrama de suelo-geosintético en prueba de corte directo (Abu-Farsakh et al., 2007).

Se le aplicaron esfuerzos de 25, 50 y 75 kPa a las muestras de arcilla, y a la de arena se le aplicaron esfuerzos de 15, 30 y 45 kPa (se usaron esfuerzos menores en este material para evitar el desalojo de agua).

El ángulo de fricción máximo alcanzado por la arena fue de 41° (con una de las geomallas, con el geotextil fue de 33°) mientras que el de las arcillas fueron del orden del 24 al 28%.

Para la arena, las propiedades de las geomallas no marcaron cambios notorios en los resultados.

También se calculó el coeficiente de interacción:

Geosynthetics	c_a (kPa)	δ_a (degrees)	σ_n (kPa)	c_i
Woven (4×4) geotextile	0	33.4	15	0.74
			30	0.74
			45	0.74
Geogrid BX-6100	0	40.1	25	0.95
			50	0.95
			75	0.95
Miragrid 8XT	0	40.1	25	0.95
			50	0.95
			75	0.95
Geogrid BasXgrid 11	0	39.9	25	0.94
			50	0.94
			75	0.94

Tabla 2.- Eficiencia de interfase de los geosintéticos en arena y condiciones de compactación óptima (Abu-Farsakh et al., 2007).

Para suelos cohesivos, este coeficiente depende también de la presión de confinamiento; pero a esfuerzos normales muy altos dicha relación depende más de la fricción entre el geosintético con el suelo. En suelos cohesivos dicho coeficiente estuvo en un valor promedio de 0.7.

Geosynthetics	c_a (kPa)	δ_a (degrees)	σ_n (kPa)	c_i
Woven (4×4) geotextile	8.1	23.7	25	0.67
			50	0.73
			75	0.76
Geogrid BX-6100	8.9	21.4	25	0.66
			50	0.69
			75	0.71
Miragrid 8XT	10.3	25.8	25	0.79
			50	0.83
			75	0.86
Geogrid BasXgrid 11	12.7	30.7	25	0.97
			50	1.02
			75	1.05

Tabla 3.- Eficiencia de interfase de los geosintéticos en la arcilla 25 en condiciones de compactación óptima (Abu-Farsakh et al., 2007).

Los efectos de contenido de agua y la densidad seca del suelo se desglosan a continuación:

- La resistencia disminuyó con el aumento en el contenido de humedad.

- Se vio que el comportamiento del geotextil a largo plazo se dará mejor con contenido elevado de humedad debido a la capacidad drenante de dicho geotextil, pero el rendimiento de las geomallas (en especial las más rígidas) se ve fuertemente afectadas al carecer de dicha capacidad drenante (inclusive en 1/3 de su aporte).
- El estudio hace la recomendación de emplear material que por lo menos sea el 95% de la densidad seca máxima y un contenido de humedad no mayor al 2%.
- Se recomiendan realizar estudios enfocados al comportamiento del sistema a largo plazo.

4.- Investigación de la interacción suelo-geosintético empleando prueba de corte directo y métodos de elemento finito.

Una limitación de las soluciones analíticas en este ámbito (para determinar la rigidez de refuerzo o la interacción geosintético en sistemas de suelo reforzados) es que no se toma la influencia de la deformación de la masa del suelo ni se estima con exactitud la estabilidad interna; pero los métodos numéricos pueden describir adecuadamente estos mecanismos que se desarrollan de manera simultánea.

Esta investigación publicada en 2019 hizo tanto una prueba en laboratorio como una modelación numérica del coeficiente de interacción que se da entre el geosintético de refuerzo y el suelo. Se empleó una prueba de corte directo para la primera parte.

La prueba se hizo en una caja cuadrada de corte directo de 35x35cm, el suelo empleado consistió en piedra limosa (limestone) fragmentada. Los esfuerzos normales se aplicaron en tres etapas de 0.125, 0.150 y 0.175 MPa.

La modelación se hizo con el software Plaxis 2D, empleando un modelo de Mohr-Coulomb para el material. Propiedades especificadas de los geosintéticos empleados en la prueba y las características del suelo:

Reinforcement	Model	Tensile strength T	Axial tensile stiffness J at break	Units
A – uniaxial flexible polyester geogrid with EVA coating, aperture 25×25 mm	Linear elastic perfectly plastic	60	600	kN/m
B – uniaxial rigid polyester jointed geogrid aperture 50×120 mm		70	1170	
C – biaxial rigid polypropylene geogrid with rigid joints, aperture 65×65 mm		30	330	

Tabla 4.- Características de los especímenes de los geosintéticos de refuerzo seleccionados (Vlcek J., & Valaskova V.,2019).

Parameter	Name	Value	Units
Unit weight	γ	20.1	kN/m ³
Young's modulus	E_{ref}	1.8×10^4	kN/m ²
Poisson's ratio	ν	0.20	-
Cohesion	c	411	kN/m ²
Friction angle	ϕ	44.2	°
Dilatancy angle	ψ	14.2	°

Tabla 5.- Características del espécimen del suelo (Vlcek J., & Valaskova V.,2019).

El plano de corte se posicionó a la mitad de la muestra de suelo, que tiene contacto con la caja de suelo. Se presentó gran similitud de resultados obtenidos entre la prueba en laboratorio y la modelación.

El primer y tercer espécimen de geosintéticos obtuvieron valores muy parecidos en su esfuerzo cortante a pesar de que el primer tiene una rigidez a la tensión menor, esto puede

deberse a la alta rigidez de las uniones en los elementos. Esto indica que hay una mayor estabilización en la interfase de suelo-geosintético cuando el geosintético presenta conexiones rígidas en sus puntos de unión (el espécimen B carecía de esto y presentó menor resistencia al cortante por una ruptura en su interfase).

Refuerzos con estructura de malla y juntas rígidas otorgan un mayor nivel de interacción del geosintético con el suelo.

5.- Uso de geosintéticos para la estabilización de subrasante

Las investigaciones previamente resumidas se colocaron en este documento particularmente para entablar los conceptos e ideas que se comprueban con este estudio técnico desarrollado por el Instituto de Transporte del Oeste de los Estados Unidos publicado en 2014, el cual es el principal estudio para desglosar y analizar acorde a los alcances de este proyecto.

Este estudio fue hecho para dar seguimiento a la investigación de Cuelho y Perkins de 2009, se halló que secciones de prueba construidas en una subrasante débil con una capa de base delgada aguantaba unas pasadas de un camión de tres ejes totalmente cargados. Los resultados indicaron que la resistencia a la tensión del geosintético de refuerzo estaba vinculado con el desempeño y las metodologías de diseño para la estabilización de la subrasante no calcularon bien la profundidad de la base para estabilizar el camino, se necesitaba investigar el desempeño de los geosintéticos en condiciones menos severas.

Secciones de escala real fueron construidas, ensayadas y monitoreadas con TRASCEND para comparar el desempeño de operación de los geosintéticos empleados para estabilizar la subrasante. Fueron 17 pruebas, 14 con refuerzo y 3 sin refuerzo. Todos los

tramos fueron de 50 pies de longitud y la resistencia promedio de la subrasante fue de 1.79 CBR excepto dos secciones reforzadas con geomalla tipo 2 BX, las cuales fueron construidas con un CBR de 2.14 y 1.64 respectivamente. El espesor de la base de estas secciones fue de 10.9 pulgadas, y dos de las pruebas emplearon bases de mayor espesor (16.3 y 24.9 pulgadas).

La resistencia y consistencia de la subrasante fue monitoreada de varias formas durante su construcción, construida en 6 capas de 6 pulgadas, el geosintético y los instrumentos de medición se instalaron en la parte superior de esta capa. De igual forma se tuvieron las precauciones correspondientes durante la elaboración y colocación de la base.

Un camión cargado de 3 ejes fue conducido a 5 millas por hora en las secciones de prueba. Se midieron: deformaciones longitudinales y transversales, desplazamiento y deformación del geosintético, y la variación de la presión de poro de la subrasante. Las pasadas por los tramos se hicieron en otoño de 2012, un total de 740. El tráfico se mantuvo hasta alcanzar una deformación en el pavimento de 3 pulgadas de profundidad.

Las mediciones de deformación se realizaron cada 40 pulgadas, las mediciones de estas deformaciones fueron comparadas con la altura base previo al tráfico. La acumulación de la deformación por la pasada de los camiones mostró los mejores resultados con un refuerzo de geotextil tejido, seguido de dos geomallas y un geotextil no tejido, mientras que el peor desempeño vino por parte de una geomalla en específico.

El análisis de la deformación longitudinal estuvo encaminado a determinar qué propiedades del geosintético se relacionaban mejor con el desempeño en una sección de prueba en particular, el punto de partida fue la afectación de los materiales a profundidades específicas de deformación. Se emplearon análisis de regresión lineal para la resistencia a la

tensión por ancho, la rigidez de tensión cíclica, la resiliencia de la interfase de rigidez por cortante, la fuerza y rigidez de los nodos, y la estabilidad de apertura de los módulos. Estos análisis revelaron que la resistencia a la tensión por ancho y la resistencia-rigidez de los nodos eran los más relacionados con el desempeño de los tramos de prueba reforzados.

Se replicaron los análisis de regresión con la información de la primera fase de la investigación, indicando que a condiciones más severas (una base de menor espesor), las propiedades de resistencia a la tensión de geomallas estaban relacionadas al desempeño bajo mayores deformaciones. El beneficio de la resistencia de los nodos presentó su pico a las 3 pulgadas de deformación, su contribución fue menor a mayores deformaciones. Los dos geotextiles (uno tejido y otro no tejido) tuvieron buen desempeño, la informa en que interactuaron con la subrasante fue diferentes que con la geomalla.

El comportamiento transversal fue caracterizado empleando medidas de deformación y desplazamiento tomadas perpendicular al tráfico. El desplazamiento y deformaciones a largo plazo fueron recolectadas durante el tráfico para caracterizar el comportamiento transversal en las secciones de prueba. La información de los sensores indicó una transición en el apoyo del geosintético pasando de confinamiento lateral de la base a una membrana de soporte que involucra deformaciones de mayor profundidad.

Aquellas secciones en donde la dirección de los desplazamientos tuvo su transición antes, fueron aquellas que alcanzaron mayores niveles de deformación longitudinal primero, esta transición se dio aproximadamente a las 2 pulgadas de deformación.

Se realizaron dos periodos de mediciones e interpretación de resultados, uno tras acabar la aplicación de cargas vehiculares y el otro se efectuó ocho meses después, se

tomaron muestras de la base y subrasante para obtener porciones considerables de geosintético y evaluar sus propiedades a la tensión y rigidez, así como mediciones de humedad a las capas de base y subrasante. Estas excavaciones permitieron la forma de la deformación en el lugar de paso de las dos llantas, la distorsión del geosintético por el tráfico y la acumulación de deformación, y pullout. El daño en los geosintéticos fue mínimo, aquellos tramos que fallaron antes fueron aquellos con mayor cantidad de daño en los nodos.

Los resultados en cuanto a la reducción de la base indicaron que el mejor caso se dio con el modelo TenCate Mirafi RS580i, con una reducción del 26.9% (cuatro pulgadas). Esta comparativa es válida cuando grava extra sea suficiente para permitir la operación de vehículos pesados sobre la subrasante débil sin deformaciones excesivas.

Los resultados indican que la resistencia y la rigidez de los nodos contribuyen al desempeño de los geosintéticos cuando se emplea para estabilización de subrasantes. Aquellos que gusten usar los geosintéticos para esta función deberán conocer los valores mínimos de las propiedades de estos materiales vinculados con el buen desempeño de estas secciones de prueba. Mientras más propiedades de los materiales especificados, mejor.

El estudio recomienda que investigaciones futuras se centren los efectos combinados de estas propiedades. Aunque se sabe que los geotextiles tuvieron un buen desempeño, se desconocen las propiedades del material a las cuales se le debe ese desempeño.

Una explicación detallada del desarrollo del proyecto se presenta a continuación.

La primera parte de este estudio llevada cabo en 2009 apuntó a la resistencia última de tensión y la resistencia a la tensión al 2% de la deformación unitaria como propiedades de interés durante el desempeño del geosintético para controlar el desarrollo de deformación

longitudinales (rodera), la importancia de las propiedades radicó en las grandes cargas aplicadas, en varios casos excedieron la tensión última del material. Los resultados de este estudio se limitaron a una base delgada sobre un suelo suave, el daño anticipado en los tramos de prueba bajo condiciones bajas de volumen vehicular se piensa que fue debido a la profundidad de la grava y el alto porcentaje de partículas redondas. Claramente el modo de falla se debió a capacidad de carga por cortante en la subrasante, la ruptura por tensión en las geomallas y falla por arrancamiento con un geotextil.

Para que la construcción de un camino se dé sobre una subrasante estabilizada se requiere que el sistema multicapa subrasante-geosintético-base se encuentre estable, dicha condición puede verificarse observando la deformación del sistema tras el paso una sola vez de un vehículo cargado y ver si la deformación fue mínima. Bajo condiciones estables no hay fallas en la subrasante por capacidad de carga, por ende, bajo estas condiciones se prevé que las propiedades del geosintético que entren en juego sean otras.

El objetivo de la investigación fue construir secciones de prueba con una base de mayor espesor conllevando a una menor deformación y así determinar cuáles propiedades de los materiales intervienen más en el desempeño para aplicación de estabilización de subrasante.

Para estas pruebas, la subrasante es artificial para proveer de mismas condiciones a todos los tramos, así como la superficie de uniforme para que lo que entre en juego sea realmente el geosintético, cabe resaltar que fueron pruebas en caminos no pavimentados. Los principales indicadores para medir el desempeño de los geosintéticos fueron las mediciones de las deformaciones longitudinales y transversales.

Las propiedades mecánicas de los geosintéticos fueron comparadas con las pasadas de los camiones en la transición de confinamiento lateral a la membrana de soporte y a la falla con el enfoque en averiguar cuál propiedad se asemeja más al funcionamiento en campo. Entre las propiedades evaluadas están: resistencia a la tensión ancho-largo, módulo cíclico de tensión, la resiliencia en la rigidez de cortante en la interfase, la resistencia de los nodos y el módulo de estabilidad de apertura.

Se construyeron 17 secciones de prueba. La primera parte describe el diseño del sitio de prueba, las propiedades de los materiales, el proceso constructivo de los tramos de prueba, la instrumentación empleada y los sistemas para el manejo de los datos. La segunda parte se enfoca a las propiedades de los geosintéticos provistos y las pruebas hechas a los materiales.

El diseño buscó crear una vialidad uniforme para estudiar los efectos de la estabilización con geosintéticos, la resistencia de la subrasante y la profundidad de la base (de grava). El proyecto fue planeado para cuantificar diferencias en el desempeño de los geosintéticos bajo mismas condiciones, pero también se hicieron secciones que contemplaran la variación en la resistencia de la subrasante y el espesor de la base. Tres secciones de control sin geosintético fueron construidas y cada una tenía un espesor de base diferentes y otras tres secciones de control fueron construidas con un mismo geosintético, pero con subrasantes de diferentes resistencias.

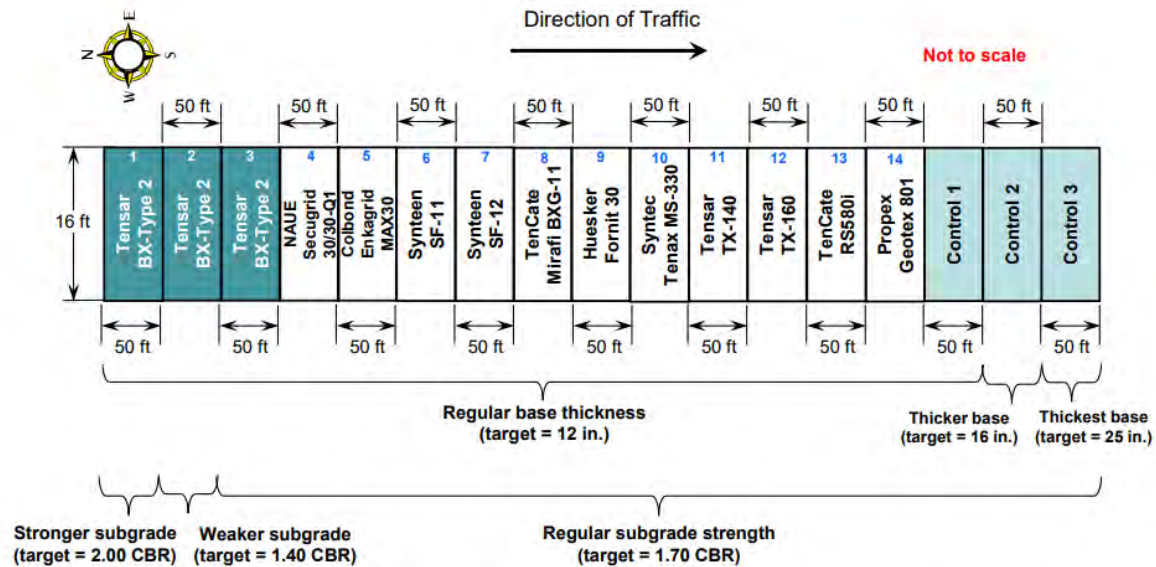


Figura 30.- Interfaz general de las secciones de prueba con sus parámetros constructivos (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

El diseño del proyecto fue en un solo carril. Un pavimento de grava construido sobre 3 pies de una subrasante colocada sobre un sustrato fuerte y estable. En total tuvo una longitud de 860 pies para evaluar 14 geosintéticos y 3 secciones de control. Se considero la misma pendiente del 1% a la de una vía cercana, e igual se tomaron las precauciones en las excavaciones para que elementos preexistentes no afectaran las condiciones de los tramos de prueba. Corte de la sección:

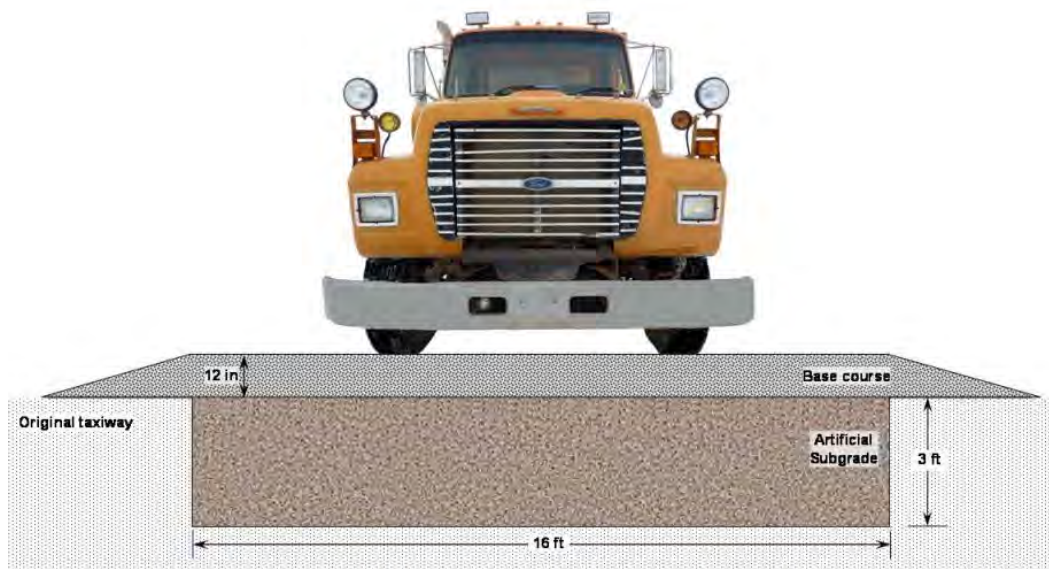


Figura 31.- Sección transversal del tramo de prueba en campo con el camión a escala aproximada (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

En cuanto a las características de la subrasante, el material se obtuvo de un banco de grava en las cercanías, se limpió y tras su secado se tamizó para remover partículas de más de una pulgada de diámetro. El suelo clasificó como un CL (arcilla de baja expansibilidad con arena) acorde al SUCS, otras de sus propiedades fueron:

Property	
Liquid Limit	34
Plastic Limit	17
Plasticity Index	17
% passing #200 sieve	55%
Max. dry unit weight [†]	112 lb/ft ³
Optimum moisture content [†]	16%

[†] using standard Proctor procedure (ASTM D698)

Tabla 6.- Propiedades generales de la subrasante artificial (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Con propósitos constructivos, la subrasante fue caracterizada con una comparativa entre la resistencia al cortante y el Valor Relativo de Soporte (o CBR en inglés) con la

variación en el contenido de agua. El objetivo de esto fue vincular rangos de resistencia al cortante para obtener valores de CBR para ese material en específico. Esta calibración se hizo con el objetivo de emplear instrumentos para medir la resistencia al cortante ya que son dispositivos más fáciles de operar, más precisos y con resultados al instante. Las mediciones de las propiedades de la subrasante se complementaron con un cono penetrómetro dinámico y un deflectómetro ligero.

Para las propiedades del agregado para la base, se tomaron en cuenta las siguientes propiedades: Granulometría, porcentaje de caras fracturadas, número mínimo de caras fracturadas, así como límite líquido y límite plástico. Se comparó de un suelo de la especificación de Montana 5A contra el promedio de las granulometrías de especificaciones de varios estados de EUA. Se especificó límite líquido máximo del 25% y un índice plástico de 6.

El material final que conformará la capa base del proyecto se obtuvo de un banco de materiales a 20 millas del sitio de prueba, clasifica en el SUCS como GP-GC (grava mal graduada con arcilla y arena), su índice plástico fue de 8. Las pruebas de CBR en el agregado resultaron en intervalos de capacidad mayores con desplazamientos de 0.2 pulgadas, por ende, el CBR a 0.2 pulgadas será el empleado. Se hicieron correcciones para considerar la forma cóncava de la curva carga-desplazamiento, con estas correcciones se obtuvieron valores de CBR por encima de 100 para este material de base.

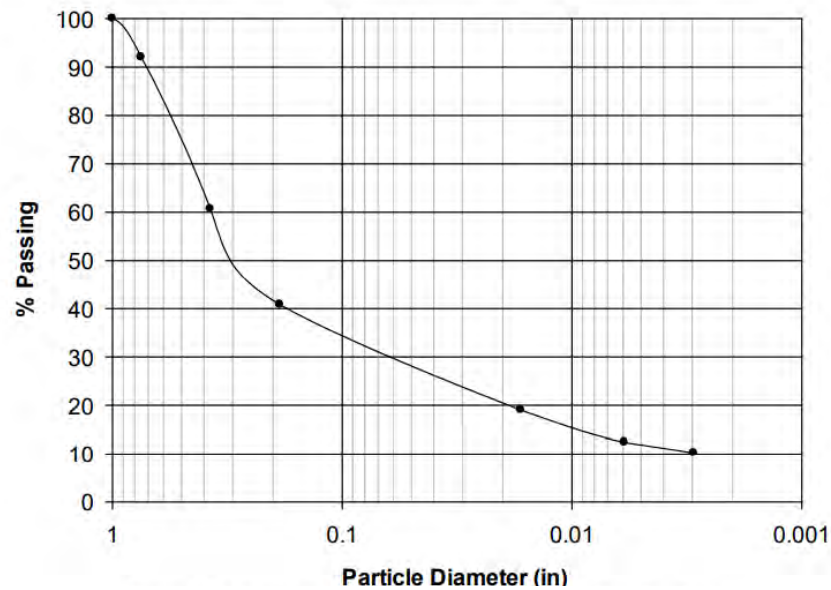


Figura 32.- Curva granulométrica del agregado que conforma la base
(Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Property	
Liquid Limit of fines	23
Plastic Limit of fines	15
Plasticity Index of fines	8
% passing #200 sieve	10%
Max. dry unit weight [†]	139 lb/ft ³
Optimum moisture content [†]	6.0%
% fractured faces	55%
CBR [†] (at $\rho_{dry} = 140 \text{ lb/ft}^3$)	>100

[†] using modified Proctor procedure (ASTM D1557)

Tabla 7.- Propiedades generales del material para la capa base
(Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Se revisaron los criterios de separación y filtración acorde a la granulometría del suelo, para corroborar si se requerirá de un geotextil para cumplir dicha función, no obstante, cumplió con el criterio de separación (no se requiere geotextil de separación) y cumplió con uno de los dos criterios de filtración, pero como la contaminación de la base con material de

la subrasante será mínimo (por el corto tiempo de prueba de la sección y bajos niveles de tráfico) no se colocó en dicho caso en donde no cumplió. El ancho de la capa se definió a partir del análisis de deformaciones en estudios previos, se estableció un espesor de capa base de 12 pulgadas.

En cuanto a los geosintéticos, se emplearon 12 diferentes geosintéticos, de los cuales 10 fueron geomallas y 2 fueron geotextiles (uno tejido y otro no tejido), a estos se les aplicaron 5 pruebas de laboratorios para tener sus propiedades bien ubicadas entre ellas:

- Resistencia largo-ancho a la tensión = Con esta prueba se obtiene la curva carga-deformación del geosintéticos en sus dos principales direcciones.
- Módulo cíclico de tensión= Se realiza en el mismo equipo de la prueba anterior, pero esta prueba busca evaluar el módulo de tensión del geosintético ante la aplicación de pequeñas deformaciones bajo cargas cíclicas. El objetivo es determinar el módulo de cíclico de tensión a diferentes niveles de deformación unitaria.
- Resiliencia en la interfase a la rigidez por cortante= Mide la rigidez entre el geosintético y el suelo que lo rodeo bajo pequeñas cargas cíclicas (ya se efectúa en un equipo distinto, al igual que las otras dos).
- Resistencia en los nodos= Sólo se realiza en geomallas, efectuadas en una máquina cruz en una sola dirección, la prueba busca corroborar que los nodos de las geomallas tengan suficiente fuerza para soportar los esfuerzos aplicados durante la etapa de construcción, así como tentativamente indicar qué tan bien la estructura de la malla transfiera la carga en la dirección perpendicular de donde se recibe la carga.

- Módulo de estabilidad de apertura= La prueba busca cuantificar la rigidez en las dimensiones de las geomallas bajo condiciones de carga que produzca torsión, al igual que la pasada, esta prueba no se hace en geotextiles.

También se checaron las condiciones de resistencia última para geomallas y resistencia a la tensión grab del geotextil, así como el criterio de apertura de malla. Todos cumplieron con dichos criterios con excepción de una geomalla que no cumplió con el tamaño de apertura, pero debido al tamaño del material de agregado se logra aun así cumplir con el requisito.

Geosynthetic Test Section	Product Manufacturer - Name	Structure	Polymer ^a	Roll Width (in)	Mass per unit area (oz/yd ²)	Aperture Size ^b (in) MD x XMD
1, 2 and 3	Tensar - BX Type2	integrally-formed, biaxial geogrid	PP	160	8.9	1.0 x 1.3
4	NAUE - Secugrid 30/30 Q1	vibratory-welded, biaxial geogrid	PP	186	5.9	1.3 x 1.3
5	Colbond - Enkagrid MAX 30	biaxial, welded geogrid	PP	197	6.0	1.7 x 1.6
6	Syntee - SF 11	PVC-coated, woven, biaxial geogrid	PMY	186	9.5	1.0 x 1.0
7	Syntee - SF 12	PVC-coated, woven, biaxial geogrid	PMY	183	12.3	1.0 x 1.0
8	TenCate - Mirafí BXG11	PVC-coated, woven, biaxial geogrid	PMY	158	9.1	1.0 x 1.0
9	Huesker - Fornit 30	polymer-coated, knitted, biaxial geogrid	PP	206	6.5	0.6 x 0.6
10	SynTec - Tenax MS 330	extruded, triple-layer, biaxial geogrid	PP	156	9.7	1.7 x 2.0 ^c
11	Tensar - TX140	integrally-formed, triaxial geogrid	PP	160	5.3	1.6 x 1.6 ^d
12	Tensar - TX160	integrally-formed, triaxial geogrid	PP	160	6.4	1.6 x 1.6 ^d
13	TenCate - Mirafí RS580i	woven geotextile	PPF	204	12.3	40 ^e
14	Propex - Geotex 801	non-woven, needle-punched geotextile	PP	186	8.0	80 ^e

^a PP = polypropylene, PMY = polyester multifilament yarn, PPF = polypropylene fiber

^b MD = machine direction, XMD = cross-machine direction

^c for a single layer; apparent opening size is reduced when three layers are stacked on top of one another

^d reported as "rib pitch" in manufacturer's specification sheet

^e Apparent Opening Size (AOS) in U.S. Standard sieve size, ASTM D 4751

Tabla 8.- Resumen de las características de los geosintéticos empleados en el estudio (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Algunas particularidades de adaptación en función del geosintético se destacaron y se desplegaron un resumen de resultados para cada prueba y una comparación con los datos que indica el proveedor (datos MARV), en la mayoría de los casos los resultados arrojaron propiedades por encima de los valores MARV de la ficha técnica del geosintético.

Los pasos de la construcción del tramo de prueba fueron los siguientes:

- Excavación y alineamiento de la zanja
- Colocación de plástico para nivelar la zanja
- Preparación y colocación de la subrasante artificial
- Instalación de los geosintéticos y los sensores de medición
- Preparación y colocación de la capa base

Cada tramo de 50pies fue subdividido en 14 secciones, no se empleó una zona de transición ya que el empalme de los geosintéticos coincidía con la transición entre secciones adyacentes.

Se hicieron múltiples mediciones para asegurar la calidad durante la construcción y compactación de la capa de subrasante.

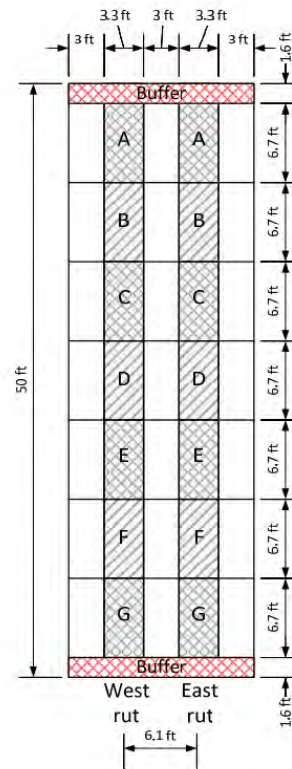


Figura 33.- Áreas de medición para las pruebas del suelo en campo para cada sección del tramo de prueba (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Subgrade			
Measurement Device	Layers	Measurements per Layer	Location of Measurement
Vane Shear	all	56	A,B,C,D,E,F,G
Light-Weight Deflectometer	all	6	B,D,F
Dynamic Cone Penetrometer	final	6	A,D,G
In-Field CBR	final	2	D
Nuclear Density Gage	final	2	D

Base Course Aggregate			
Measurement Device	Layers	Measurements per Layer	Location of Measurement
Light-Weight Deflectometer	first	12	B,D,F
Light-Weight Deflectometer	final	6	B,D,F
Dynamic Cone Penetrometer	final	6	A,D,G
In-Field CBR	final	2	D
Nuclear Density Gage	final	2	D

Tabla 9.- Resumen de las pruebas de monitoreo en el suelo efectuadas durante la construcción (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

La construcción de la zanja inicio en junio de 2012, lográndose una excavación de 860 pies de largo por 16 pies de ancho, el fondo de la zanja se compactó con un compactador vibratorio, se colocó un plástico con el cual que procuró mantener la humedad de la subrasante durante el proyecto.



Figuras 34 y 35.- Reporte fotográfico de la construcción del tramo de prueba, a la izquierda la excavación terminada y a la derecha la colocación de la subrasante en la excavación (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

La subrasante se colocó en 6 capas de 6 pulgadas con lo que se lograría un espesor final de 3 pies, se fue agregando agua para alcanzar la resistencia deseada.

La compactación se hizo con un compactador liso con vibración, dos pasadas a lo largo de 3 planos longitudinales, el contenido de humedad por capa se mantuvo colocando un plástico hasta el momento en que se fuese a poner otra capa, se cuidó mucho el contenido de humedad. Antes de colocar la capa de la base, se niveló la capa de subrasante a la altura del camino adyacente, se hizo una revisión topográfica y se colocaron los medidores de la presión de poro antes que los geosintéticos.



Figuras 36-39.- Esquina superior izquierda: Humedecimiento y mezclado de la subrasante con la excavadora; Esquina superior derecha: Seguimiento en la colocación de la subrasante con minicargador montado sobre orugas; Esquina inferior izquierda: Compactador liso empleado en compactación de la subrasante; Esquina inferior derecha: Nivelación final de la capa de subrasante. (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Al parecer le dieron menos prioridad a la resistencia de las capas más profundas de la subrasante, la estrategia para determinar la resistencia de las capas de subrasante fue con la teoría de distribución de esfuerzos elásticos de Boussinesq.

Con esta teoría, sacaron la influencia y porcentaje de participación de cada capa. Las tres capas superiores de la subrasante presentan el 70% de la influencia que causará la carga vehicular.

$$n_i = \frac{I_i}{\sum_{i=1}^6 I_i}$$

Subgrade layer	Depth to Center of Layer (in)	I_i	n_i
6 (top)	3	0.987	0.317
5	9	0.793	0.255
4	15	0.525	0.169
3	21	0.358	0.115
2	27	0.257	0.083
1	33	0.194	0.062

Tabla 10.- Factores de carga para la subrasante artificial (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

La resistencia al cortante fue calculada con la medición del dispositivo de cortante y los factores de carga por cada capa. Todas las secciones se buscaron construir para alcanzar un CBR 0.1 mayor al buscado.

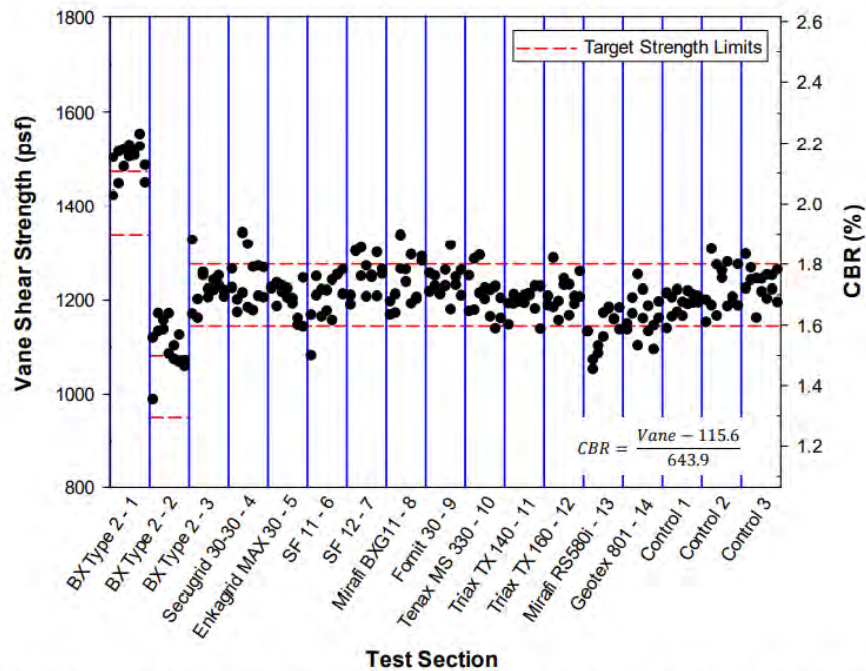


Figura 40.- Resistencia al cortante de las regiones de subrasante construida de la A a la G (oeste a este en la ruta) (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

También se midió la rigidez en las regiones B, D y F de cada tramo durante la construcción de la subrasante. Con otro dispositivo también se midió la resistencia de la capa subrasante tras terminar su construcción.

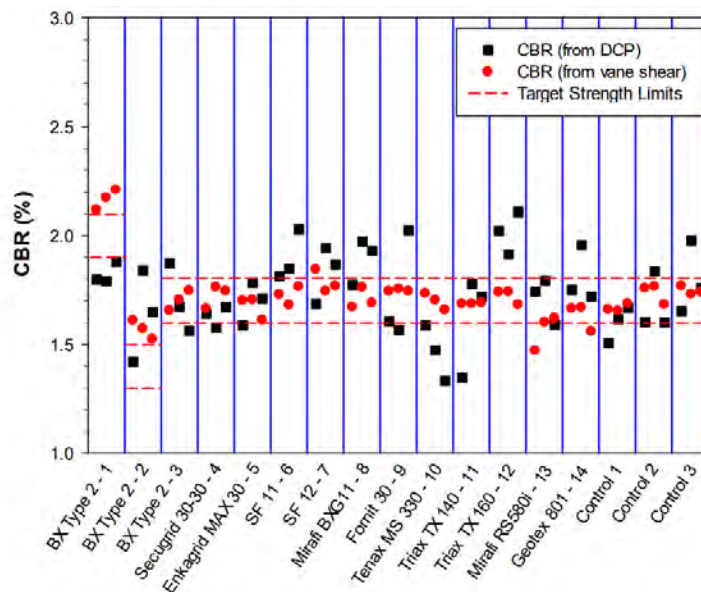


Figura 41.- Resistencia CBR de la subrasante artificial del DCP y medición del cortante (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

El CBR se midió en campo, y con múltiples instrumentos para determinarlo por diferentes metodologías. También se midió la densidad en la sección D de cada tramo y también muestras de humedad para calcular el contenido de agua.

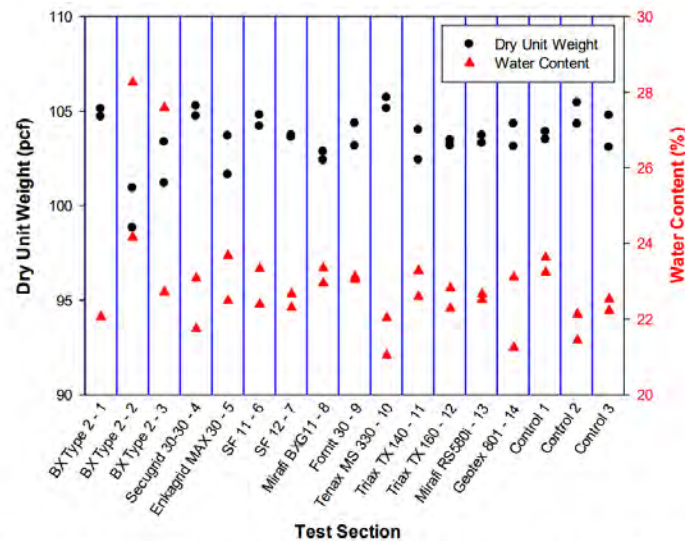


Figura 42.- Densidad en sitio y contenido de agua en la subrasante de la región D (tramos de oeste y este) (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

En cuanto a la instalación de los geosintéticos, estos no estuvieron expuestos al sol hasta el momento de su instalación, una pieza de geosintético se recortó del rollo del material y se le colocaron los medidores de deformación unitaria en dos puntos, el pedazo del rollo del material fue instalado colocándolo en sentido de la dirección del tráfico. No se tensionaron en sitio los bordes de los geosintéticos. Como el ancho de los rollos de geosintético variaba, fueron centrados todos respecto a la subrasante.



Figura 43.- Instalación del geosintético (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Para la preparación de la base, su material se mantuvo a un costado de la vía y al momento de su preparación se le añadió agua hasta alcanzar el contenido de humedad óptimo. Esta capa fue colocada en 2 capas, la primera de 8 pulgadas de espesor tras su compactación y la segunda de 3 pulgadas (las capas variaron para los dos tramos de mayor espesor).

Se hicieron 28 mediciones del espesor de la capa de base en cada tramo, la compactación de la capa se hizo mediante 8 pasadas de un compactador vibratorio de rodillo liso.



Figura 44.- Nivelación de la grava en la superficie (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Se hizo revisión topográfica y diversas mediciones en la superficie final de grava.

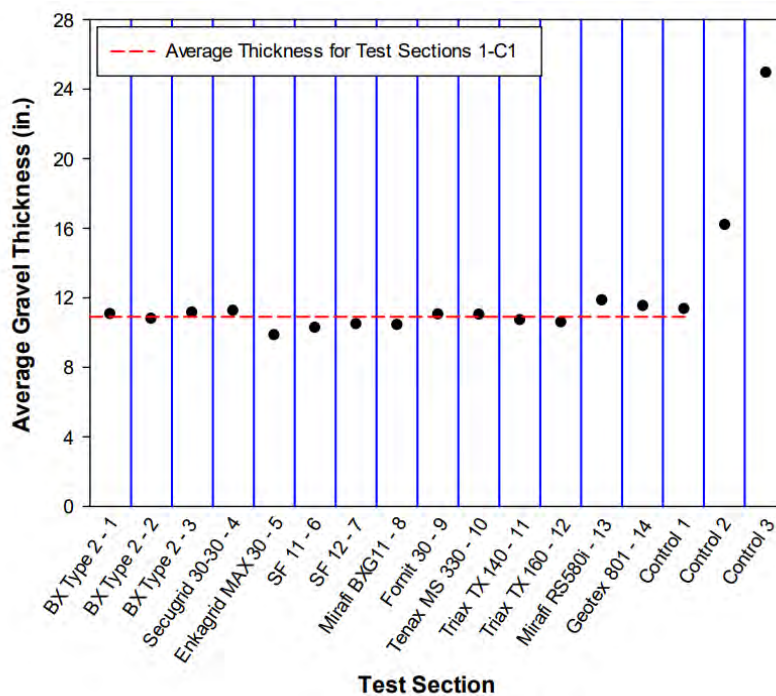


Figura 45.- Espesor promedio de la capa base en cada tramo (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Con las mediciones y cálculos correspondientes se buscó corroborar el CBR de diseño y el módulo dinámico de deflexión (también se hizo medición y se reportó CBR de campo).

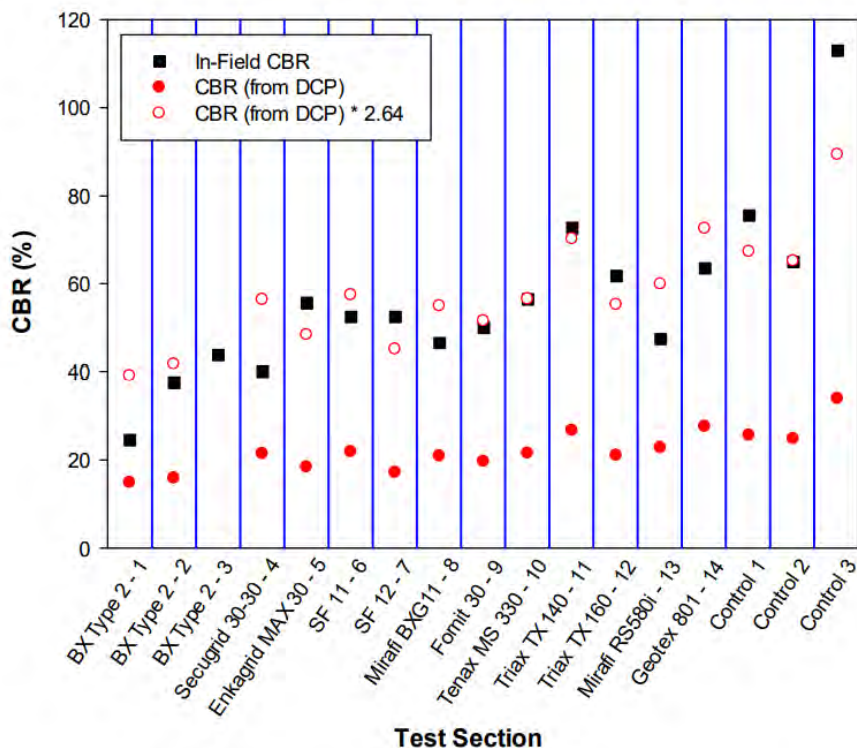


Figura 46.- CBR promedio de la capa base en campo por tramo (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Con un densímetro nuclear se midió el peso unitario seco de la base y el contenido de agua.

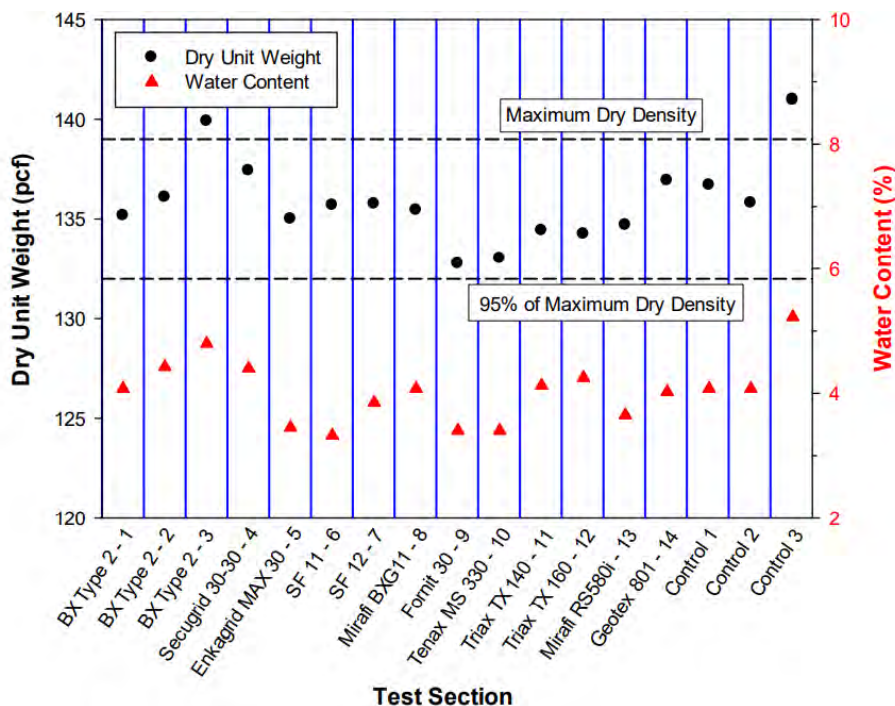


Figura 47.- Densidad y contenido de humedad en sitio de la capa base por tramo (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

La instrumentación del proyecto está enfocada en medir el desplazamiento y la deformación unitaria del geosintético y el cambio en la presión de poro de la subrasante. La información recolectada en los sensores se almacenó en equipos cercanos al sitio de la prueba. Se efectuaron 6 mediciones de desplazamiento transversal del geosintético y tres mediciones del cambio en la presión de poro en dos ubicaciones diferentes dentro del mismo tramo.

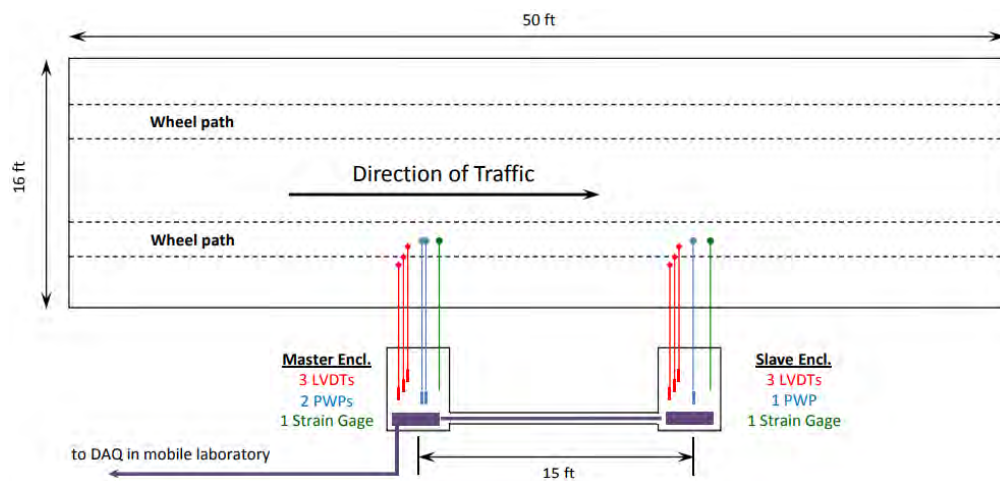


Figura 48.- Interfase de la instrumentación visto en planta en un tramo de prueba (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

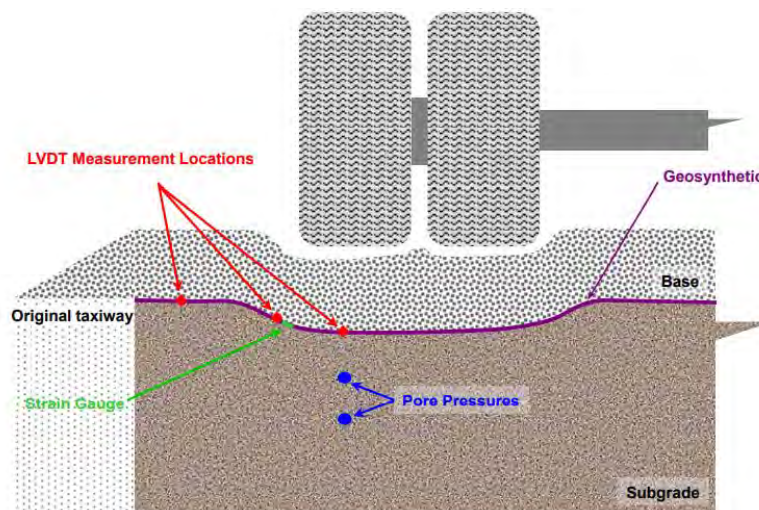


Figura 49.- Interfase de la instrumentación visto en perfil en un tramo de prueba (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

De igual forma se explicó detalladamente cómo se colocó cada uno de estos medidores en el sitio de prueba y cómo se transmitiría la información al centro de mando. También especificaron los factores de calibración para cada tramo.

El inicio del tráfico y la recolección de datos comenzó el 13 de septiembre y culminó el 7 de noviembre, el tráfico se hizo en una sola dirección y a una velocidad 5 millas por hora, se marcaron línea de tránsito. Con lluvias que tuvieran una precipitación de la décima parte de una pulgada se interrumpió el tráfico. Dicho tráfico se mantuvo hasta alcanzar una rodera de 3 pulgadas de profundidad, posterior a ello se colocó grava adicional en la zona de oquedades hasta nivelar con la superficie. El vehículo empleado fue el siguiente:



Figura 50.- Camión empleado para vehículo de prueba para el tráfico (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

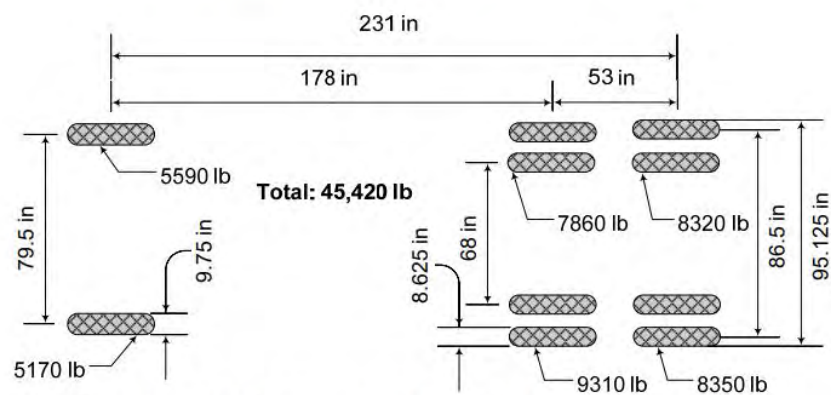


Figura 51.- Dimensiones por eje y pesos asociados al vehículo de prueba (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).



Figura 52.- Fotografía en la sección 10 con aproximadamente cero pulgadas de deformación permanente o rodadura (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).



Figura 53.- Fotografía en la sección 10 con aproximadamente tres pulgadas de deformación permanente o rodadura (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Las mediciones de la rodera se efectuaron cada 40 pulgadas en ambas zonas, para cada sección de prueba se efectuaron 28 mediciones longitudinales (14 de cada línea) bajo diferentes niveles de tráfico. También se realizaron mediciones transversales y mediciones individuales para delimitar el contorno de la superficie deformada.

Date Measured	Truck Passes	Notes
9/13/2012	0	
9/14/2012	3	
9/19/2012	10	
9/20/2012	20	
9/20/2012	40	
9/21/2012	70	C1 only
9/23/2012	80	
9/23/2012	102	C1 only
9/24/2012	125	2, 7 and 9 only
9/25/2012	175	
10/2/2012	250	
10/9/2012	300	
10/15/2012	325	
10/18/2012	351	
10/19/2012	395	
10/29/2012	440	
11/1/2012	540	
11/6/2012	640	
11/19/2012	740	

Tabla 11.- Resumen de la medición de deformaciones/rodera (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

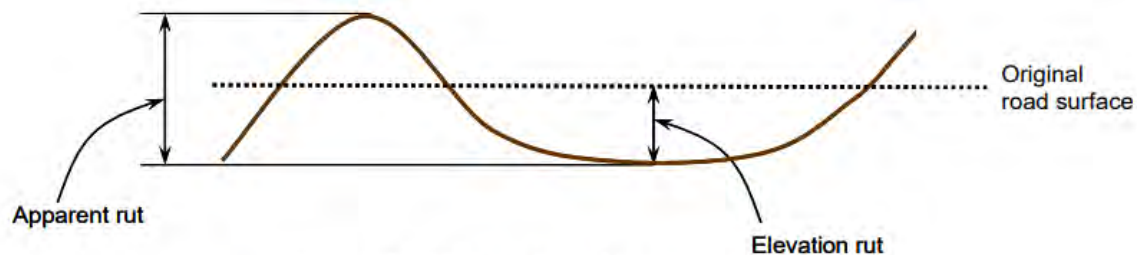


Figura 54.- Esquema de la medición de las roderas (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

La que se considera como deformación es la medición de la línea base antes del tráfico a la profundidad. La deformación aparente que contempla el cambio de elevación de extremo a extremo tiende a ser mayor.

Finalizado el tránsito se inició con una primera ronda de medición de las variables marcadas al inicio de la metodología para esta investigación, su objetivo fue para evaluar el daño en los geosintéticos desde la construcción hasta el tráfico, reevaluar las características de resistencia del suelo, el material de subrasante y el material de base. La primera evaluación se hizo a la semana de haber culminado el tráfico y la segunda se hizo en el verano del año siguiente.

La primera investigación se vio limitada por las bajas temperaturas de la temporada y se limitó a esclarecer las diferencias en los niveles de deformación longitudinal a lo largo del tramo. La segunda revisión fue más exhaustiva pero ya fue con la influencia de los factores climáticos del invierno y primavera en el norte de EUA, lo que implica un cambio en las condiciones del suelo.

En la primera visita con una excavadora pequeña se dejó libre geosintético y la parte superior de la subrasante para hacer mediciones con el Cono Dinámico Penetrómetro DCP, el deflectómetro ligero LWD, mediciones de cortante, y extraer pequeñas muestras para determinar el contenido de agua.

Mientras que en la segunda visita se extrajeron largos tramos (de 6 pies por el ancho del rollo) de geosintéticos en áreas que presentaron la deformación longitudinal cercana a las 3 pulgadas. Se hicieron perfiles topográficos de la deformación transversal para tomarlo en cuenta respecto al espesor de la capa de base, se hicieron mediciones con DCP y LWD, se tomaron muestras en la superficie y al fondo de la capa de la subrasante y también muestra en la capa de la base para ver su contaminación con finos.

Para la deformación en la subrasante, a pesar de que se esperaba un comportamiento similar en la deformación a lo largo del tramo, las diferencias en la magnitud de la rodadura durante el tráfico fueron notables, la primera ronda de mediciones en noviembre de 2012 se centró en registrar la información necesaria para atender esta incógnita. Por la consistencia del suelo se tuvieron complicaciones para registrar buenas lecturas de la resistencia al cortante. En secciones con gran deformación su causa se debió a la ruptura del geosintético.

Geosynthetic Test Section	Excavation Location ^a	Rut Depth at 300 Truck Passes (in.)	CBR from DCP (%)	Dynamic Deflection Modulus (ksf)	Subgrade Moisture Content (%)
Tensar BX Type 2 (Section 2)	7 – East	1.64	2.56	112	21.2
	4 – East	3.22	1.90	85	22.2
NAUE Secugrid 30/30 Q1 (Section 4)	12 – West	2.85	1.91	118	21.3
	12 – East	1.67	1.43	126	21.7
Colbond Enkagrid Max 30 (Section 5)	9 – West	1.82	2.64	182	19.3
	2 – West ^b	4.00	2.31	97	21.8
SynTeen SF 11 (Section 6)	13 – East	4.02	2.58	106	21.7
	5 – East	1.65	2.56	153	22.1
SynTeen SF 12 (Section 7)	6 – East ^b	2.69	2.34	115	21.5
	11 – East	5.36	2.51	78	22.7
TenCate Mirafi BXG 11 (Section 8)	11 – East	3.17	2.35	84	22.3
	8 – East	1.48	2.39	80	22.7
Huesker Fornit 30 (Section 9)	10 – West	3.58	2.00	81	22.9
	2 – East	2.99	2.43	110	23.6
Tensar TX 140 (Section 11)	12 – East	1.75	2.59	140	---
	7 – West	7.38 ^c	2.52	83	22.0
Tensar TX 160 (Section 12)	6 – East	1.55	2.57	102	22.7
	6 – West	7.67 ^c	2.00	82	21.3
TenCate Mirafi RS580i (Section 13)	11 – West	4.18	2.13	83	22.5
	4 – East ^b	1.13	2.37	121	22.8
Propex Geotex 801 (Section 14)	7 – East ^b	1.57	2.54	122	23.0
	11 – East	2.17	2.24	96	21.2

^a number = longitudinal measurement point along test section – direction = east or west wheel path

^b small amounts of water accumulation at the interface between subgrade and base course

^c material fully ruptured at this location resulting in higher rut levels at the point of excavation

--- missing data

Tabla 12.- Propiedades de subrasante del análisis forense efectuado en noviembre de 2012 (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Las mediciones buscaban obtener una posible correlación entre el contenido de humedad de la subrasante, la resistencia de la subrasante medida con la DCP y la rigidez de la subrasante medida con el LWD, pero no se halló una correlación entre estas variables. La deformación en la subrasante en un indicador de cortante por distorsión y no por la compactación de este material, hubo un aumento del 30% en la rigidez aproximadamente respecto a las mediciones hechas tras la construcción.

Para la segunda revisión, se escogieron las áreas en cada tramo que hayan presentado mayor deformación, en dichas áreas se removió la base con aire a presión (para no dañar el material) y se extrajo el geosintético (el cual se fue cortado y almacenado para posteriores evaluaciones).

Posterior a la toma de las muestras de geosintéticos, se hicieron mediciones de las propiedades de la subrasante con DCP, LWD y toma de muestras para contenido de humedad a una profundidad de 4 y 28 pulgadas. Se hace hincapié en los cambios en la humedad que se sufrieron durante ese lapso, la humedad en la superficie fue similar a lo largo del tramo, pero perdió un 6% respecto a las mediciones tras la construcción del tramo, las muestras a mayor profundidad tuvieron un mayor contenido de humedad (pero aun así fue menor respecto a esa misma profundidad tras la construcción). Como resultado, las mediciones con los equipos de DCP y LWD mostraron mayor resistencia en la capa de subrasante. Las correlaciones entre la profundidad de deformación tras las 300 pasadas, CBR, el módulo de deflexión dinámico y el contenido de humedad fueron muy bajas por los cambios que sufrió la subrasante en ese periodo.

Geosynthetic Test Section	Excavation Location ^a	Rut Depth at 300 Truck Passes (in.)	CBR from DCP (%)	Dynamic Deflection Modulus (ksf)	Subgrade Moisture Content (%)	
					Upper	Lower
Tensor BX Type 2 (Section 1)	10 – West	2.54	3.29	108	15.4	16.3
	10 – East	2.91	3.73	111	15.4	17.2
Tensor BX Type 2 (Section 2)	9 – West	2.03	2.67	105	16.1	18.7
	9 – East	1.78	2.87	105	15.9	17.3
Tensor BX Type 2 (Section 3)	9 – West	1.79	2.70	86	16.2	18.9
	9 – East	2.33	3.04	93	16.5	19.2
NAUE Secugrid 30/30 Q1 (Section 4)	8 – West	1.74	3.13	86	16.0	17.5
	8 – East	2.02	3.07	98	16.6	18.6
Colbond Enkagrid Max 30 (Section 5)	4 – West	2.21	3.23	148	16.2	19.6
	4 – East	2.91	2.75	88	16.7	19.1
Synteen SF 11 (Section 6)	3 – West	1.92	3.05	91	16.0	20.3
	3 – East	3.11	3.33	220	17.1	18.6
Synteen SF 12 (Section 7)	9 – West	3.52	3.12	79	17.2	18.3
	9 – East	3.63	3.08	85	16.8	18.0
TenCate Mirafi BXG 11 (Section 8)	3 – West	1.78	2.72	134	17.0	19.7
	3 – East	2.28	2.87	116	16.5	18.3
Huesker Fornit 30 (Section 9)	9 – West	2.89	2.73	94	16.1	18.1
	9 – East	3.94	3.08	94	16.4	19.3
Syntec – Tenax MS 330 (Section 10)	9 – West	2.85	2.99	102	16.3	18.9
	9 – East	2.25	2.86	107	16.0	18.8
Tensor TX 140 (Section 11)	3 – West	2.90	2.92	119	16.7	18.7
	3 – East	2.56	3.03	89	16.6	18.7
Tensor TX 160 (Section 12)	12 – West	3.13	2.91	111	15.7	18.4
	12 – East	3.80	2.74	146	16.4	18.5
TenCate Mirafi RS580i (Section 13)	6 – West	1.28	2.77	88	17.0	17.2
	6 – East	1.22	2.77	85	16.4	19.2
Propex Geotex 801 (Section 14)	9 – West	2.01	3.01	90	16.0	19.0
	9 – East	1.92	2.93	217	16.4	18.4
Control 1	4 – West	2.67 ^b	3.26	87	16.5	18.4
	4 – East	5.15 ^b	2.84	199	15.9	17.3
Control 2	4 – West	2.04	2.79	99	17.2	19.1
	4 – East	1.26	2.69	108	16.9	17.8
Control 3	5 – West	0.90	2.49	74	17.6	18.8
	5 – East	1.26	3.12	99	17.0	18.8

^a number = longitudinal measurement point along test section – direction = east or west rut wheel path

^b rut depth at 102 truck passes when ruts were filled in

Tabla 13.- Propiedades de subrasante del análisis forense efectuado en julio de 2013 (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Respecto a la base, se hicieron revisiones en ambas visitas, estas consistieron en la revisión topográfica para comparar el espesor de la capa antes y después del tráfico, así como la recolección de muestras para medir la contaminación de finos. En promedio, la pérdida del

espesor de la base fue de 0.7 pulgadas, esto se atribuye a la pérdida de agregado en la subrasante, compactación y difusión de la capa de este agregado durante el tráfico.

Geosynthetic Test Section	Location ^a	Original Thickness (in.)		Post-Trafficking Thickness (in.)		Thickness Difference (in.)	
		West rut	East rut	West rut	East rut	West	East
Tensar BX Type 2 (Section 1)	9	11.6	10.8	10.7	9.7	0.9	1.1
	10	11.4	11.0	11.2	9.9	0.2	1.1
	11	11.8	10.3	10.4	10.1	1.4	0.2
Tensar BX Type 2 (Section 3)	8	10.7	10.2	9.9	9.2	0.8	1.0
	9	11.2	10.0	11.1	10.2	0.1	-0.2
	10	10.8	11.0	10.2	11.0	0.6	0.0
NAUE Secugrid 30/30 Q1 (Section 4)	7	10.9	10.1	9.7	9.9	1.2	0.2
	8	10.8	9.7	9.4	9.2	1.4	0.5
	9	11.2	9.9	10.0	8.6	1.2	1.3
TenCate Mirafi RS580i (Section 13)	6	12.0	12.3	11.3	12.1	0.7	0.2
Control 2	3	15.3	15.0	14.3	14.3	1.0	0.7
	4	16.0	14.9	---	15.0	---	-0.1
	5	17.3	15.7	16.6	15.1	0.7	0.6
Control 3	4	25.9	25.4	26.1	25.0	-0.2	0.4
	5	26.4	24.8	25.7	24.5	0.7	0.3
	6	25.2	24.8	24.0	24.4	1.2	0.4

^a longitudinal measurement point along test section

--- missing data

Tabla 14.- Comparación del espesor de la capa de grava antes y después del tráfico (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Para cada tramo, se tomaron 6 muestras de base, tomadas encima, a 4 y a 6 pulgadas de la superficie del geosintético.

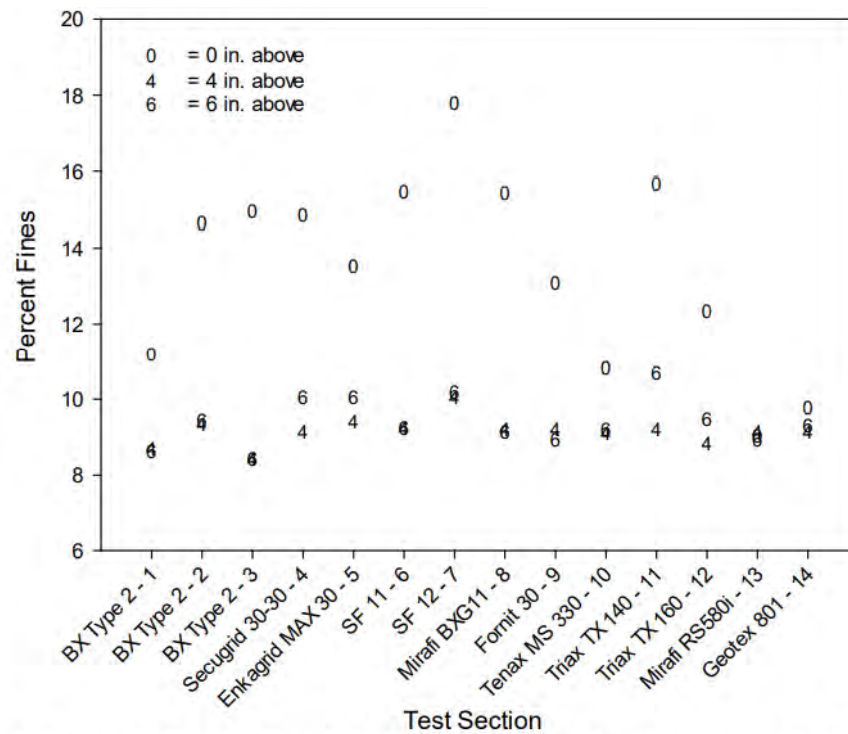


Figura 55.- Porcentaje de finos en la capa base de las muestras encima de los geosintéticos (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

En cuanto a la inspección de las geomallas, se revisaron qué tan intactas se encontraban los nodos y las costillas, ya que las dos formas en que la geomalla soporta y transmite la carga es por la tensión que se sufre en las costillas y las uniones que se forman en las conexiones de las costillas. Los daños variaron en función de la composición estructural del material.

Para el daño de los nodos, se planteó una metodología para determinar qué tan dañado estaba el material por superficie, se registraron fotos de las muestras y se hicieron los cálculos.

Material Type	Percent Intact	Score	Damage Description
Welded Geogrids	100	3	Junction is completely welded
	50-99	2	More than half of the junction is welded
	1-49	1	Less than half of the junction is welded
	0	0	Junction is completely separated
Woven and Knitted Geogrids	100	3	Cross members are completely fixed
	50-99	2	Cross members are somewhat independent
	1-49	1	Cross members are mostly independent
	0	0	Cross members are totally independent
Integrally-Formed and Extruded Geogrids	100	3	No visible damage
	50-99	2	More than half of the junction is together
	1-49	1	Less than half of the junction is together
	0	0	Junction is completely separated

Tabla 15.- Metodología del puntaje para el daño en los nodos (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

$$Intactness = \left[\frac{n_0 \cdot 0 + n_1 \cdot 1 + n_2 \cdot 2 + n_3 \cdot 3}{n_{tot} \cdot 3} \right] * 100\%$$

En donde “n”_i es el número de nodos que presentaron ese número.

Geosynthetic Test Section	Entire Width of Material		Rutted Areas Only	
	Junction Intactness	Range of Values	Junction Intactness	Range of Values
Tensar BX Type 2 (Section 1)	100.0	100.0–100.0	100.0	100.0–100.0
Tensar BX Type 2 (Section 2)	100.0	100.0–100.0	100.0	100.0–100.0
Tensar BX Type 2 (Section 3)	100.0	100.0–100.0	100.0	100.0–100.0
NAUE Secugrid 30/30 Q1 (Section 4)	98.9	87.6–100.0	98.5	87.6–100.0
Colbond Enkagrid Max 30 (Section 5)	96.5	75.5–100.0	94.4	78.4–100.0
Synteen SF 11 (Section 6)	97.6	78.2–100.0	94.4	78.2–100.0
Synteen SF 12 (Section 7)	93.4	61.1–100.0	85.8	61.1–100.0
TenCate Mirafi BXG 11 (Section 8)	99.9	98.4–100.0	99.8	98.4–100.0
Huesker Fornit 30 (Section 9)	94.2	62.5–100.0	86.1	62.5–99.7
Syntec – Tenax MS 330 (Section 10)	99.9	93.6–100.0	99.9	93.6–100.0
Tensar TX 140 (Section 11)	100.0	95.5–100.0	99.9	95.5–100.0
Tensar TX 160 (Section 12)	100.0	100.0–100.0	100.0	100.0–100.0

Tabla 16.- Determinación del daño en los nudos de las geomallas de muestra (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

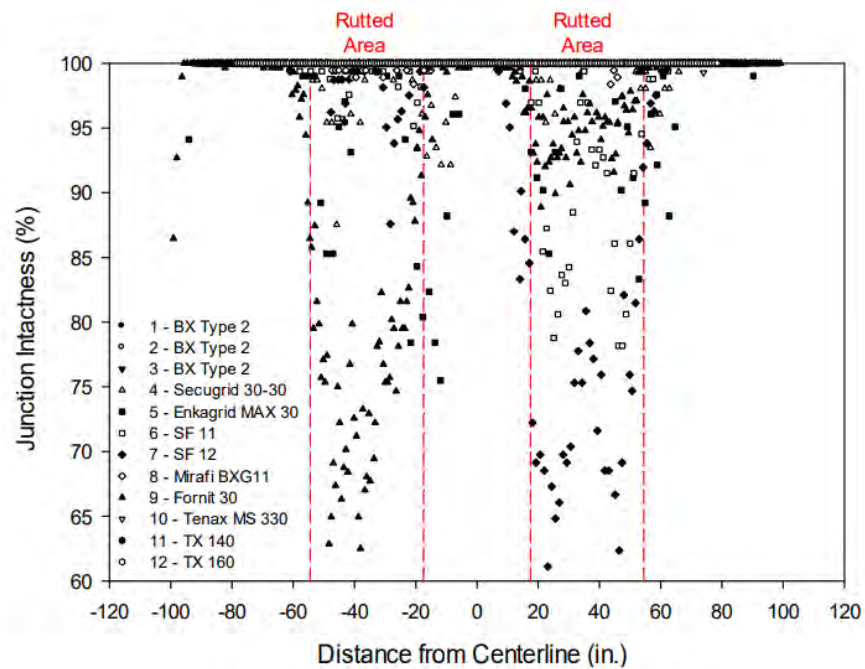


Figura 56.- Grado de qué tan intacto estaban los nudos de las geomallas (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

La mayoría de los daños en los nodos fue en el área deformada, nodos en geomallas extruidas y la geomalla tejida de Mirafi tuvieron poco daño; pero el resto de los modelos de geomallas tejidas o las geomallas soldadas tuvieron el mayor daño.

Para la revisión de las costillas se hizo un proceso de revisión análogo, un sistema de puntaje de 4 puntos en función de cómo se encontraba la costilla. El daño de las costillas en geomallas integras, geomallas extruidas, la geomalla tejida de Tencate y la geomalla soldada de Enkagrid presentaron pocos a nulos daños, pero el resto de las costillas en geomallas tejidas fueron las que presentaron el mayor de los daños.

% Intact	Score	Damage Description
100	3	No visible damage
50-99	2	More than half of the rib is intact
1-49	1	Less than half of the rib is intact
0	0	Rib is completely broken

Tabla 17.- Metodología de puntaje para daño en las costillas de la geomalla (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Table 21: Rib Intactness of Extracted Geogrid Samples in the Machine Direction

Geosynthetic Test Section	Entire Width of Material		Rutted Areas Only	
	Rib Intactness	Range of Values	Rib Intactness	Range of Values
Tensar BX Type 2 (Section 1)	100.0	99.5–100.0	100.0	99.5–100.0
Tensar BX Type 2 (Section 2)	100.0	98.7–100.0	100.0	98.7–100.0
Tensar BX Type 2 (Section 3)	100.0	100.0–100.0	100.0	100.0–100.0
NAUE Secugrid 30/30 Q1 (Section 4)	96.4	82.0–100.0	92.0	82.0–100.0
Colbond Enkagrid Max 30 (Section 5)	99.7	96.0–100.0	99.4	96.0–100.0
Synteen SF 11 (Section 6)	93.7	69.8–100.0	86.2	69.8–99.4
Synteen SF 12 (Section 7)	89.1	64.8–100.0	79.3	64.8–94.3
TenCate Mirafi BXG 11 (Section 8)	99.4	95.1–100.0	98.7	95.1–100.0
Huesker Fornit 30 (Section 9)	98.0	86.3–100.0	95.3	86.3–100.0
Syntec – Tenax MS 330 (Section 10)	100.0	97.8–100.0	99.9	97.8–100.0
Tensar TX 140 (Section 11)	99.4	88.9–100.0	98.8	88.9–100.0
Tensar TX 160 (Section 12)	99.8	93.9–100.0	99.5	93.9–100.0

Tabla 18.- Medición del daño de las costillas de las muestras de geomalla en dirección de la máquina (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Esto también se hizo de forma perpendicular a la máquina, con resultados muy similares a los anteriores.

En cuanto a los geotextiles, los dos que fueron empleados no presentaron daños sobresalientes, el geotextil tejido no presentó arrancamiento y una revisión topográfica marcó poca desviación de la capa de material respecto a su ubicación tras la construcción del tramo de prueba.

En resumen, las menores deformaciones se dieron en las geomallas íntegras y extruidas seguido de las geomallas soldadas y el geotextil tejido, las geomallas con nodos tejidos tuvieron gran distorsión, pero el geosintético que sufrió mayores deformaciones fue el geotextil no tejido. Se hizo una correlación entre la distorsión y la profundidad de deformación de la rodela, pero esta resultó ser muy baja.

Muchas de las secciones mostraron evidencia del efecto de la membrana tensionante.

Geosynthetic Test Section	Excavation Location ^a	Rut Depth at 300 Truck Passes (in.)	Average Distortion (in.)
Tensar BX Type 2 (Section 1)	10 – West	2.54	0.4
	10 – East	2.91	0.3
Tensar BX Type 2 (Section 2)	9 – West	2.03	0.8
	9 – East	1.78	0.4
Tensar BX Type 2 (Section 3)	9 – West	1.79	0.2
	9 – East	2.33	0.1
NAUE Secugrid 30/30 Q1 (Section 4)	8 – West	1.74	0.6
	8 – East	2.02	0.4
Colbond Enkagrid Max 30 (Section 5)	4 – West	2.21	0.6
	4 – East	2.91	0.5
Synteen SF 11 (Section 6)	3 – West	1.92	1.2
	3 – East	3.11	0.8
Synteen SF 12 (Section 7)	9 – West	3.52	1.7
	9 – East	3.63	1.8
TenCate Mirafi BXG 11 (Section 8)	3 – West	1.78	0.9
	3 – East	2.28	1.0
Huesker Fornit 30 (Section 9)	9 – West	2.89	1.5
	9 – East	3.94	1.7
Syntec – Tenax MS 330 (Section 10)	9 – West	2.85	0.4 ^b
	9 – East	2.25	0.7 ^b
Tensar TX 140 (Section 11)	3 – West	2.90	0.0
	3 – East	2.56	0.0
Tensar TX 160 (Section 12)	12 – West	3.13	0.0
	12 – East	3.80	0.0
TenCate Mirafi RS580i (Section 13)	6 – West	1.28	1.1
	6 – East	1.22	0.9
Propex Geotex 801 (Section 14)	9 – West	2.01	3.9
	9 – East	1.92	3.9

^a longitudinal measurement point along test section – direction = east or west wheel path

^b average of all three layers (avg. top-east = 0.9 in., avg. top-west = 0.6 in., avg. mid-east = 0.7 in., avg. mid-west = 0.1 in., avg. bot-east = 0.4 in., avg. bot-west = 0.4 in.)

Tabla 19.- Distorsión de los geosintéticos debido al tráfico (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Aparte de todo esto, se sacaron tres muestras de los geosintéticos desenterrados y se probaron en la máquina para evaluar cambios en su resistencia a la tensión después del

tráfico. La resistencia al 2% de la deformación unitaria y la resistencia última disminuyeron, se adjudica la abrasión y factores del entorno a esta disminución, quienes presentaron mayor pérdida fueron algunas geomallas con nodos tejidos, y las que mostraron menor pérdida fueron las geomallas íntegramente formadas.

Geosynthetic Test Section	West Wheel Path			Center			East Wheel Path			Virgin Material		
	Strength ^a (lb/ft)			Strength ^a (lb/ft)			Strength ^a (lb/ft)			Strength ^a (lb/ft)		
	2%	5%	Ult.	2%	5%	Ult.	2%	5%	Ult.	2%	5%	Ult.
Tensar BX Type 2 (Sect. 1)	870	1590	1871	877	1590	1939	857	1569	1857	822	1494	1946
Tensar BX Type 2 (Sect. 2)	857	^b	1528	863	1583	1699	843	^b	1275	822	1494	1946
Tensar BX Type 2 (Sect. 3)	836	1549	1809	877	1590	1823	863	^b	1507	822	1494	1946
NAUE Secugrid 30/30 Q1	939	1788	2056	973	1891	2645	946	1788	1891	946	1830	2713
Colbond Enkagrid MAX 30	863	1672	1672	898	1816	2343	870	1720	1747	857	1775	2378
Synteen SF 11	637	911	3056	644	932	3529	624	918	2535	617	925	3782
Synteen SF 12	719	980	2713	740	1042	4200	733	1069	2782	987	1446	5818
TenCate Mirafi BXG11	761	1316	2378	747	1240	3501	740	1213	3207	740	1281	3221
Huesker Fornit 30	850	1014	1309	939	1891	2152	610	^b	719	946	1939	2618
SynTec Tenax MS 330 ^c	740	1295	1562	678	1309	2056	733	1412	1740	692	1343	2248
Tensar TX140	343	^b	528	329	658	685	343	658	678	322	665	843
Tensar TX160	397	740	761	384	754	822	377	^b	692	391	747	884
TenCate Mirafi RS580i	1597	3577	5030	1576	3618	5961	1645	3645	5338	1501	3440	6112
Propex Geotex 801	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT	^d	^d	255 ^e

^a ASTM D4595 and ASTM D6637

^b failure occurred before 5% strain

^c tested by WTI as a composite, i.e., not separately

^d data was difficult to interpret at low strain values

^e grab tensile strength (ASTM D4632) in pounds as tested by SGI Testing Services, LLC

NT = not tested

Tabla 20.- Resistencia a la tensión en dirección perpendicular a la máquina de las muestras de geomallas extraídas (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Las conclusiones de estas dos rondas después de las mediciones fueron las siguientes:

- Algunas medidas de la rigidez en la superficie de la subrasante revelaron posibles correlaciones con la formación de las deformaciones por rodadura, así como el equipo LWD

tiene un uso potencial para predecir el desempeño de los geosintéticos al emplearse en la estabilización de subrasantes.

- El espesor de la capa base disminuyó 0.7 pulgadas, puede atribuirse a la compactación y desprendimiento del agregado.
- El contenido de finos a la altura del geosintético fue 5% mayor al contenido 4-6 pulgadas arriba de este, la sección 13 (que tenía el geotextil tejido de Tencate Mirafi) fue la que tuvo la menor contaminación de finos.
- El nivel de distorsión no está vinculado con la deformación en la rodera.

Posterior a la interpretación inicial de las mediciones, se efectuaron análisis más detallados con los datos obtenidos, buscando determinar el desempeño de cada sección efectuando lo siguiente:

- Correcciones de las medidas de deformación longitudinal durante el tráfico a partir de los datos coleccionados de las secciones de pruebas construidas con diferente resistencia en la subrasante y espesores de la capa base.
- Un análisis estadístico para verificar, validar y comparar los datos de la deformación longitudinal, posterior a ellos se hicieron regresiones para determinar posibles correlaciones entre varias propiedades de los geosintéticos y el desempeño en los tramos de prueba.
- Perfiles de deformación transversal, desplazamientos y deformaciones unitarias transversales se emplearon para entender el comportamiento del material durante el tráfico.
- Las medidas de la variación en la presión de poro se relacionaron con el desempeño de las secciones de prueba.

El comportamiento de la deformación por rodera se ve influenciado principalmente por la resistencia de la subrasante, el espesor y la resistencia de la capa base y la presencia del geosintético, las secciones de control buscan facilitar la comparación de la información de las demás secciones. Pese al meticuloso trabajo para que no hubiera variaciones en la resistencia de la subrasante y en el espesor de la base, pequeñas variaciones se presentaron.

El siguiente gráfico muestra la respuesta a la deformación de todas las secciones (una que vez que hicieron las correcciones), a mayor pendiente es que mostraron peor desempeño con una mayor deformación en menos tiempo.

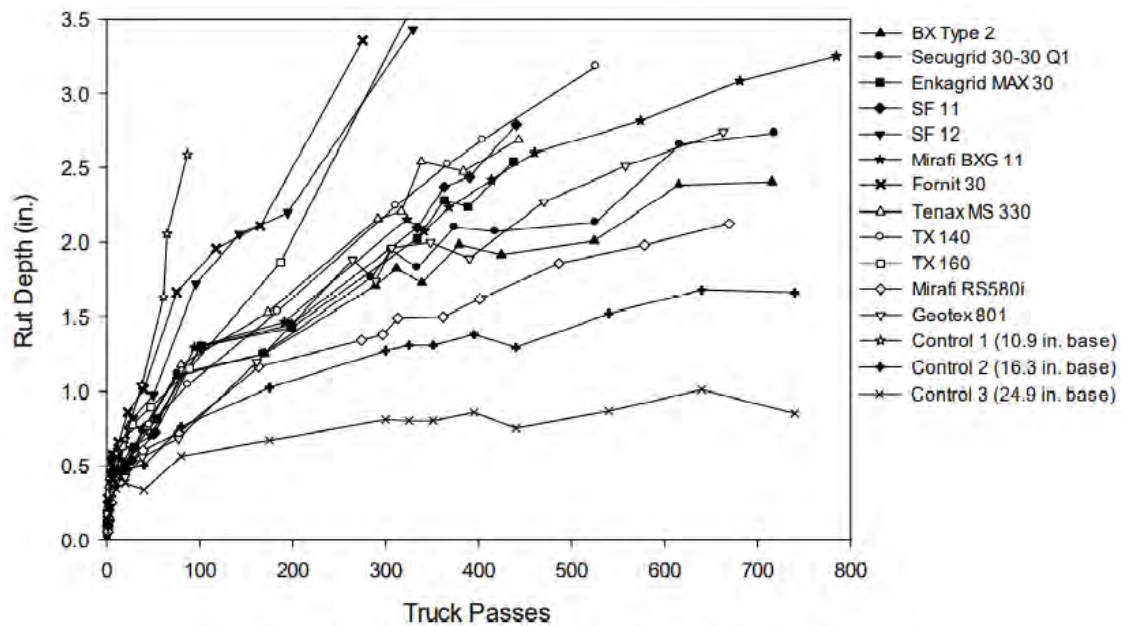


Figura 57.- Deformación permanente, rodera, corregida de todas las secciones de prueba (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

El análisis a partir de la respuesta de deformación longitudinal se hizo usando la información del gráfico anterior y determinar que propiedad del geosintético influye más en

el desempeño de las secciones de prueba. Los análisis se hicieron a deformaciones con profundidades de 1, 2 y 2.5 pulgadas, y se evaluaron las siguientes propiedades del material:

- Resistencia a la tensión ancho-largo al 2% de deformación
- Resistencia a la tensión ancho-largo al 5% de deformación
- Resistencia última a la tensión ancho-largo
- Rigidez cíclica a la tensión a varios porcentajes
- Rigidez en la resiliencia al cortante en la interfase
- Resistencia de los nodos
- Rigidez de los nodos (toma la secante de rigidez de la resistencia del nodo a una respuesta de 0.05 pulgadas de desplazamiento)
- Módulo de estabilidad de apertura (Rigidez torsional)

Se hizo una regresión lineal, se escogió esta regresión por la poca cantidad de puntos. Obteniendo el valor de raíz R, el coeficiente de determinación, se empleó para verificar que tan bien se apegan los datos a la regresión lineal, valores más cercanos a +1.0 indican buenas correlaciones y los cercanos a ceros o negativos indican mala correlación.

	Cross-machine direction*			Machine direction*		
	1.0 in. rut	2.0 in. rut	2.5 in. rut	1.0 in. rut	2.0 in. rut	2.5 in. rut
Wide-width strength @ 2%	-0.520	-0.437	-0.479	-0.855	-0.382	-0.560
Wide-width strength @ 5%	0.078	0.083	0.119	-0.769	-0.362	-0.545
Ultimate wide-width strength	-0.073	-0.372	-0.377	0.511	0.289	0.305
Cyclic modulus @ 0.5%	-0.739	-0.629	-0.706	-1.381	-0.772	-1.114
Cyclic modulus @ 1.0%	0.012	-0.075	-0.044	-1.241	-0.727	-1.037
Cyclic modulus @ 1.5%	0.122	-0.009	0.037	-1.035	-0.566	-0.828
Cyclic modulus @ 2.0%	0.102	-0.045	-0.005	-0.959	-0.517	-0.766
Cyclic modulus @ 3.0%	0.055	-0.112	-0.081	-0.836	-0.503	-0.754
Cyclic modulus @ 4.0%	0.034	-0.125	-0.103	-0.693	-0.417	-0.647
Resilient interface shear stiffness	-1.327	-0.589	-0.588	---	---	---
Junction strength ^a	0.065	0.601	0.649	---	---	---
Junction stiffness ^a	0.176	0.720	0.680	---	---	---
Aperture stability modulus ^{a,b}	-0.447	-0.208	-0.297	-0.447	-0.208	-0.297

* bolded values indicate R-squared values greater than 0.500

--- material tests not conducted in the machine direction

^a junction strength and stiffness, and aperture stability modulus of the Tenax MS 330 product was not included in this analysis because it was difficult to determine this property based on the fact that it consisted of three layers

^b aperture stability modulus is not direction dependent so values are the same for machine and cross-machine directions

Tabla 21.- Resultados del análisis de la regresión lineal empleando datos de todas las secciones de prueba (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Las propiedades del geosintético que influyeron más en el desempeño fueron la resistencia y rigidez de los nodos. Se hizo una segunda regresión omitiendo los datos de los geosintéticos que no se desempeñaron adecuadamente (ya que la transmisión de la carga no se llevó correctamente por los nodos débiles). Esta segunda regresión indicó que la resistencia a la tensión del material también es un buen indicador (por las resistencias a la tensión ancho-largo con el 5% de deformación unitaria y la resistencia última de tensión). Por información faltante es que se redujo el valor de la Raíz-R con la resistencia y rigidez de los nodos.

Table 26: R-Squared Results of Linear Regression Analysis Using Select Data

	Cross-machine direction*			Machine direction*		
	1.0 in. rut	2.0 in. rut	2.5 in. rut	1.0 in. rut	2.0 in. rut	2.5 in. rut
Wide-width strength @ 2%	0.436	0.691	0.577	-0.529	-0.041	-0.236
Wide-width strength @ 5%	0.609	0.667	0.668	-0.415	0.011	-0.197
Ultimate wide-width strength	0.612	0.456	0.379	0.678	0.515	0.509
Cyclic modulus @ 0.5%	0.269	0.590	0.429	-0.933	-0.286	-0.660
Cyclic modulus @ 1.0%	0.633	0.680	0.659	-0.749	-0.196	-0.536
Cyclic modulus @ 1.5%	0.676	0.673	0.670	-0.566	-0.060	-0.350
Cyclic modulus @ 2.0%	0.683	0.666	0.657	-0.501	-0.023	-0.300
Cyclic modulus @ 3.0%	0.672	0.643	0.623	-0.372	0.003	-0.275
Cyclic modulus @ 4.0%	0.644	0.638	0.605	-0.281	0.042	-0.213
Resilient interface shear stiffness	-0.912	0.146	0.053	---	---	---
Junction strength ^a	-0.234	0.481	0.545	---	---	---
Junction stiffness ^a	-0.407	0.611	0.505	---	---	---
Aperture stability modulus ^b	-0.181	0.063	-0.065	-0.181	0.063	-0.065

* bolded values indicate R-squared values greater than 0.500

--- material tests not conducted in the machine direction

^a junction strength and stiffness of the Tenax MS 330 product was not included in this analysis because it was difficult to determine this property based on the fact that it consisted of three layers

^b aperture stability modulus is not direction dependent so values are the same for machine and cross-machine directions

Tabla 22.- Resultados del análisis de la regresión lineal empleando datos de secciones en específico (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Un resumen del análisis de todos los resultados se expuso en la tabla de la siguiente página.

El desempeño de los geosintéticos en la estabilización de subrasante depende de las propiedades del camino que se busca estabilizar. En caso donde el aporte estructural venga menos de la base y más del geosintético (se efectuaron las correlaciones anteriores, pero con los datos de la fase I de la investigación de 2009), la rigidez y la resistencia juegan un papel importante en la disminución de las deformaciones por rodera. La resistencia y rigidez de los nodos también influyen, pero su influencia disminuye con el aumento en la deformación. Pero en situaciones donde hay mayor espesor de base y la deformación por rodera se desarrolla a menor velocidad, el papel de la rigidez y la resistencia de los nodos influyen más para mejorar el desempeño ante el desarrollo de rodera, parte de ello es la necesidad que se

tiene de la rigidez del geosintético en la transmisión de las cargas al material, especialmente en la dirección perpendicular.

	Tensor BX Type 2	Secugrid 30-30 Q1	Enkagrid MAX 30	Synreen SF 11	Synreen SF 12	Mirafi BXG11	Fornit 30	Tenax MS 330	Tensor TX 140	Tensor TX 160	TenCate RS580i	Geotex 801	Information Source
Performance													
BCR (%)	23.8	21.9	19.6	19.0	11.7	19.3	10.2	17.7	17.4	13.1	26.9	21.3	Table 32
TBR @ 2 in. rut	7.9	6.6	5.2	4.9	2.6	5.1	2.3	4.4	4.3	2.9	10.8	6.2	Table 33
TP @ 1 in. rut ^a	96	86	75	73	49	74	46	68	67	53	115	83	Figure 77
TP @ 2 in. rut ^a	449	371	297	280	146	288	129	250	242	165	611	351	Figure 77
TP @ 2.5 in. rut ^a	737	595	462	433	207	447	180	380	367	237	1046	559	Figure 77
Avg. junction intactness (%)	100	98.5	94.4	94.4	85.8	99.8	86.1	99.9	99.9	100	N/A	N/A	Table 19
Avg. XMD rib intactness (%)	100	94.0	99.6	96.6	96.4	100	74.9	100	99.7	99.9	N/A	N/A	Table 22
Avg. 2% XMD strength loss (%) ^b	-3.3	0.4	-1.2	-2.2	26.4	-1.4	22.8	-6.4	-6.4	0.9	-8.0	NT	Table 24
Overall performance ranking	2	3	5	7	11	6	12	8	9	10	1	4	N/A
Geosynthetics													
2% XMD strength (lb/ft)	822	946	857	617	987	740	946	692	322	391	1501	25 ^c	Table 5
5% XMD strength (lb/ft)	1494	1830	1775	925	1446	1281	1939	1343	665	747	3440	73 ^c	Table 5
2% XMD cyclic modulus (kip/ft)	62	79	69	58	91	67	76	54	28	31	157	NT	Figure 10
XMD junction strength (lb/in)	172	58	50	37	29	36	11	66 ^d	72	75	N/A	N/A	Table 8
XMD junction stiff. (lb/in/in)	632	642	498	315	252	518	99.2	157 ^d	316	198	N/A	N/A	App. D
Subgrade													
Avg. strength (psf) ^e	1225	1236	1202	1204	1254	1236	1235	1209	1195	1210	1133	1165	Figure 24
Avg. density (pcf) ^f	102.3	105.0	102.7	104.5	103.7	102.6	103.8	105.4	103.2	103.3	103.5	103.7	Figure 29
Water content (%)	25.2	22.4	23.1	22.9	22.5	23.1	23.1	21.5	22.9	22.5	22.6	22.2	Figure 29
Base Course													
Avg. thickness (in.) ^g	11.0	11.1	9.9	10.3	10.4	10.3	10.9	11.2	10.8	10.6	11.8	11.5	Figure 33
Avg. strength (CBR) ^h	18.1	18.7	17.5	18.9	16.1	15.7	20.5	24.0	23.3	18.8	21.7	23.3	Figure 34
Avg. dynamic stiffness (ksf) ⁱ	335	413	420	427	324	331	397	544	480	434	539	510	Figure 35
Avg. density (pcf) ^f	139.9	137.4	135.0	135.7	135.8	135.5	132.8	133.0	134.4	134.3	134.7	136.9	Figure 39
Water content (%) ^f	4.8	4.4	3.5	3.3	3.9	4.1	3.4	3.4	4.1	4.3	3.7	4.0	Figure 39

^a Values were determined using the power curve estimations used in the DCR and TDR analyses; values greater than 740 are predicted

^b Positive values indicate strength loss; negative values indicate strength gain

^c Results of wide-width tests on the Propex Geotex 801 geotextile having a 1 in. gage length

^d Junction strength and stiffness are for a single layer of material (three layer material)

^e Undrained shear strength determine by in-field vane shear during construction (performance differences due to variance of subgrade strength was adjusted based on the performance of Test Section 1 and 2)

^f From in-field nuclear density measurements

^g Performance differences due to variance of base course thickness was adjusted based on the performance of Control 1, Control 2, and Control 3 test sections

^h Base course strength determined by DCP measurements prior to trafficking

ⁱ Dynamic stiffness of base course as determined by LWD measurements prior to trafficking

N/A = not applicable

NT = not tested

Tabla 23.- Resumen del desempeño de las secciones de prueba y las características de los materiales (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Las conclusiones generales de toda esta investigación fueron las siguientes:

- Una regresión lineal para ver la correlación de las propiedades del geosintético y el desempeño ante la deformación por rodadura indican buenos resultados con la resistencia y rigidez de los nudos, la resistencia a la tensión ancho-largo, y la rigidez cíclica en la dirección perpendicular.
- El análisis transversal de deformaciones indica que el mecanismo de refuerzo en un inicio es el confinamiento lateral a bajos niveles de deformación, pero a partir de las 2 pulgadas (presentando antes de las 300 pasadas de camión) el mecanismo presentado fue membrana de soporte.
- El geotextil tejido fue el que tuvo el mejor desempeño, pero se requiere más investigación para esclarecer las propiedades a las que se debe esto. Las propiedades de fricción en la superficie y la resistencia a la tensión pueden ser unas de las causas.
- El geotextil no tejido a pesar de tener una menor resistencia tuvo un desempeño mejor que varias geomallas, más investigación se necesita para esclarecer a qué se debe esto.
- Algunas medidas en la rigidez en la superficie de la subrasante y la base muestran una potencial correlación con el desempeño a la deformación por rodadura, por lo que el equipo LWD posiblemente puede emplearse para predecir el desempeño de los geosintéticos en esta aplicación.
- Mediciones después del tráfico en las propiedades a tensión de los geosintéticos mostraron un incremento en la resistencia a la tensión al 2% de la deformación unitaria y una disminución en la resistencia a la tensión última en la mayoría de los geosintéticos.

- Una regresión lineal simple indicó que no hay una tendencia clara en la variación de la presión de poro con las propiedades de los geosintéticos.

Los resultados del estudio indican que la resistencia y la rigidez de los nudos y miembros que se tensionen son las propiedades que incluyen en el desempeño de los geosintéticos al aplicarse en la estabilización de subrasante, su contribución depende del espesor de la capa de la base y la profundidad prevista de la deformación por rodera. Para emplear estos geosintéticos en esta función, aún se requiere más estudios para especificar los valores mínimos en las propiedades de los materiales con los cuales se tenga un buen desempeño en las secciones de prueba respecto a la formación de estas deformaciones.

Comparativa de los resultados en cambio con la Teoría de Giroud-Han 2004

Previo a la discusión general de todas las investigaciones revisadas, en este apartado se hará una comparativa numérica entre algunas de las mediciones obtenidas en campo de la investigación con lo que se calcularía empleando la Teoría de Giroud-Han 2004. Recapitulando la estructura de la ecuación de estabilización de suelos con geosintéticos de esta teoría, se tiene la siguiente expresión:

$$h = \frac{0.868 + (0.661 - 1.006 * J^2) \left(\frac{r}{h}\right)^{\frac{1}{2}} \log N}{\left[1 + 0.204 \left(\frac{3.48 * CBR_{BG}^{0.3}}{CBR_{SR}} - 1\right)\right]} \left[\sqrt{\frac{\frac{P}{\pi * r^2}}{\frac{S}{f_s} \left[1 - 0.9 * e^{-\left(\frac{r}{h}\right)^2}\right] Nc * fc * CBR_{SR}} - 1} \right] * r$$

Donde:

- h (m) = Espesor de la capa de material granular requerido.
- J (m-N/°) = Módulo de rigidez del geosintético
- N = Número de repeticiones de carga
- P (kN) = Carga por rueda, $2P$ es igual a la carga del eje.
- r (m) = Radio del área de contacto de la llanta.
- CBR_{SR} % = CBR de la subrasante (o de la capa de material debajo del refuerzo)
- CBR_{GB} % = CBR del material granular (o de la capa de material encima del refuerzo)
- s (mm) = Rodera
- N_c = Factor de capacidad portante
- f_s = Profundidad del ahuellamiento/rodera de referencia (75mm).
- f_c = Constante de 30 kPa

En el proceso convencional del diseño con geosintéticos para esta función, de las fichas técnicas se obtienen la información de los geosintéticos de refuerzo y de los estudios en campo se obtienen los parámetros del suelo, por lo que esta expresión funge como una ecuación iterativa en donde se propone un espesor de la capa granular que se colocaría encima del geosintético hasta llegar a un espesor de capa en el que se obtenga el mismo valor en ambos lados de la ecuación.

Para este caso, el espesor de la capa es una variable conocida junto con las propiedades del suelo y las características del geosintético, siendo entonces el valor de la rodera la variable que se estimaría con esta ecuación y se comparará con las roderas medidas en la primera ronda de recolección de resultados del estudio. No se hará comparación con las roderas

medidas en la segunda ronda de resultados porque hubo un intervalo de meses entre ambas recolecciones de información, teniendo así una gran discrepancia de resultados vinculados a las propiedades del geosintético a causa de las condiciones ambientales presentadas en ese lapso de meses.

Se seleccionaron 4 de los 14 analizados en el estudio, junto con un cálculo de control determinando la rodera teórica sin la presencia de un geosintético de refuerzo. Los casos de prueba seleccionados fueron:

1. El geotextil tejido de fibra de polipropileno del caso 13 llamado Mirafi RS580i de Tencate.
2. La geomalla biaxial tejida de multifilamento de poliéster correspondiente al caso 8 con el nombre de Mirafi BXG-11 de Tencate.
3. La geomalla biaxial soldada de polipropileno del caso 5 llamada Enkagrid MAX 30 de Colbond.
4. La geomalla biaxial extruida (íntegramente formada) de la sección 2 denominada BX Type 2 de Tensar.

La selección de estos casos de prueba se debió a que fueron los de mejor desempeño para cada uno de los tipos de geosintéticos de refuerzo estudiados: geotextiles tejidos, geomallas extruidas, geomallas soldadas y geomallas tejidas. Al no ser un geosintético de refuerzo, el caso de prueba del geotextil no tejido fue omitido.

Cabe destacar que se determinarán dos roderas para los 4 casos (sin contar el caso de control), esto se debe a que la metodología del estudio planteó 740 pasadas del vehículo de prueba pero en sus resultados reportó las roderas a las 300 pasadas, por lo que se calculará la

rodera ambos casos y así tener un valor de referencia puesto que la segunda rodera de cada caso en las mediciones en campo contempla el cambio no únicamente del número de pasadas, sino también de un cambio de CBR calculado por mediciones indirectas tras el tránsito.

La información que se puede generalizar para todos los cálculos es la siguiente:

- $h = 0.3048\text{m}$ (o las 12 pulgadas indicadas en el proceso constructivo del tramo de prueba)
- $N = 740 / 300$
- $P \text{ (kN)} = 37.5 \text{ kN}$

Este dato se obtuvo a partir del eje del camión usado en el estudio con la mayor carga, dicho eje sumaba 16,700 libras que al convertirlas en toneladas dieron un valor de 7.582 Ton equivalentes a 75 kN por eje.

- $r \text{ (m)} = 0.125\text{m}$

Obtenido calculando la raíz cuadrada del cociente de la carga por rueda entre π por la presión de inflado de las llantas del vehículo (usándose un valor de ficha técnica empleada para este tipo de vehículo).

$$r = \sqrt{\frac{37.5}{\pi * 760}} = 0.125\text{m}$$

- $\text{CBR}_{\text{SR}} = 1.7\%$ (de los estudios geotécnicos contemplados para las roderas por 740 pasadas del vehículo, con excepción del caso de prueba de la geomalla extruida en donde se empleó un CBR menor del 1.4%).
- $\text{CBR}_{\text{GB}} = 100\%$ (acorde a los estudios geotécnicos de la base)

- $N_c = 3.14$ para el caso de control sin refuerzo, 5.14 para el geotextil tejido y 5.71 para los tres casos con la geomalla.
- $f_s = 75\text{mm}$
- $f_c = \text{Constante de } 30 \text{ kPa}$

El primero de los dos datos que cambiará para cada caso corresponde al Módulo de Rigidez del Geosintético (J), al que la investigación previa hace referencia como “Aperture Stability Modulus” pero emplea las mismas unidades equivalentes al sistema inglés. Los valores que se emplearán en cada caso para esta variable se tomarán de los medidos en el estudio y resumidos en la siguiente tabla:

Table 9: Summary of Aperture Stability Modulus Test Results

Geosynthetic Test Section	Tested by SGI	Published by Manufacturer
	Aperture Stability Modulus (in-lb/deg)	Aperture Stability Modulus (in-lb/deg)
Tensar BX Type 2	6.9	5.75
NAUE Secugrid 30/30 Q1	10.2	9.90
Colbond Enkagrid Max 30	13.9	NP
Synteen SF 11	2.2	NP
Synteen SF 12	2.4	NP
TenCate Mirafi BXG 11	3.1	NP
Huesker Fornit 30	9.6	6.55
SynTec Tenax MS 330	3.2 ^a	NP
Tensar TX 140	2.5	2.60 ^b
Tensar TX 160	4.9	3.13 ^b
TenCate Mirafi RS580i	NA	NA
Propex Geotex 801	NA	NA

^a Tested a single layer, and multiplied by 3 (three layer material)

^b Test was performed using a torque of 4.34 in-lb. (the standard is 17.70 lb-in), which may imply that the aperture stability modulus is less than the value published by the manufacturer, according to the procedure outlined by Kinney (2000).

NA = Not applicable

NP = Information was not provided by the manufacturer

Tabla 24.- Resultados de las pruebas de rigidez torsional (J) en los geosintéticos de refuerzo en los tramos de prueba (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Las conversiones al sistema de unidades que marca la ecuación de Giroud-Han para cada caso se muestra a continuación=

a) Para la geomalla biaxial tejida:

$$3.1 \text{ in} * lb_f = \frac{0.0254m}{1 \text{ in}} * \frac{4.44822 N}{1 lb_f} \rightarrow 0.35025 \frac{m - N}{\text{grados}}$$

b) Para la geomalla biaxial soldada:

$$13.9 \text{ in} * lb_f = \frac{0.0254m}{1 \text{ in}} * \frac{4.44822 N}{1 lb_f} \rightarrow 1.5705 \frac{m - N}{\text{grados}}$$

c) Para la geomalla biaxial extruida:

$$6.9 \text{ in} * lb_f = \frac{0.0254m}{1 \text{ in}} * \frac{4.44822 N}{1 lb_f} \rightarrow 0.7796 \frac{m - N}{\text{grados}}$$

Mientras que el segundo dato que cambiará para cada caso será el CBR correspondiente a las 300 pasadas del camión, este valor será tomado de la tabla en donde vienen las mediciones de rodera en campo para cada uno de los casos de prueba. Misma que previamente ya fue colocada en este documento, pero se presenta nuevamente a continuación únicamente con los casos de interés.

Geosynthetic Test Section	Excavation Location ^a	Rut Depth at 300 Truck Passes (in.)	CBR from DCP (%)	Dynamic Deflection Modulus (ksf)	Subgrade Moisture Content (%)
Tensar BX Type 2 (Section 2)	7 – East	1.64	2.56	112	21.2
	4 – East	3.22	1.90	85	22.2
Colbond Enkagrid Max 30 (Section 5)	9 – West	1.82	2.64	182	19.3
	2 – West ^b	4.00	2.31	97	21.8
TenCate Mirafi BXG 11 (Section 8)	11 – East	3.17	2.35	84	22.3
	8 – East	1.48	2.39	80	22.7
TenCate Mirafi RS580i (Section 13)	11 – West	4.18	2.13	83	22.5
	4 – East ^b	1.13	2.37	121	22.8

Tabla 25.- Propiedades de la subrasante del análisis forense llevado a cabo en noviembre del 2012, casos seleccionados a partir de la Tabla 12 correspondiente al quinto estudio (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

En la siguiente tabla se condensan todos los datos que serán sustituidos en el cálculo de las dos roderas para cada uno de los 4 casos y la rodera para el caso de control:

Datos	Caso control	Geotextil tejido		Geomalla tejida		Geomalla soldada		Geomalla extruida (íntegra)	
h (m)	0.3048	0.3048	0.3048	0.3048	0.3048	0.3048	0.3048	0.3048	0.3048
J (m-N/°)	0	0	0	0.35	0.35	1.57	1.57	0.779	0.779
N	740	740	300	740	300	740	300	740	300
P (kN)	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5
r (m)	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
CBR_{SR} %	1.7	1.7	2.37	1.7	2.39	1.7	2.31	1.4	1.9
CBR_{GB} %	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Nc	3.14	5.14	5.14	5.71	5.71	5.71	5.71	5.71	5.71
fs (mm)	75	75	75	75	75	75	75	75	75
fc (kPa)	30	30	30	30	30	30	30	30	30

Tabla 26.- Resumen de datos del quinto estudio para los cálculos de rodera con la metodología de Giroud-Han 2004 (Elaboración propia).

Cálculo del caso de control:

Para el cálculo de la rodera a partir de la información recolectada, se elaboró una hoja de cálculo bajo la lógica del procedimiento para diseñar y proponer espesor de capa granular conociendo los demás datos, pero en vez de iterar los valores de los espesores en ambos lados de la ecuación, se fijó uno de los dos valores del espesor y el otro se condicionó mediante el comando “Buscar Objetivo” o “Goal Seek” para obtener el mismo valor que la celda que contiene el valor del espesor ya establecido modificando el valor de la celda de rodera, y de esta forma se obtiene un valor de deformación permanente en función de todas las demás variables de la ecuación que rige esta metodología. Dicha tabla se presenta a continuación:

Estructura de control (sin refuerzo)	
Carga por rueda P (kN)	37.5
Presión de inflado p´	760
r (m)	0.1253239
CBR Subrasante %	1.7
CBR Material granular %	100
RE	8.149487962
J módulo de rigidez (m*N)	0
N Num repeticiones carga	740
s Ahuellamiento permitido (mm)	82.96641137
fs mm	75
fc kPa	30
Nc	3.14
h Altura sugerida (m)	0.3048
Parte 1 numerador	1.368029343
Parte 1 denominador	1.816
Numerador raíz	760
Denominador raíz	42.51361641
Raíz	4.228075865
h calculado (m)	0.304759

Tabla 27.- Resultados para el cálculo de la rodera en el primer caso correspondiente a la sección de control (Elaboración propia).

Nota= Si RE es mayor a 5.0, el valor de esta variable para los cálculos restantes en la expresión será igual a 5.

La parte de la ecuación que conforma RE es la siguiente=

$$RE = \left(\frac{3.48 * CBR_{BG}^{0.3}}{CBR_{SR}} \right)$$

Por lo tanto, la rodera teórica que debió sufrir el tramo de control sin refuerzo a las 740 pasadas del vehículo fue de 8.296cm o 3.266 pulgadas. Ninguno de los siguientes cálculos debe presentar una rodera de mayor magnitud porque en ese caso el geosintético de refuerzo estaría perjudicando el sistema multicapa de pavimento. En el apartado de anexos se colocarán las tablas correspondientes a los cálculos restantes.

Cálculo para el geotextil tejido:

Para 740 pasadas del vehículo y un CBR de 1.7%, la rodera obtenida con el refuerzo de geotextil fue de 5.0664cm o 1.9946 pulgadas.

Para 300 pasadas del vehículo y un CBR de 2.37%, la rodera obtenida con el refuerzo de geotextil fue de 3.36 cm o 1.32 pulgadas.

La deformación medida en campo correspondiente al CBR de 2.37% fue de 1.13 pulgadas. Comparando ambas mediciones se obtuvo el siguiente porcentaje de error=

$$Error = \frac{1.32 \text{ in} - 1.13 \text{ in}}{1.32 \text{ in}} * 100 = 14.4\%$$

No obstante, la deformación medida en otro punto de dicho tramo es de mucha mayor magnitud a pesar de haber reportado un CBR ligeramente menor. Esta gran discrepancia

puede deberse ya sea a los problemas que tuvieron los investigadores para efectuar la primera ronda de mediciones, así como la falta de variables de los geotextiles tejidos en la ecuación de esta teoría que pueda respaldar un cálculo más apegado a la realidad. Pese a ello, este fue el caso con el menor grado de error.

Cálculo para la geomalla tejida:

Para 740 pasadas del vehículo y un CBR de 1.7%, la rodera obtenida con el refuerzo de geotextil fue de 4.091 cm o 1.6106 pulgadas.

Para 300 pasadas del vehículo y un CBR de 2.39%, la rodera obtenida con el refuerzo de geotextil fue de 2.715 cm o 1.068 pulgadas.

La deformación medida en campo correspondiente al CBR de 2.39% fue de 1.48 pulgadas. Comparando ambas mediciones se obtuvo el siguiente porcentaje de error=

$$Error = \frac{1.48 \text{ in} - 1.068 \text{ in}}{1.48 \text{ in}} * 100 = 27.8\%$$

Así como en el caso del geotextil tejido, la otra medición de rodera en el tramo a pesar de tener un CBR cercano al punto comparado su valor era mayor y su comparación con la rodera teórica llevaría a un alto grado de error.

Cálculo para la geomalla soldada:

Para este caso la ecuación planteada redirigía a valores de rodera fuera de la lógica, indicando que el modelo tiende a marcar este error para geomallas cuya variable de rigidez torsional J es mayor a 1.0 en las unidades que se solicitan para la ecuación. La otra geomalla soldada empleada en estas pruebas también arrojó un valor de J mayor a 1.0 y la expresión iterativa

para calcular la rodera no arrojaba resultados viables y el espesor que condicionaba en la ecuación a la rodera mostró un comportamiento asintótico por un espesor mucho menor. Esta situación ya deriva al análisis matemático de la expresión en donde el valor de J está elevado a una potencia y el tener un valor mayor a 1.0 afecta en gran medida a las demás variables involucradas.

Por este motivo, el valor de rodera obtenido se descartó para compararlo con las mediciones realizadas en campo.

Cálculo para la geomalla extruida:

Para 740 pasadas del vehículo y un CBR de 1.4%, la rodera obtenida con el refuerzo de geotextil fue de 2.86582 cm o 1.128 pulgadas.

Para 300 pasadas del vehículo y un CBR de 1.9%, la rodera obtenida con el refuerzo de geotextil fue de 2.093 cm o 0.82 pulgadas.

La deformación medida en campo correspondiente al CBR de 1.90% fue de 3.22 pulgadas. Comparando ambas mediciones se obtuvo el siguiente porcentaje de error=

$$Error = \frac{3.22 \text{ in} - 0.82 \text{ in}}{3.22 \text{ in}} * 100 = 74.53\%$$

La medición de la otra rodera en el mismo tramo resultó ser menor ante un aumento del CBR para dicha medición, no obstante, un aumento del CBR en el modelo teórico programado en la hoja de cálculo llevará una rodera aún menor a la obtenida que al compararse con su medición correspondiente seguirá arrojando un valor elevado de error.

Comentarios.

Todo este desarrollo numérico con esta ecuación iterativa de la metodología de Giroud-Han 2004 busca comprobar cuantitativamente uno de los resultados del estudio principal que se recapituló en esta investigación el cual no se había comentado hasta este punto. Dicha cuestión recae en la correlación lineal que se hizo a varias de las propiedades de los geosintéticos del refuerzo empleados en las 17 pruebas, la cual mostró una correlación relativamente alta con la resistencia y rigidez de los nodos de las geomallas, pero a su vez mostró correlaciones bajas, al punto de ser negativas, con las propiedades de la rigidez torsional o “aperture stability modulus” cómo lo marcaron en el estudio:

Table 25: R-Squared Results of Linear Regression Analysis Using Data from All Test Sections

	Cross-machine direction*			Machine direction*		
	1.0 in. rut	2.0 in. rut	2.5 in. rut	1.0 in. rut	2.0 in. rut	2.5 in. rut
Junction strength^a	0.065	0.601	0.649	---	---	---
Junction stiffness^a	0.176	0.720	0.680	---	---	---
Aperture stability modulus^{a,b}	-0.447	-0.208	-0.297	-0.447	-0.208	-0.297

* bolded values indicate R-squared values greater than 0.500

--- material tests not conducted in the machine direction

^a junction strength and stiffness, and aperture stability modulus of the Tenax MS 330 product was not included in this analysis because it was difficult to determine this property based on the fact that it consisted of three layers

^b aperture stability modulus is not direction dependent so values are the same for machine and cross-machine directions

Tabla 28.- Resultados del análisis de la regresión lineal empleando datos de todas las secciones de prueba, propiedades seleccionadas correspondientes al quinto estudio (Cuelho E., Perkins S. & Morris Z., 2014).

Con la información actual de estudios relativamente recientes, se demuestra que la metodología de Giroud-Han 2004 (una de las más empleadas para el diseño con geosintéticos para la estabilización de suelos) es poco confiable para representar realmente lo que sucede en este proceso, y esto se debe primordialmente a una pobre caracterización de las propiedades de los geosintéticos en campo para relacionarlos con el desempeño en campo de esta metodología.

A pesar de tener errores dentro de los márgenes aceptables abordando el caso del geotextil tejido, al ser un geosintético que cumple con varias funciones simultáneamente (a diferencia de la geomalla) muchas de sus propiedades en los modelos son omitidas, propiedades que los estudios y las mediciones en campo demuestran que sí deben tomarse en cuenta para la formulación de metodologías.

Los cálculos teóricos del geotextil tejido apuntaron que su rodera sería mayor a la de todas las geomallas, pero en las mediciones en campo resultó ser el geosintético con el mejor desempeño y esto pudo deberse a su función de separación que una geomalla no siempre puede asegurar, la contaminación de partículas finas en los tramos con geotextil tejido fue la de menor magnitud en todo el estudio y esto permitió que las propiedades de cada capa de material se conservasen de mejor manera durante la aplicación de la carga vehicular y posteriormente por acción de las condiciones climatológicas por meses.

A pesar de haber tenido poca correlación con los resultados del último estudio, la filtración y drenaje del agua también es un papel importante para el desempeño de los geosintéticos en esa aplicación, rubro que este y otros modelos para el diseño por estabilización no contempla. Si uno de los geosintéticos que entraron en los 17 tramos de prueba tiene buenas propiedades de drenaje lo es el geotextil no tejido, pese a que su uso como refuerzo resulte contraproducente al requerir elevados porcentajes de deformación unitaria, si resultó ser el cuarto geosintético con mejor desempeño global para la estabilización de la subrasante del estudio lo fue por su facilidad para captar y transmitir el agua fuera del sistema multicapa del pavimento.

Como lo marcó el segundo estudio resumido en esta revisión bibliográfica, el contenido de agua afecta considerablemente las propiedades mecánicas de los geosintéticos de refuerzo, por lo que su drenaje es esencial si se quiere tener un desempeño adecuado a largo plazo.

Caracterizar propiedades de geotextiles, ya sean tejidos o no tejidos, para lograr modelos de diseño y análisis más apegados a la realidad sin duda es una tarea compleja, pero el mejor punto de partida es considerar sus atributos por el conjunto de funciones que puede llegar a cumplir simultáneamente y no emplear propiedades muy específicas para una sola función.

El caso de la caracterización de las propiedades de las geomallas puede puntualizarse mejor para la información recolectada con estos estudios, los resultados del cuarto estudio resumido acerca de la interacción suelo-geosintético mediante pruebas de corte y análisis computacionales indicaron que un refuerzo con geometría de malla y uniones rígidas eran aquellos con una mayor interacción con el suelo de contacto, información que fue comprobada con las mediciones en campo del quinto estudio, al ser las geomallas con los nodos más resistentes y rígidos aquellas que tuvieron en la mayoría de los casos un mejor desempeño en la estabilización de la subrasante.

Por ello, es importante que esta información se vea reflejada en nuevas teorías de diseño que puedas sustituir aquellos con décadas de antigüedad, y esto no quiere decir que sean metodologías erróneas, en su momento fueron planteadas para buscar aproximaciones con la información que tenían en su momento, pero ahora que se sabe que la rigidez torsional J presenta poca correlación con un buen desempeño de estas tecnologías para funciones de

estabilización, los modelos específicamente para geomallas deben plantearse encaminándose a incluir parámetros relaciones con la resistencia y rigidez de los nodos.

Así como está ocurriendo la transición con los métodos de diseño de pavimentos, hallazgos de esta índole son la señal para ir disminuyendo la cantidad de elementos empíricos en los modelos de diseño con geosintéticos y empezar a contemplar variables mecanicistas que sean más fáciles de homogeneizar y regular desde los procesos de fabricación de estos materiales.

Futuras investigaciones enfocadas al desempeño de las geomallas para evaluar los tipos de uniones deberán contemplar como eje en su metodología el emplear ejemplares de un mismo proveedor, buscando así condiciones más estandarizadas entre los geosintéticos a estudiar.

Pero de igual forma, evaluar geomallas de un mismo tipo de unión, pero de diferentes proveedores o plantas de producción (en el caso de un mismo proveedor) dará resultados ligados al mismo proceso de fabricación de los materiales, y en función de la apertura que tengan las empresas participantes, los resultados tiene el potencial de llevar a una optimización de los métodos de producción para los fabricantes involucrados.

Además de todo lo comentado, el último estudio reveló algo bastante interesante en relación a los mecanismos de interacción ya que la teoría explicada al inicio apunta un mecanismo de interacción específico a un tipo de geosintético cuando las mediciones y evidencia en campo de aquella investigación de muestran que, por lo menos en el caso de las geomallas, su mecanismo de interacción puede variar en función de la magnitud de deformación que llegue a presentar, manteniendo su adjudicado mecanismo de trabazón bajo

condiciones iniciales de deformación pero presentando un comportamiento diferente a partir de niveles de rodera en específico.

Igual lo anterior pudo deberse a la interfase en que la geomalla estuvo colocada, ya que esta preserva mucho mejor su mecanismo habitual de interacción cuando se encuentra rodeada de un suelo granular cuyas partículas queden atrapadas en sus aberturas, pero en un medio con material más fino y sin las condiciones de drenaje óptimo, ciertamente su mecanismo de trabajo predilecto no pudo desarrollarse.

En este tipo de situaciones en que se requiere estabilizar la interfase de una capa de pavimentos granular y una subrasante, la opción más viable resultará ser ya sea un geotextil tejido o un geocompuesto cuya parte superior sea la geomalla para confinar los particulares granulares de la base y en la parte inferior un geotextil que desarrolla adecuadamente su mecanismo de interacción en un suelo con mayor contenido de finos.

Por ello, a la hora de plantear o formular modelos/ecuaciones de diseño y definir características de geosintéticos en dichos modelos, conocer y especificar las condiciones en que un geosintético presentará un adecuado mecanismo de trabajo es fundamental para que la propuesta tenga menores posibilidades de presentar discrepancias en su implementación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Sin duda el campo de acción para las problemáticas que enfrenta actualmente la infraestructura carretera de México es amplio, en un contexto en donde las sobrecargas vehiculares y las condiciones climatológicas extremas seguirán presentes o incluso incrementándose, la optimización de las nuevas tecnologías para mejorar el proceso tradicional en la construcción de pavimentos flexibles son una alternativa viable si dicha optimización se lleva a cabo con los fundamentos científicos e ingenieriles adecuados.

A lo largo de este documento se hizo una recapitulación de los problemas funcionales y estructurales que tienen los pavimentos, así como sus causas, ligándolo con la tecnología que se hizo presente por el resto del documento: los geosintéticos de refuerzo. El eje fundamental para respaldar una buena implementación de estos materiales ya sea como refuerzo o estabilización en el sistema multicapa de un pavimento flexible recae en su sistema de interacción con los suelos, conociendo dicho mecanismo de trabajo es que se puede delimitar las condiciones en que cada geosintético de esta índole puede desempeñarse de la mejor manera posible.

Los estudios analizados después de presentar la metodología de esta investigación dejaron ver a los geotextiles como un material multitareas con amplio potencial de uso, en donde su mayor limitación aparentemente es su representación matemática en los modelos de diseño los cuales contemplan únicamente las propiedades involucradas en una función en específico sin tomar en cuenta el papel simultáneo que otros elementos físicos del material puedan ocasionar en otras funciones. Al plantear una metodología de diseño de refuerzo con geotextiles tejidos no debe quedar fuera cómo influye sus propiedades de separación o sus

propiedades de filtración ya que de no hacerlo los modelos subestimarán las cualidades del material y su optimización se verá afectada.

Ciertamente buscar lo anterior implica una labor sumamente compleja al entrar en el escenario variables climatológicas, pero el avance tecnológico de los últimos años en herramientas computacionales y sensores de medición implican un enorme potencial para seguir promoviendo investigaciones como las recapituladas en este documento con lo cual se irán formulando y afinando modelos que puedan describir un mejor comportamiento de los geotextiles y no sólo modelos que lo tratan de discretizar.

Por otra parte, la interpretación de toda la información presentada en los estudios que involucraron el desempeño de las geomallas biaxiales aterrizó resultados más tangibles. Las funciones de las geomallas claramente son más puntuales que la de los geotextiles limitándose al refuerzo y estabilización (preferentemente de suelos granulares), pero a pesar de ello en esta investigación se verificó que inclusive en una de las metodologías más aceptadas para el diseño por estabilización de suelos blancos con geosintéticos hubo una mala caracterización de las propiedades del material a la hora de formular la ecuación de diseño.

Estudios en campo con una adecuada implementación de sensores de medición mostraron que la propiedad denominada módulo de rigidez torsional presenta baja correlación en el desempeño de las geomallas a la hora de estabilizar una subrasante, cuestión que se comprobó numéricamente con los porcentajes de error elevados al comparar las deformaciones teóricas dadas por la ecuación de diseño de Giroud-Han 2004 con las mediciones en campo.

Esto no descarta que las mediciones de los resultados no estuviesen lo mejor afinadas y calibradas, pero lo que es rescatable es que hay otras propiedades físicas de las geomallas que parecen intervenir mejor en el desempeño de esta aplicación y han sido omitidas en la formulación de metodologías de diseño. La resistencia de los nodos y la rigidez de estos influye directamente en la rigidez general del elemento más que en su resistencia a la tensión última, la fortaleza en las uniones de las geomallas apunta ser un parámetro viable con el que se pueden plantear una gran diversidad de investigaciones para corroborar la unión más adecuada en la estabilización de suelos o para más funciones, así como el proceso de fabricación más rentable para producir las geomallas que interactúen mejor con el suelo que las rodea y mejoren las propiedades del sistema multicapa que están reforzando.

De esta forma la continuidad a este trabajo en una parte recae en estudios en campo como el último analizado en este documento donde se empleen geomallas con un mismo tipo de unión pero de diferentes materiales poliméricos o viceversa, que se haga uso de geomallas de un mismo polímero pero con diferentes tipos de unión en su proceso de fabricación; brindando en ambos casos un análisis más objetivo de la influencia que tiene el proceso de producción de este geosintético de refuerzo en específico para la aplicación en campo estudiada.

En cuanto a la continuidad de este trabajo en el área de los geotextiles, para lograr entender su complejo funcionamiento en estudios futuros se deben tener las herramientas adecuadas para medir las propiedades de los geotextiles en campo, recientemente se han estado desarrollado sensores aplicados en proyectos de infraestructura con gran potencial para medir una gran variedad de parámetros implícitos que puedan estarse ignorando en el

estudio de los geotextiles. Por lo que el área de investigación para este geosintético, pese a que su creación se remonta a mediados del siglo XX, apenas está tomando forma. Una vez se cuenten con las herramientas adecuadas, se podrán ir planteando programas de estudios en campo que otorguen información significativa de las propiedades que influyan objetivamente en el desempeño de los geotextiles en campo.

Recordando que el alcance de esta investigación es argumentativo tras la revisión bibliográfica de estudios técnicos y su comparación con las teorías ya conocidas, toda optimización de un proceso o un producto se respalda en conocer sus fundamentos y vincular adecuadamente la teoría con la práctica, un puente que particularmente tiene muchas grietas y roderas en el área del diseño de geosintéticos de refuerzo aplicados a pavimentos flexibles. Por lo que se espera que este tipo de documentos pueda esclarecer las nociones básicas del funcionamiento de esta tecnología para formular programas de investigación con objetivos más claros y puntuales, para no sólo optimizar la producción del conocimiento efectivo sino también optimizar las soluciones ingenieriles que tanto necesita el país.

BIBLIOGRAFÍA

- Abu-Farsakh, M., Coronel, J., & Tao, M. (2007). “*Effect of Soil Moisture Content and Dry Density on Cohesive Soil–Geosynthetic Interactions Using Large Direct Shear Tests*”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(7), 540–549. [https://doi-org.udlap.idm.oclc.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:7\(540\)](https://doi-org.udlap.idm.oclc.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:7(540))
- ASTM D4439-20, Standard Terminology for Geosynthetics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020,
- Barry R. C. et al. (2006). “*Geotechnical Aspects of Pavements*”. Estados Unidos: National Highway Institute.
- Cordoni Jara V. I. (2018). “*La Carga de Rotura y la Elongación por el Método Grab de Geotextiles Tejidos y No Tejidos y los esfuerzos de tensión en la estructura de pavimentos flexibles*”. 06/07/21, de Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Cuelho E., Perkins S. & Morris Z. (2014). “*Relative Operational Performance of Geosynthetics Used As Subgrade Stabilization*”. Montana, United States: Western Transportation Institute, College of Engineering Montana State University – Bozeman.
- Departamento de Ingeniería - Geosistemas PAVCO. (2012). “*Manual de Diseño con Geosintéticos*”. Novena Edición. Colombia: Mexichem.
- Ibrahim, S. F., Ahmed, N. G., & Mohammed, D. E. (2016). “*Effect of Reinforcement on Improve Surface Pavement for Weak Subgrade Conditions*”. *International Journal of GEOMATE*, 11(23), 2188–2193. <https://search-ebSCOhost->

com.udlap.idm.oclc.org/login.aspx?direct=true&db=aps&AN=117309151&lang=es
&site=eds-live.

- Instituto Mexicano del Transporte. (2020). “*Red Nacional de Caminos*”. 22/08/21, de Secretaría de Comunicaciones y Transporte Sitio web: https://www.imt.mx/images/files/USIG/rnc/Documento_Tecnico.pdf
- Perkins S. W. et al. (2010). “*Geosynthetics in Pavement Reinforcement Applications*”. En 9th International Conference on Geosynthetics (165-192). Brasil.
- Roodi G. H. et al. (2018). “*Soil-Geosynthetic Interaction Test to Develop Specifications for Geosynthetic Stabilized Roadway*”. 12/09/2021, de Center for Transportation Research The University of Texas at Austin Sitio web: <http://library.ctr.utexas.edu/ctr-publications/5-4829-03-1.pdf>
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT). (2021). “*Estadística Básica del Autotransporte Federal 2020*. 09/09/2021, de Gobierno de México”. Sitio web: https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAF/EST_BASICA/EST_BASICA_2019/Estad%C3%ADstica_B%C3%A1sica_del_Autotransporte_Federal_2020.pdf
- Vlcek J., & Valaskova V. (2019). “*Investigation of the Soil-Geosynthetic Interaction Using Direct Shear Testing and FEM Method*”. IOP Conference Series: Materials Science & Engineering, 603(5), 1.
- Zofka, A., Maliszewski, M., Zofka, E., Paliukaitė, M., & Žalimienė, L. (2017). “*Geogrid Reinforcement of Asphalt Pavements*. *Baltic Journal of Road & Bridge*

Engineering (Baltic Journal of Road & Bridge Engineering)”, 12(3), 181–186.

<https://doi-org.udlap.idm.oclc.org/10.3846/bjrbe.2017.22>

- Zornberg, J.G. (2017). “*Part 1: Functions and Applications of Geosynthetics in Roadways.*” *Geosynthetics*, February/ March, Vol. 35, No. 1, pp. 34–41.
- Zornberg, J.G. (2017). “*Part 2: Functions and Applications of Geosynthetics in Roadways.*” *Geosynthetics*, April/ May, Vol. 36, No. 1, pp. 34–40.
- Zornberg, J. G. (2012). “*Refuerzo De Pavimentos Sobre Arcillas Expansivas*”. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 12(1), 144–150.

ANEXOS

Cálculos de rodera para comparación con mediciones del estudio analizado #5.

Geotextil tejido: Primera rodera

Estructura con refuerzo geotextil	
Carga por rueda P (kN)	37.5
Presión de inflado p	760
r (m)	0.1253239
CBR Subrasante %	1.7
CBR Material granular %	100
RE	8.14948796
J módulo de rigidez (m*N)	0
N Num repeticiones carga	740
s Ahuellamiento permitido (mm)	50.664
fs mm	75
fc kPa	30
Nc	5.14
h Altura sugerida (m)	0.3048
Parte 1 numerador	1.36802934
Parte 1 denominador	1.816
Numerador raíz	760
Denominador raíz	42.4970408
Raiz	4.22890035
h calculado (m)	0.304837

Geotextil tejido: Segunda rodera

Estructura con refuerzo geotextil	
Carga por rueda P (kN)	37.5
Presión de inflado p	760
r (m)	0.1253239

CBR Subrasante %	2.37
CBR Material granular %	100
RE	5.84562428
J módulo de rigidez (m*N)	0
N Num repeticiones carga	300
s Ahuellamiento permitido (mm)	33.6031973
fs mm	75
fc kPa	30
Nc	5.14
h Altura sugerida (m)	0.3048
Parte 1 numerador	1.29969511
Parte 1 denominador	1.816
Numerador raíz	760
Denominador raíz	39.2951763
Raiz	4.39781722
h calculado (m)	0.304761

Geomalla tejida: Primera rodiera

Estructura con refuerzo geomalla	
Carga por rueda P (kN)	37.5
Presión de inflado p	760
r (m)	0.1253239
CBR Subrasante %	1.7
CBR Material granular %	100
RE	8.149487962
J módulo de rigidez (m*N)	0.35
N Num repeticiones carga	740
s Ahuellamiento permitido (mm)	40.912645
fs mm	75
fc kPa	30
Nc	5.71
h Altura sugerida (m)	0.3048
Parte 1 numerador	1.274805264

Parte 1 denominador	1.816
Numerador raíz	760
Denominador raíz	38.12323638
Raíz	4.464901838
h calculado (m)	0.3048266

Geomalla tejida: Segunda rodera

Estructura con refuerzo geomalla	
Carga por rueda P (kN)	37.5
Presión de inflado p	760
r (m)	0.1253239
CBR Subrasante %	2.39
CBR Material granular %	100
RE	5.796706919
J módulo de rigidez (m*N)	0.35
N Num repeticiones carga	300
s Ahuellamiento permitido (mm)	27.15756668
fs mm	75
fc kPa	30
Nc	5.71
h Altura sugerida (m)	0.3048
Parte 1 numerador	1.219211079
Parte 1 denominador	1.816
Numerador raíz	760
Denominador raíz	35.57722239
Raíz	4.62190247
h calculado (m)	0.304743

Geomalla soldada: Primera rodera

Estructura con refuerzo geomalla	
Carga por rueda P (kN)	37.5
Presión de inflado p	760

r (m)	0.1253239
CBR Subrasante %	1.7
CBR Material granular %	100
RE	8.149487962
J módulo de rigidez (m*N)	1.57
N Num repeticiones carga	740
s Ahuellamiento permitido (mm)	2.84986E+35
fs mm	75
fc kPa	30
Nc	5.71
h Altura sugerida (m)	0.3048
	-
Parte 1 numerador	0.507791326
Parte 1 denominador	1.816
Numerador raíz	760
Denominador raíz	2.65556E+35
Raíz	5.34969E-17
h calculado (m)	0.0350432

Se omitió el despliegue de resultados para la segunda rodiera de este caso.

Geomalla extruida: Primera rodiera

Estructura con refuerzo geomalla	
Carga por rueda P (kN)	37.5
Presión de inflado p	760
r (m)	0.1253239
CBR Subrasante %	1.4
CBR Material granular %	100
RE	9.895806811
J módulo de rigidez (m*N)	0.7796
N Num repeticiones carga	760
s Ahuellamiento permitido (mm)	28.67023459
fs mm	75
fc kPa	30

Nc	5.71
h Altura sugerida (m)	0.3048
Parte 1 numerador	0.905655239
Parte 1 denominador	1.816
Numerador raíz	760
Denominador raíz	22.0010073
Raiz	5.877403585
h calculado (m)	0.3048384

Geomalla extruida: Segunda rodera

Estructura con refuerzo geomalla	
Carga por rueda P (kN)	37.5
Presión de inflado p	760
r (m)	0.1253239
CBR Subrasante %	1.9
CBR Material granular %	100
RE	7.291647124
J módulo de rigidez (m*N)	0.7796
N Num repeticiones carga	300
s Ahuellamiento permitido (mm)	20.93356392
fs mm	75
fc kPa	30
Nc	5.71
h Altura sugerida (m)	0.3048
Parte 1 numerador	0.900378559
Parte 1 denominador	1.816
Numerador raíz	760
Denominador raíz	21.80118282
Raiz	5.904277591
h calculado (m)	0.3047321